

بِسْمِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد ، شماره ۱۶۵

# ترمودینامیک

تألیف

جی . پی . هولمن

ویرایش چهارم

ترجمه

دکتر سید محمد رضا مدرّس رضوی

فهرست‌نویسی پیش از انتشار توسط کتابخانه مرکزی و مرکز اسناد دانشگاه فردوسی مشهد .

Holman, Jack Phillip

هولمن ، جک فیلیپ

ترمودینامیک / تألیف جی . پی . هولمن ؛ ترجمه محمد رضا مدرّس رضوی . - مشهد : دانشگاه فردوسی مشهد ، ۱۳۷۴ .

۱۰۳۱ ص : مصوّر ، جدول ، نمودار . - (انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد : ۱۶۵)

Thermodynamics

عنوان اصلی :

واژه‌نامه .

کتابنامه در پایان هر فصل .

۱. ترمودینامیک . الف . مدرّس رضوی ، محمد رضا ؛ مترجم . ب . عنوان .

QC۳۱۱/

۵۳۶/۷

#### مشخصات :

نام کتاب : ترمودینامیک

تألیف : جی . پی . هولمن

ترجمه : سید محمد رضا مدرّس رضوی

ویراستاران علمی : ابراهیم دامنگیر و مجید صفّار اوّل

ویراستار ادبی : محمد دهقانی

ناشر : انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ انتشار : شهریورماه ۱۳۷۴ - چاپ اوّل

تیراژ : ۲۰۰۰ نسخه

حروفچینی و صفحه‌آرایی : حروفچینی کامپیوتری نشر وحید - تلفن ۸۳۸۰۴۶

امور فنی و چاپ : مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

قیمت : ۲۰۰۰۰ ریال

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱۷	درباره مؤلف
۱۹	دبیاچه
۲۳	پیشگفتار مترجم
	فصل ۱ - مقدمه
۲۵	۱-۱ ماهیت ترمودینامیک
۲۶	۱-۲ رابطه بین مکانیک کلاسیک و ترمودینامیک
۳۰	۱-۳ دما، حرارت و قانون صفرم ترمودینامیک
۳۱	۱-۴ مقیاسهای دما
۳۵	۱-۵ اصل حالت
۳۶	۱-۶ کار
۳۷	۱-۷ ترمودینامیک میکروسکوپی و ماکروسکوپی
۳۹	۱-۸ خواص ترمودینامیکی
۴۰	۱-۹ قوانین اساسی ترمودینامیک
۴۱	۱-۱۰ کاربردهای ترمودینامیک
۴۴	۱-۱۱ سیستمهای آحاد

۵۶	۱-۱۲ حرکت بسوی سیستم واحدی SI
۵۹	۱-۱۳ فشار و محیط پیوسته (یکپارچه)
۶۱	۱-۱۴ گاز ایده آل
۶۶	۱-۱۵ دماسنج گاز ایده آل
۶۸	۱-۱۶ تئوری جنبشی ساده یک گاز ایده آل
۷۱	خودآزمایی (سؤالات مروری)
۷۳	مسائل
۷۷	مراجع

## فصل ۲ - قانون اول ترمودینامیک

۷۹	۲-۱ مقدمه
۸۰	۲-۲ کار
۸۱	۲-۳ کار انبساط یا تراکم در یک سیلندر
۸۴	۲-۴ کار در میدان جاذبه ثقل
۸۵	۲-۵ کار الکتریکی و مغناطیسی
۹۱	۲-۶ انرژی داخلی
۹۵	۲-۷ قانون اول ترمودینامیک
۹۸	۲-۸ حرارت و گرمای ویژه
۱۰۳	۲-۹ گرماهای ویژه برای گازهای ایده آل
۱۱۹	۲-۱۰ فرآیندهای گاز ایده آل
۱۲۳	۲-۱۱ فرآیند شبه ساکن - آدیاباتیک برای گاز ایده آل
۱۳۱	۲-۱۲ خلاصه
۱۳۲	خودآزمایی (سؤالات مروری)
۱۳۳	مسائل
۱۴۸	مراجع

### فصل ۳ - خواص ماکروسکوپی مواد خالص

۱۴۹	۳-۱ مقدمه
۱۵۲	۳-۲ خواص مواد خالص
۱۵۴	۳-۳ نواحی اشباع
۱۶۲	۳-۴ معادلات حالت
۱۷۱	۳-۵ خواص برای ناحیه اشباع جامد - بخار
۱۷۳	۳-۶ گرماهای ویژه (حرارت‌های مخصوص)
۱۷۴	۳-۷ ضریب انبساط
۱۷۸	خودآزمایی (سؤالات مروری)
۱۷۹	مسائل
۱۸۷	مراجع

### فصل ۴ - تحلیل انرژی در سیستم‌های باز

۱۸۹	۴-۱ مقدمه
۱۹۰	۴-۲ موازنه انرژی و قراردادهای علامت
۱۹۱	۴-۳ سیستم بسته
۱۹۱	۴-۴ سیستم باز
۱۹۳	۴-۵ حجم کنترل (حجم معیار)
۱۹۹	۴-۶ خلاصه حالات خاص سیستم باز
۲۲۹	۴-۷ فرآیند خفگی (اختاقی) و ضریب زول - تامسون
۲۳۴	خودآزمایی (سؤالات مروری)
۲۳۴	مسائل
۲۵۶	مراجع

## فصل ۵ - قانون دوم ترمودینامیک

۲۵۷	۵-۱ مقدمه
۲۵۸	۵-۲ تشریح فیزیکی قانون دوم
۲۵۹	۵-۳ بیانهای کلاسیوس و کلوین - پلانک
۲۶۰	۵-۴ فرآیندها و سیکل‌های برگشت پذیر
۲۶۳	۵-۵ قرارداد علامت برای حرارت و کار
۲۶۴	۵-۶ دمای ترمودینامیکی
۲۶۸	۵-۷ نابرابری کلاسیوس
۲۷۰	۵-۸ تعریف ماکروسکپی آنتروپی
۲۷۱	۵-۹ اصل افزایش آنتروپی
۲۷۵	۵-۱۰ عوامل عملی برگشت ناپذیری‌ها
۲۷۶	۵-۱۱ آنتروپی ماده خالص
۲۷۹	۵-۱۲ تغییر آنتروپی برای گاز ایده آل
۲۸۱	۵-۱۳ سیکل کارنو
۲۸۹	۵-۱۴ انرژی دسترس پذیر (قابلیت کاردهی) و انرژی دسترس ناپذیر
۲۹۴	۵-۱۵ تحلیل قانون دوم برای حجم کنترل
۲۹۶	۵-۱۶ مقدار کاردهی و مقدار برگشت ناپذیری در جریان دایم
۳۰۰	۵-۱۷ ملاحظات کاربردی با مقدار کاردهی
۳۱۲	۵-۱۸ مقدار کاردهی در سیستمهای بسته
۳۱۶	۵-۱۹ تعبیر میکروسکپی آنتروپی
۳۱۶	۵-۲۰ شیطانک ماکسول و تئوری اطلاعات
۳۱۸	خودآزمایی (سؤالات مروری)
۳۱۹	مسائل
۳۴۳	مراجع



## فصل ۶ - معادلات حالت و روابط عمومی ترمودینامیک

۳۴۵	۶-۱	مقدمه
۳۴۵	۶-۲	بعضی مقدمات ریاضی
۳۴۷	۶-۳	توابع هلمهولتز و گیبس
۳۴۸	۶-۴	معادله انرژی
۳۴۸	۶-۵	روابط ماکسول
۳۵۰	۶-۶	انتالپی، انرژی داخلی و آنتروپی
۳۵۳	۶-۷	روابط گرمای ویژه
۳۵۴	۶-۸	جداول گاز
۳۶۱	۶-۹	گرماهای ویژه در فشارهای بالا
۳۶۲	۶-۱۰	معادله کلاسیوس - کلاپرون
۳۶۴	۶-۱۱	ساخت جداول خواص ترمودینامیکی
۳۶۷	۶-۱۲	معادلات حالت
۳۷۵	۶-۱۳	ضریب تراکم پذیری عمومی
۳۸۷	۶-۱۴	خواص انرژی گازهای حقیقی
۴۰۱	۶-۱۵	ترمودینامیک اثرات مغناطیس
۴۰۴	۶-۱۶	اثر ماگنتو کالریک
۴۰۵		خودآزمایی (سؤالات مروری)
۴۰۶		مسائل
۴۱۶		مراجع

## فصل ۷ - مخلوط‌های گازی

۴۱۷	۷-۱	مقدمه
۴۱۷	۷-۲	قانون گیبس - دالتون

۴۲۲	۷-۳ خواص انرژی مخلوطها
۴۲۷	۷-۴ مخلوطهای گاز ایده آل و بخار
۴۳۱	۷-۵ اشباع آدیباتیک
۴۴۰	۷-۶ نمودار رطوبت سنجی
۴۴۳	۷-۷ فرآیندهای تهویه مطبوع
۴۶۴	۷-۸ برج های خنک کن
۴۶۷	۷-۹ مخلوطهای گاز حقیقی
۴۸۱	خودآزمایی (سؤالات مروری)
۴۸۳	مسائل
۵۰۶	مراجع

## فصل ۸ - ترمودینامیک و تعادل شیمیایی

۵۰۷	۸-۱ مقدمه
۵۰۷	۸-۲ واکنشهای احتراق
۵۱۳	۸-۳ انتالپی تشکیل
۵۱۵	۸-۴ ترازهای مینا برای جدول
۵۱۵	۸-۵ تابع گیس و آنتروپی مطلق
۵۱۹	۸-۶ حرارت واکنش و ارزش حرارتی
۵۲۷	۸-۷ دمای شعله آدیباتیک
۵۳۳	۸-۸ انتالیپهای محصولات عمومی
۵۴۴	۸-۹ تعادل
۵۴۸	۸-۱۰ تعادل شیمیایی گازهای ایده آل
۵۶۱	۸-۱۱ اثرات گازهای بی اثر

۵۶۳	۸-۱۲ تعادل در واکنشهای چندتائی
۵۶۷	۸-۱۳ معادله وانت هوف
۵۷۰	۸-۱۴ پتانسیل شیمیائی و تعادل فازى
۵۷۴	۸-۱۵ قانون فاز گیس
۵۷۷	۸-۱۶ قانون سوم ترمودینامیک
۵۷۸	۸-۱۷ مفهوم بیشترین مقدار کار
۵۸۰	خودآزمایی (سوالات مروری)
۵۸۱	مسائل
۵۹۵	مراجع

## فصل ۹ - سیکل‌های قدرت و تبرید

۵۹۷	۹-۱ مقدمه
۵۹۸	۹-۲ ملاحظات عمومی
۵۹۹	۹-۳ سیکل‌های قدرت بخار
۶۱۴	۹-۴ انحرافات از سیکل‌های بخار تئوری
۶۲۰	۹-۵ تحلیل سیکل قدرت
۶۲۵	۹-۶ کمپرسورهای گاز
۶۳۹	۹-۷ سیکل‌های موتور احتراق داخلی
۶۴۱	۹-۸ سیکل اتو
۶۴۴	۹-۹ سیکل دیزل
۶۴۸	۹-۱۰ موتور وانکل
۶۴۹	۹-۱۱ سیکل استرلینگ
۶۵۱	۹-۱۲ سیکل‌های توربین گازی
۶۶۷	۹-۱۳ تحلیل قانون دوم سیکل‌های قدرت

۶۷۶	سیکلهای پیوندی	۹-۱۴
۶۷۸	توربین گازی محرک جت	۹-۱۵
۶۸۱	رام جت	۹-۱۶
۶۸۳	راکت	۹-۱۷
۶۸۴	ضربه مخصوص	۹-۱۸
۶۸۵	سیکلهای تبرید بخار	۹-۱۹
۶۸۸	پمپ حرارتی	۹-۲۰
۶۹۳	سیکلهای تبرید جذبی	۹-۲۱
۶۹۷	خودآزمایی (سؤالات مروری)	
۶۹۸	مسائل	
۷۲۶	مراجع	

## فصل ۱۰ - ترمودینامیک سیال تراکم پذیر

۷۲۹	مقدمه	۱۰-۱
۷۲۹	حالت سکون	۱۰-۲
۷۳۱	سرعت صوت و عدد ماخ	۱۰-۳
۷۳۵	جریان دایم، یک بعدی آنتروپی ثابت	۱۰-۴
۷۴۴	معادله ممتموم برای یک حجم کنترل	۱۰-۵
۷۴۸	امواج ضربه‌ای در یک گاز ایده آل	۱۰-۶
۷۵۳	امواج ضربه‌ای در گذرگاههای همگرا - واگرا	۱۰-۷
۷۶۴	جریان بخار در شیوره	۱۰-۸
۷۶۸	ضرایب شیوره و پخش کن	۱۰-۹
۷۷۳	خودآزمایی (سؤالات مروری)	
۷۷۴	مسائل	
۷۸۳	مراجع	

## فصل ۱۱ - اصول انتقال حرارت

۷۸۵	۱۱-۱	مقدمه
۷۸۷	۱۱-۲	انتقال حرارت هدایتی در حالت دائم
۷۹۵	۱۱-۳	هدایت گذرا
۷۹۸	۱۱-۴	انتقال حرارت جابجائی
۸۱۱	۱۱-۵	انتقال حرارت تابشی
۸۲۵	۱۱-۶	پره ها (فین ها)
۸۲۹	۱۱-۷	مبدل های حرارتی
۸۳۸		خودآزمایی (سؤالات مروری)
۸۳۸		مسائل
۸۵۲		مراجع

## فصل ۱۲ - اصول ترمودینامیک آماری

۸۵۵	۱۲-۱	مقدمه
۸۵۵	۱۲-۲	احتمال
۸۵۷	۱۲-۳	فضای فازی
۸۵۸	۱۲-۴	ملاحظات کوانتومی
۸۶۲	۱۲-۵	تبهگنی (چندگانگی)
۸۶۳	۱۲-۶	حالات میکروسکپی، حالات ماکروسکپی و احتمال ترمودینامیکی
۸۷۱	۱۲-۷	مدلهای فیزیکی
۸۷۳	۱۲-۸	هدف تحلیل آماری
۸۷۴	۱۲-۹	تقریب استرلینگ
۸۷۵	۱۲-۱۰	مدل آماری بوز - اینشتین
۸۷۸	۱۲-۱۱	مدل آماری فرمی - دیراک

۸۷۹	۱۲-۱۲	مدل کلاسیک ماکسول - بولتزمن
۸۸۰	۱۲-۱۳	توزیع تعادلی
۸۸۳	۱۲-۱۴	تعبیر میکروسکوپی حرارت و کار
۸۸۴	۱۲-۱۵	آنتروپی
۸۸۵	۱۲-۱۶	قانون دوم ترمودینامیک
۸۸۶	۱۲-۱۷	تابع افزار (تقسیم)
۸۸۹	۱۲-۱۸	ثابت‌های $A$ و $\beta$
۸۹۰		خودآزمایی (سؤالات مروری)
۸۹۰		مسائل
۸۹۲		مراجع

### فصل ۱۳ - کاربردهای ترمودینامیک آماری

۸۹۵	۱۳-۱	مقدمه
۸۹۶	۱۳-۲	ثابت‌های $\beta$ و $k$
۸۹۸	۱۳-۳	توابع خواص و افزار
۹۰۰	۱۳-۴	گاز تک‌اتمی ایده‌آل
۹۰۵	۱۳-۵	گازهای دو و چند اتمی
۹۱۵	۱۳-۶	هم‌افراز انرژی
۹۱۷	۱۳-۷	حالت جامد
۹۲۲	۱۳-۸	گاز الکترون
۹۳۱	۱۳-۹	هادیها و نیمه هادیها
۹۳۶	۱۳-۱۰	گاز فتونی (تابش جسم سیاه)
۹۴۱	۱۳-۱۱	سیستمهای عکس العمل داخلی و مجموعه‌ای
۹۴۴		خودآزمایی (سؤالات مروری)
۹۴۵		مسائل
۹۴۸		مراجع

## ضمیمه A ضرایب تبدیل و خواص ترمودینامیکی

۹۵۱	جدول A-۱	ثابت‌های مهم فیزیکی
۹۵۲	جدول A-۲	ضرایب تبدیل
۹۵۳	جدول A-۳	آحاد اصلی و مکمل SI
۹۵۴	جدول A-۴	مشتقات آحاد SI
۹۵۶	جدول A-۵	ثابت‌های بحرانی
	جدول A-۶	انتالپی تشکیل، تابع گیس تشکیل و آنتروپی مطلق در $20^{\circ}\text{C}$
۹۵۸		$1\text{ atm}$ و $(77^{\circ}\text{F})$
۹۵۹	جدول A-۷	خواص آب - جدول دمای اشباع (آحاد انگلیسی)
۹۶۱	جدول A-۷M	خواص آب - جدول دمای اشباع (آحاد SI)
۹۶۲	جدول A-۸	خواص آب - جدول فشار اشباع (آحاد انگلیسی)
۹۶۴	جدول A-۸M	خواص آب - جدول فشار اشباع (آحاد SI)
۹۶۵	جدول A-۹	خواص آب - جدول بخار داغ (آحاد انگلیسی)
۹۷۱	جدول A-۹M	خواص آب - جدول بخار داغ (آحاد SI)
۹۷۵	جدول A-۱۰	خواص آب - جدول مایع فشرده (آحاد انگلیسی)
۹۷۶	جدول A-۱۰M	خواص آب - جدول مایع فشرده (آحاد SI)
۹۷۷	جدول A-۱۱	خواص آب - انحراف‌های مایع فشرده از مایع اشباع (آحاد انگلیسی)
۹۷۸	جدول A-۱۲	خواص آمونیاک اشباع - جدول دما (آحاد انگلیسی)
۹۷۹	جدول A-۱۳	خواص آمونیاک اشباع - جدول فشار (آحاد انگلیسی)
۹۸۰	جدول A-۱۴	خواص آمونیاک داغ (آحاد انگلیسی)
	جدول A-۱۵	خواص فریون -۱۲ (دی کلرو دی فلورومتان) جدول دمای اشباع (آحاد انگلیسی)
۹۸۲		اشباع (آحاد انگلیسی)
۹۸۴	جدول A-۱۶	خواص فریون -۱۲ داغ (آحاد انگلیسی)
۹۸۷	جدول A-۱۷	خواص ترمودینامیکی هوا در فشار پائین (آحاد انگلیسی)
۹۹۰	جدول A-۱۷M	خواص ترمودینامیکی هوا در فشار پائین (آحاد SI)

۹۹۳	خواص ترمودینامیکی گازها در فشار پائین (آحاد انگلیسی)	جدول ۱۸ - A
۹۹۵	خواص ترمودینامیکی گازها در فشار پائین (آحاد SI)	جدول ۱۸M - A
	توابع سیال تراکم پذیر- آنتروپی ثابت یک بعدی برای یک گاز	جدول ۱۹ - A
۱۰۰۰	ایده آل با گرماهای ویژه و وزن ملکولی ثابت و $\gamma = 1/4$	
	تابع ضربه قائم یک بعدی برای یک گاز ایده آل با گرماهای	جدول ۲۰ - A
۱۰۰۱	ویژه و وزن ملکولی ثابت و $\gamma = 1/4$	
	نمودار رطوبت سنجی، دماهای پائین، آحاد انگلیسی،	شکل ۱ - A
۱۰۰۲	$p = 1 \text{ atm}$ (با اجازه شرکت کریر)	
	نمودار رطوبت سنجی، دماهای پائین، آحاد انگلیسی،	شکل ۲ - A
۱۰۰۳	$p = 1 \text{ atm}$ (با اجازه شرکت کریر)	
	نمودار رطوبت سنجی، دماهای معمولی، آحاد SI،	شکل ۳ - A
۱۰۰۴	$p = 1 \text{ atm}$ (با اجازه شرکت کریر)	
۱۰۰۵	نمودار مولیر برای بخار آب، آحاد انگلیسی	شکل ۴ - A
۱۰۰۷	نمودار مولیر برای بخار آب، آحاد SI	شکل ۴M - A

### ضمیمه B خواص برای محاسبات انتقال حرارت

۱۰۰۹	خواص فلزات	جدول ۱ - B
۱۰۱۰	ضریب هدایت حرارتی چند غیر فلز	جدول ۲ - B
۱۰۱۱	خواص هوادر فشار آتمسفر	جدول ۳ - B
۱۰۱۲	خواص آب (مایع اشباع)	جدول ۴ - B



## درباره مؤلف

دکتر هولمن درجهٔ دکترای خود را در مهندسی مکانیک در سال ۱۹۵۸ از دانشگاه ایالتی اکلاهما دریافت کرد. بعد از دو سال فعالیت به عنوان محقق در آزمایشگاه تحقیقاتی هوا و فضای نیروی هوایی<sup>۱</sup> به عنوان عضو هیأت علمی در دانشگاه متدیست جنوبی<sup>۲</sup> پذیرفته شد و هم‌اکنون نیز به عنوان پروفیسور مکانیک در آنجا مشغول به کار است.

در مدت اشتغال در دانشگاه متدیست هشت بار در نظرخواهی سالانهٔ دانشجویان به عنوان عضو برجستهٔ دانشکدهٔ مهندسی انتخاب گردید. به علاوه او تا بحال مقام‌های اداری متفاوتی از جمله ریاست مرکز علوم حرارتی و سیالاتی<sup>۳</sup>، ریاست بخش دپارتمان مکانیک و عمران<sup>۴</sup>، و معاونت روشهای آموزش<sup>۵</sup> را به عهده داشته است.

وی به عنوان محقق اصلی پروژه‌هایی با حمایت مالی کمیسیون انرژی اتمی<sup>۶</sup>، بنیاد علوم ملی<sup>۷</sup>، ناسا<sup>۸</sup>، سازمان حفظ محیط زیست<sup>۹</sup> و بنیاد مطالعات دفاع استراتژیک<sup>۱۰</sup>، مقاله‌های متعددی در مجلات شیمی صنعتی و مهندسی، مجلهٔ بین‌المللی انتقال جرم و حرارت، مجلهٔ علوم هوا و فضا و بسیاری دیگر انتشار داده است.

دکتر هولمن همچنین مؤلف سه کتاب درسی است که به مقیاس وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. این کتابها انتقال حرارت ۱۹۶۳ (ویرایش ششم ۱۹۸۶)، روشهای تجربی برای مهندسين ۱۹۶۶ (ویرایش چهارم ۱۹۸۴) و ترمودینامیک ۱۹۶۹ (ویرایش چهارم ۱۹۸۸) هستند که همگی توسط مؤسسهٔ انتشارات مک گرا هیل چاپ شده است. کتابهای مورد بحث تا به حال به زبانهای اسپانیایی، چینی، ژاپنی، کره‌ای و پرتغالی ترجمه و از طریق نشر بین‌المللی<sup>۱۱</sup> چاپ شده در سنگاپور به مقیاس وسیع در جهان توزیع شده است. دکتر هولمن مشاور مؤسسهٔ مک گرا هیل در (بخش کتابهای) مهندسی

مکانیک است. او همچنین کارهای مشاوره‌ای فراوانی در زمینه‌های تبدیل انرژی و سیستمهای انرژی برای صنعت انجام می‌دهد.

به‌عنوان عضوانجمن ترویج مهندسی آمریکا، او رئیس سابق بخش مهندسی مکانیک ملی<sup>۱۲</sup> و رئیس سابق مدیران دپارتمان مهندسين مکانیک<sup>۱۳</sup> انجمن مهندسين مکانیک آمریکادر ناحیه ۱۰ است. نام دکتر هولمن به‌عنوان یک مهندس حرفه‌ای در ایالت تگزاس به‌ثبت رسیده و جایزه مهندس مکانیک سال را از انجمن مهندسين مکانیک آمریکا بخش تگزاس شمالی در سال ۱۹۷۱ دریافت کرد. در سال ۱۹۷۲ دکتر هولمن جایزه جورج وستینگهاوس<sup>۱۴</sup> را از انجمن ترویج مهندسی آمریکا برای خدمات ارزنده‌اش در آموزش مهندسی دریافت نمود و در سال ۱۹۸۶ انجمن مهندسين مکانیک آمریکا مدال طلای جیمز هنری پاتر<sup>۱۵</sup> را برای خدماتش در علم ترمودینامیک در مهندسی مکانیک به‌او اعطا نمود.

- 
- 1 - Air Force Aerospace Research Laboratory
  - 2 - Southern Methodist University
  - 3 - Director of Thermal and Fluid Sciences Center
  - 4 - Head of the Civil and Mechanical Engineering Department
  - 5 - Assistant Provost for Instructional Media
  - 6 - Atomic Energy Commission
  - 7 - National Science Foundation
  - 8 - NASA
  - 9 - Environmental Protection Agency
  - 10 - Strategic Defense Initiative
  - 11 - International edition
  - 12 - Chairman of the National Mechanical Engineering Division
  - 13 - Past Chairman of the A.S.M.E. Region X Mechanical Engineering  
Department Heads
  - 14 - George Westinghouse Award
  - 15 - James Henry Potter Gold Medal

## دیاچه

این کتاب برای استفاده در اولین درس ترمودینامیک دانشجویان رشته‌های مهندسی در نظر گرفته شده است. طبیعتاً ارائه تمام مطالب آن در يك ترم امکان ندارد و در هر دوره ممکن است بر مطالب مختلفی تأکید شود. در صورت لزوم مواد این کتاب برای ارائه در دو ترم متوالی کافی است. در چاپ چهارم فصل جدیدی درباره اصول انتقال حرارت اضافه شده است که می‌تواند در دوره‌هایی که برای مهندسين برق و کامپیوتر برگزار می‌شود به کار آید و نیز در مسائل سرمایه‌گذاری با ابعاد فزاینده‌ای در کاربردهای الکترونیکی مطرح می‌شوند، می‌تواند مورد توجه مهندسين برق قرار گیرد.

در اینجا بحث مختصری درباره ترتیب فصول می‌آید:

فصل ۱ تا ۴ گسترش سنتی قانون اول ترمودینامیک، خواص مواد خالص و تحلیل سیستمهای باز از دیدگاه انرژی را ارائه می‌دهد.

فصل پنجم: قانون دوم ترمودینامیک و مفهوم انرژی دسترس پذیر (انرژی مفید) را از نقطه نظر ماکروسکوپی ارائه می‌کند.

فصل ششم: بیان سنتی معادلات حالت و روابط تراکم پذیری عمومی را شامل می‌گردد.

فصل هفتم: مخلوطهای گازی را از نقطه نظر ماکروسکوپی مورد بررسی قرار داده است و تأکید قابل توجهی بر کاربردهای تهویه مطبوع دارد. محاسبه خواص مخلوط گازهای واقعی هم مورد بحث قرار گرفته است، اما در صورت کمبود وقت می‌توان آن را حذف کرد.

فصل هشتم: به بررسی سنتی ترمودینامیک و تعادل شیمیایی از جمله تحلیل انرژی چنین سیستمهایی پرداخته شده است.

فصل نهم: انواع جامعی از سیکلهای قدرت را با تأکید زیاد بر محدودیتهای اعمال شده بر بازده به وسیله قانون دوم مورد بحث قرار می دهد.

فصل دهم: بررسی کوتاهی است درباره ترمودینامیک سیال تراکم پذیر.

فصل یازدهم: موضوع انتقال حرارت معرفی شده است. در مورد این مطالب چند جدول جدید به ضمیمه اضافه گردیده تا خواصی نظیر قابلیت هدایت حرارتی و لزجی را که برای محاسبات انتقال حرارت از طریق جابجائی لازم است، نشان دهد.

فصل دوازدهم و سیزدهم: مقدمه ترمودینامیک آماری و کاربرد آن را در محاسبات خواص گازها و مواد جامد ارائه می دهد.

این مطالب معمولاً در دومین درس ترمودینامیک ارائه می گردد، امامی تواند در اولین درس نیز پس از ارائه مطالب قانون اول و دوم (فصول ۱ تا ۵) و روابط ماکسول (فصل ۶ بخش ۵ - ۶) گنجانده شود. در حالی که کتاب دارای مطالب متنوع قابل توجهی است، به منظور ایجاد پایه ای مناسب برای مطالعات بیشتر باید بر مطالب فصول ۱ تا ۵ تأکید بیشتری شود. این مطالب پایه ای می تواند درس را در جهت کاربردهای مناسب پیش برد.

ذکر نکاتی چند درباره پیشرفت در انتقال به سیستم SI مناسب می نماید. انتظار می رود که سریعترین حرکت در این مسیر در صنایعی نظیر صنایع فضایی، تبدیل مستقیم انرژی و نظایر آنها باشد<sup>۱</sup> که بیشتر کاربردهای ترمودینامیکی بیگانه ای را شامل می شوند. صنایع جا افتاده ای چون تولید قدرت و گرمایش و تهویه مطبوع حرکت بسیار آهسته تری دارند. در واقع بسیار مشکل است که بتوان یک مهندس با تجربه را پیدا کرد که با واحدهای SI کار کند. پس در این کتاب بحث واحدهای منظور عنوان شده است که دانشجویان را برای انجام وظایف آینده مهیا کند. موازنه انرژی و تحلیل سیکلهای قدرت در هر دو سیستم واحدهای انگلیسی و SI ارائه شده است. در قسمتهای سیال تراکم پذیر، تحلیل برگشت ناپذیری و انتقال حرارت، تأکید بیشتری بر SI شده است. کافی نیست که دانشجویان فقط در سیستم واحدهای SI تحصیل نمایند، زیرا صنعت به چنین روشی عمل نمی کند. از طرفی انصاف نیست که امتیازات محاسباتی

آشکار سیستم آحاد SI را نادیده گرفت و از قابلیت فارغ التحصیلان جدید در ترویج استفاده از این سیستم صرف نظر کرد. نکات بیشتری در این مورد در فصل ۱ ارائه شده است .

میل شخصی اینجانب این است که تغییر به سیستم SI در تمام کاربردها باید سریعاً صورت گیرد، اما این امر امکان پذیر به نظر نمی آید. برای آنهایی که علاقه مندند که درس را تنها به آحاد SI ارائه نمایند، مثالها و مسائل کافی فراهم شده است .

نویسنده به خاطر نظرات و پیشنهادات رسیده از افرادی که از سه چاپ اولیه این کتاب استفاده کرده اند بویژه بخاطر آن دسته از سؤالات مؤثر دانشجویان که کُنه مطلبی را دریافته بودند و احتیاج به توضیح و رفع ابهام داشتند، سپاسگزاری می نماید. همان طور که مطالب جدیدی اضافه گردیده و تذکراتی جهت روشن شدن آنها داده شده، امید است که مطالب جدید پاسخگوی بیشتر سؤالات دانشجویان بوده باشد و بویژه انگیزه ای برای تحقیقات بعدی گردد .

جی . پی . هولمن



## پیشگفتار مترجم

کتاب حاضر ترجمه ویرایش چهارم کتاب ترمودینامیک، تألیف پروفیسور جی. پی. هولمن است. کتاب ترمودینامیک این مؤلف مالهاست که به عنوان یکی از بهترین منابع درس ترمودینامیک، در بسیاری از دانشگاههای معتبر دنیا تدریس می شود. از ویژگیهای این کتاب می توان سادگی متن، بسط مطالب، تخصیص دو فصل کتاب به ترمودینامیک آماری و کاربرد آن و بالاخره ارائه اصول انتقال حرارت در یک فصل مجزا را نام برد. از دیگر ویژگیهای بارز کتاب حاضر استفاده مؤلف از هر دو دستگاه متداول آحاد، یعنی سیستم بین المللی آحاد (SI) و سیستم آحاد انگلیسی، است.

باید به خاطر داشت که ترمودینامیک دانشی است که تسلط بر اصول و مفاهیم و همچنین به کار بردن قوانین آن در حل مسایل مهندسی، به تمرین و ممارست فراوان نیاز دارد. این دانش را نمی توان با یک بار مطالعه کتاب ترمودینامیک و احیاناً مرور تعاریف و قوانین آن، به طور کامل درک نمود. لذا مترجم به دانشجویان قویاً توصیه می نماید که با حل مسایل آخر هر فصل، که برای تمرین پیشنهاد شده است، و نیز با پاسخ دادن به سؤالات مروری (خودآزمایی) تلاش نمایند که بر اصول و قوانین این علم تسلط کامل یابند. در اینجا بی مناسبت نیست از فیزیکدان معروف آلمانی، آرنولد سامرفلد<sup>۱</sup> (۱۸۶۸-۱۹۵۱) درباره دانش ترمودینامیک نقل قولی شود:

"ترمودینامیک مقوله مضحکی است. وقتی برای بار اول آن را می خوانید، اصلاً چیزی درک نمی کنید. در دومین مرور فکر می کنید که آن را به جز یکی دو نکته، دریافته اید! و دفعه سومی که آن را مرور می کنید، متوجه می شوید که آن را درک نکرده اید، ولی حالا آنقدر به موضوع آشنایی پیدا کرده اید که دیگر تصور در نیافتن آن شما را ناراحت نمی کند."

کار ترجمه کتاب حاضر به دوران تعطیل دانشگاهها بر می‌گردد. در آن ایام ترجمه کتاب ترمودینامیک (ویرایش دوم) به عنوان بخشی از وظایف علمی مترجم به او و یکی از همکارانش در گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد محول شده بود. متأسفانه عدم چاپ به موقع ترجمه ویرایش دوم کتاب از سوی مرکز نشر دانشگاهی و تجدید چاپ کتاب اصلی از سوی مؤلف (ویرایش سوم)، مترجمین را مجبور به ترجمه و مقابله ویرایش جدید نمود. ترجمه این ویرایش قرار بود توسط انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد چاپ شود. در همین زمان برای مترجم برنامه فرصت مطالعاتی در خارج از کشور پیش آمد و همکار او نیز برای ادامه تحصیل و اخذ درجه دکترا راهی خارج کشور شد و کار چاپ کتاب همچنان معطل ماند! و چاپ ترجمه ویرایش سوم کتاب نیز به سرنوشت ویرایش دوم گرفتار شد و سرانجام سروکله ویرایش چهارم کتاب پیدا شد که ترجمه آن را پیش رو دارید. اکنون مترجم لازم می‌داند که از همکار ارجمند خود، جناب آقای دکتر محمد خاتمی مشهدی که او را در ترجمه و مقابله ویرایشهای قبلی کتاب، یاور بوده است، صمیمانه تشکر نماید.

زحمت ویرایش علمی کتاب را همکاران محترم مترجم در دانشگاه صنعتی امیرکبیر، جناب آقای مهندس ابراهیم دامنگیر و جناب آقای دکتر مجید صفار اول، با وجود مسئولیت‌های متعدد متقبل شده‌اند. مترجم از همکاری ارزشمند و زحمات مشارالیهما تشکر فراوان دارد. زحمت اصلاح شیوه نگارش را آقای محمد دهقانی تحت نظارت جناب آقای دکتر یاحقی بر عهده داشته‌اند که از زحماتشان سپاسگزاری می‌نماید. حروفچینی و صفحه‌آرایی کتاب که توسط آقای هاشمی (نشر وحید) انجام گرفته است، از زحمات ایشان نیز سپاسگزاری می‌شود. همچنین مترجم لازم می‌داند که از برادرزاده خود خانم یاسمن مدرّس رضوی به خاطر کمک در رفع اشتباهات حروفچینی کتاب تشکر نماید.

مترجم از شورای محترم انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد به خاطر چاپ کتاب، و از مسئولین پرتلاش مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه بخصوص از کوششهای آقای سالارپور که در تمام مراحل حروفچینی، صفحه‌آرایی و چاپ کتاب با نظارت و راهنمایی‌های ارزشمند خود نهایت همکاری را داشته‌اند تشکر و قدردانی می‌نماید.

مترجم از دانش پژوهان و خوانندگان درخواست می‌نماید در صورت برخورد به لغزشهای احتمالی، مثنی بر او نهاده او را آگاه نمایند تا در چاپهای بعد به همت آنان کتاب کاملتری در اختیار مشتاقان قرار دهد. قبلاً از این مساعدت سپاس فراوان دارد.

سید محمد رضا مدرّس رضوی

مردادماه ۱۳۷۳



# فصل ۱

## مقدمه

### ۱-۱ ماهیت ترمودینامیک

انرژی جامعه را به حرکت وا می‌دارد. پیشرفتهای بی‌نظیر صنعتی و اقتصادی دنیای متمدن را می‌توان مستقیماً متأثر از افزایش میزان انرژی دسترس‌پذیر برای انجام کارهایی دانست که قبلاً توسط نیروی عضلانی بشر صورت می‌گرفت. فراوانی کالا و خدمات و بطور کلی قابلیت تولید صنعتی مستقیماً به انرژی مصرفی سرانه بستگی دارد.

ترمودینامیک عبارت از مطالعه انرژی و تبدیل آن به انواع دیگر انرژی است. این بیان کمی بلند پروازانه به نظر می‌رسد زیرا می‌تواند به این صورت تفسیر گردد که ترمودینامیک علمی است که وابستگی فراوانی به نیازهای اجتماعی دارد، چه بشر به علت افزایش انرژی مصرفی برای تولید کالا و خدمات به آن احتیاج مبرم دارد. انرژی بصورت‌های گوناگونی وجود دارد که از آن جمله است: کار اصطکاکی لغزش یک قطعه روی صفحه‌ای تخت، انرژی الکتریکی، انرژی مغناطیسی، انرژی هسته‌ای، انرژی ذخیره شده در یک کوانتم نور، انرژی شیمیایی یک سوخت نفتی و غیره. تمامی انرژی‌های مذکور در حوزه تجزیه و تحلیل ترمودینامیک قرار دارند که ما کاربردهای مختلف آنها را بتدریج بررسی خواهیم کرد. بعداً خواهیم دید که قوانین ترمودینامیک محدود بودن مقدار انرژی دسترس‌پذیر را برای انجام کارهای مفید معلوم می‌کند.

هزینه تولید انواع انرژی روز به روز افزایش می‌یابد و در همه روشهای تبدیل انرژی باید کلیه عوامل محیطی در نظر گرفته شود. بدین جهت به‌بازده استفاده از انرژی باید توجه بیشتری کرد.

ترمودینامیک پایه‌ای علمی برای بررسی روشهای تبدیل انرژی فراهم آورده است و بدین ترتیب برای مطالعهٔ راههای مختلف مصرف انرژی و اثرات اجتماعی و اقتصادی آن در آینده اهمیت دارد.

به طور کلی بحث ترمودینامیک اساساً به دو شکل انرژی، یعنی حرارت و کار، مربوط می‌شود. هدف عمدهٔ این مطالعه بسط اصول بنیادی برای تشریح این انواع انرژی و آشنائی با زبانی است که این اصول را در بر می‌گیرد. مثل سایر علوم، اولین مرحله کار عبارت از تشکیل فهرستی از تعاریف و اصطلاحاتی است که ممکن است در مطالب پیچیده‌تر مورد استفاده قرار گیرد. تعریف دقیق مفاهیم مختلف ترمودینامیک به فضا و کوشش بیشتری نیازمند است و عمدهٔ بحث این کتاب نیز به همین تعریف دقیق مفاهیم اختصاص دارد. در مقدمه سعی خواهد شد که تصویری کیفی و مختصر از موضوع وسیعی به نام ترمودینامیک جهت آشنائی برای مطالعات مفصل در فصول آینده ارائه شود. لازم به توضیح است که شمار زیادی از این بحثهای کیفی بر پایهٔ منطق فیزیکی استوار است و باید تا ارائهٔ تعاریف رستار در فصول بعدی، به همین صورت پذیرفته شود. هدف این فصل عرضهٔ يك تصویر کلی از محدودهٔ ترمودینامیک است.

## ۲-۱ رابطهٔ بین مکانیک کلاسیک و ترمودینامیک

بحث مکانیک کلاسیک شامل مفاهیم نیرو، جرم، فاصله و زمان است. نیرو يك معنی فیزیکی «فشار دادن و یا کشیدن» دارد که می‌توان آن را از نظر ریاضی بصورت برداری با يك نقطه اثر مشخص نمود. مکانیک، از طریق کاربرد قوانین حرکت نیوتن و بویژه قانون دوم آن توسعه یافته است. بر طبق قانون دوم، جمع نیروهای عمل کننده روی يك ذره متناسب با میزان تغییرات ممنتوم (مقدار حرکت) آن نسبت به زمان می‌باشد.

$$\sum F = \frac{d}{dt} (mv)$$

برای بررسی سیستمهای مکانیکی از يك جسم آزاد<sup>۱</sup> استفاده می‌شود که به وسیلهٔ آن قسمت معینی از يك مکانیزم به طور جداگانه در نظر گرفته شده و برای به کار گرفتن قانون دوم نیوتن کلیهٔ نیروهای عمل کننده روی این مکانیزم مشخص می‌شوند. باید دقت نمود که سیستم مکانیکی بر حسب

مختصات مکانی و سرعتش مشخص می‌شود. تشریح بیشتر رفتار يك سیستم مکانیکی بر حسب تأثیر متقابل آن با محیط اطرافش از طریق اثر نیروهای مختلف صورت می‌گیرد. حالت يك سیستم را می‌توان بوسیله مختصات مکانی و سرعتش و رفتار آن مشخص نمود. یعنی تغییر آن از حالتی به حالت دیگر بر حسب تأثیرات متقابل آن با مکانیزمهای مجاور و یا محیط اطرافش تشریح می‌گردد. حالت يك سیستم مکانیکی، یعنی سرعت و موقعیتش در فضا، تغییر نخواهد کرد مگر آنکه سیستم تحت تأثیر يك نیروی خارجی قرار گیرد. نکته مهم این مرور مختصر مکانیک کلاسیک، مفهوم يك سیستم (جسم آزاد) و تشخیص حالت يك سیستم با استفاده از مختصات مکان و یا سرعت است و خوانندگانی که تجربه‌ای در زمینه مکانیک کلاسیک دارند با آن آشناوند.

#### سیستم، محیط و مرز آن دو

در مکانیک با کمیتهای دینامیکی سروکار داریم، ولی در تحلیل سیستمهای ترمودینامیکی با کمیتهای انرژی مواجه هستیم. در ترمودینامیک نیز مثل مکانیک از جسم آزاد استفاده شده و يك سیستم به وسیله جدا کردن مقدار معینی از ماده تعریف می‌گردد. ماده خارج این سیستم، محیط<sup>۱</sup> و فصل مشترك سیستم و محیط را مرز یا حد<sup>۲</sup> سیستم می‌نامند. برای مثال جرم هوای فشرده در مخزنی فولادی را می‌توان به عنوان يك سیستم ترمودینامیکی در نظر گرفت. مرز این سیستم سطح داخلی مخزن و محیط اطراف آن شامل دیواره مخزن و هرچیز خارج از آن خواهد بود. باید گفت که مرز يك سیستم می‌تواند سطحی حقیقی و یا مجازی باشد. سیستم هوا - مخزن در شکل ۱ - ۱ نمایش داده شده است.

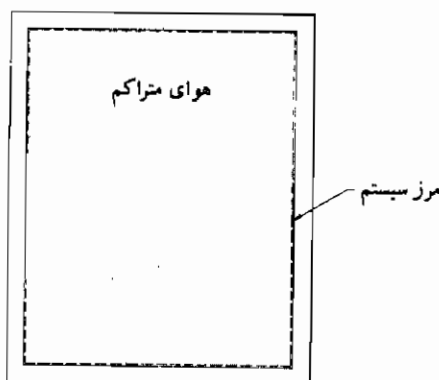
#### حالت، خواص و فرایندهای ترمودینامیکی

در مکانیک، حالت يك سیستم بوسیله مختصات مکانی و سرعت آن مشخص می‌شود. حالت يك سیستم ترمودینامیکی با مشخص کردن مختصات ترمودینامیکی آن تشریح می‌گردد. در اینجا نمی‌توانیم کلیه مختصات ترمودینامیکی را توضیح دهیم. اما به عنوان نمونه می‌توان از دما، فشار و انرژی

1- Surrounding

2- Boundary

شیمیایی نام برد. این مختصات معمولاً به عنوان خواص<sup>۱</sup> (مشخصات) سیستم بیان می‌گردند. در مکانیک اشاره کردیم که حالت سیستم تغییر نخواهد کرد مگر آنکه نسبت به محیط اطراف عکس‌العملی نشان دهد و موقعیت مکانی و یا سرعت آن تغییر کند. معمولاً این تأثیر متقابل به صورت انتقال انرژی به‌داخل و یا خارج از سیستم خواهد بود.



شکل ۱-۱ هوای متراکم در یک مخزن بعنوان یک سیستم ترمودینامیکی

تغییر یک سیستم ترمودینامیکی از حالتی به حالت دیگر را فرآیند<sup>۲</sup> می‌گویند. در مطالعه ترمودینامیک تغییر سیستم طی فرآیندهای مختلف آن مورد نظر می‌باشد. واضح است که برای تشریح فرآیندهای طی شده توسط سیستم باید حالت سیستم و یا مختصات ترمودینامیکی آن را تعریف کنیم، زیرا لازمه تشریح یک فرآیند بیان کلیه وقایعی است که در هر گام از مسیر اتفاق می‌افتد. حالت سیستم در هر نقطه فرآیند باید تشریح شود و برای انجام چنین کاری احتیاج به معرفی مفهومی اساسی بنام تعادل<sup>۳</sup> می‌باشد.

1- Properties

2- Process

3- Equilibrium

## تبادل و فرآیند شبه ساکن

هنگامی يك سیستم در حال تعادل است، که فشار، دما و چگالی آن یکسان باشد (بعداً تعریف کاملتری برای تعادل بکار گرفته می‌شود). سیستم متشکل از جرم هوای موجود در مخزن موقعی در حال تعادل است که فشار، دما و چگالی آن در همه‌جای مخزن یکسان باشد. اگر همین مخزن حرارت داده شود به‌طوریکه دمای يك انتها بالاتر از دیگری باشد، سیستم دیگر در حال تعادل نخواهد بود. موقعی که سیستمی در حال تعادل است مختصات ترمودینامیکی آن تحت روابط معینی به یکدیگر مربوط می‌باشد. لازم است که به‌اهمیت مفهوم تعادل توجه بیشتری بشود. دقت کنید که برای تعریف مختصات ترمودینامیکی يك سیستم و روابط بین آنها باید سیستم در حال تعادل باشد.

واضح است که فرآیندی مورد نظر ما است که از يك سری حالت‌های تعادل متوالی تشکیل شده باشد، زیرا در این نوع فرآیند می‌توان حالت سیستم را در هر مرحله از مسیر تعریف کرد. این نوع فرآیند را برگشت پذیر<sup>۱</sup> می‌نامیم. در فصل‌های آینده معنی این عبارت تشریح خواهد شد. به‌هرحال از نظر فیزیکی این نوع فرآیند به‌صورت يك سلسله حالت‌های تعادل متوالی توصیف گردیده است و گاهی نیز آنرا فرآیند شبه ساکن<sup>۲</sup> می‌نامند زیرا از يك سلسله حالت‌های تعادل تقریباً ساکن تشکیل شده است.

پاراگراف‌های قبل روش‌های بررسی مکانیکی و ترمودینامیکی را به یکدیگر ربط داده‌اند؛ بویژه آشکار شد که سیستم ترمودینامیکی و جسم آزاد هر دو روش‌های تحلیل مشابهی می‌باشند. شباهت در این است که در هر دو آنها مطالعه روی عکس‌العمل داخلی مقدار معینی ماده جدا شده از جسم با محیط انجام می‌گیرد. اختلاف مهمی که وجود دارد این است که در جسم آزاد مورد استفاده در مکانیک همیشه مطالعه نیروهای عمل‌کننده روی آن قسمت جدا شده از جسم به‌نام جسم آزاد مورد توجه است، در حالی که در تحلیل يك سیستم ترمودینامیکی تأثیر متقابل نیروها بر روی سیستم و محیط اطراف آن مورد نظر بوده و تأکید روی کمیت‌های انرژی می‌باشد. در این مبادله دو نوع انرژی بصورت کار و حرارت وجود دارد که ممکن است وارد سیستم شده و یا از آن خارج گردد. بعداً خواهیم دید که شکل‌های دیگری از انرژی در سیستم وجود دارد که باید در نظر گرفته شود.

1- Reversible

2- Quasistatic

### ۳-۱ دما، حرارت و قانون صفرم ترمودینامیک

کلمات دما و حرارت معمولاً با این استنباط که معانی آنها برای خواننده قابل فهم است مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما عکس این هم ممکن است زیرا یکی از اهداف مطالعه ترمودینامیک همین درک دقیق دما و حرارت می‌باشد. آشکار است که از نظر فیزیکی دما مشخص‌کننده «گرمی و یا سردی» یک جسم است. مثلاً با دست زدن به یک قطعه فلز در  $120^{\circ}\text{F}$  در می‌یابیم که از یک قطعه یخ گرم‌تر است. این از آن روست که قطعه فلز به دست انرژی می‌دهد و قطعه یخ از دست انرژی می‌گیرد. دقت کنید که این مفهوم از دما بر اساس یک فرآیند انتقال انرژی استوار است و می‌توان آن را به صورت مبادله حرارت بیان نمود. بنابر این می‌توان نتیجه گرفت که اگر دو جسم با دمای یکسان در تماس با یکدیگر قرار گیرند هیچ‌گونه انتقال انرژی بین آنها صورت نخواهد گرفت. این مسأله به تعریف «تساوی دما» بین دو جسم کمک می‌کند اما نمی‌تواند مقیاس مطلق برای دما باشد. تشکیل مقیاس مطلق دما تنها از طریق قانون دوم ترمودینامیک امکان‌پذیر است که در فصلهای آینده درباره آن بحث خواهد شد. مفهوم تساوی دما را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

دو جسم که هریک با جسم سومی تعادل حرارتی دارند با یکدیگر در تعادل حرارتی می‌باشند.

این تعریف را قانون صفرم ترمودینامیک<sup>۱</sup> می‌نامند. لازم به تذکر است که دو جسم موقعی در تعادل کامل با یکدیگرند که علاوه بر دما فشارهای آنها نیز یکسان باشد بگونه‌ای که در اثر تماس با یکدیگر هیچ‌گونه تغییر شیمیائی در آنها صورت نگیرد.

تا آنجا که به مشاهدات روزانه مربوط می‌شود معمولاً برای تعیین دمای یک سیستم از تأثیر آن بر روی خاصیت ویژه‌ای از یک وسیله اندازه‌گیری که بسادگی قابل رؤیت باشد، استفاده می‌شود. مثلاً یک دماسنج جیوه‌ای میزان دما را به وسیله انبساط نسبی جیوه و شیشه تعیین می‌کند، در دماسنج مقاومت الکتریکی، مشخص‌کننده میزان دما، مقاومت الکتریکی یک فلز مخصوص (معمولاً پلاتین) است و بالاخره ترموکوپل دما را به وسیله نیروی محرکه الکتریکی تولید شده در محل اتصال دو فلز غیر یکسان تشخیص می‌دهد. در تمام این موارد دما، که یک خاصیت ترمودینامیکی است، بر حسب سایر خواص یک ماده فلزی یا مایع بیان شده است.

از این بحث کوتاه می‌توان نتیجه گرفت که حرارت شکلی از انرژی است که در اثر اختلاف دما از جسمی به جسم دیگر جریان پیدا می‌کند. به تعاریف تسلسل وار زیر توجه کنید: تساوی دما مربوط به شرایطی است که هیچ‌گونه جریان حرارتی وجود ندارد - حرارت به اختلاف دما مربوط است. این موضوع را بعداً روشن خواهیم کرد.

#### ۴-۱ مقیاسهای دما

معمولاً برای اندازه‌گیری دما از دو مقیاس فارنهایت<sup>۱</sup> و سلسیوس<sup>۲</sup> (سانتیگراد) استفاده می‌شود. این مقیاسها بر اساس تقسیم فاصله بین نقطه انجماد و نقطه جوش آب در فشار اتمسفر استاندارد به تعداد فواصل مساوی تنظیم شده است. در مقیاس سلسیوس فاصله بین این دو نقطه ۱۰۰ قسمت و در مقیاس فارنهایت به ۱۸۰ قسمت تقسیم شده است. انتخاب نقطه صفر در دو مقیاس اختیاری است. بعداً نشان داده خواهد شد که به کمک قانون دوم ترمودینامیک می‌توان یک مقیاس مطلق ترمودینامیکی که فقط مقادیر مثبت دارد، برای دما تعریف کرد. مقیاس مطلق درجه سلسیوس را مقیاس کلوین<sup>۳</sup> و مقیاس مطلق درجه فارنهایت را مقیاس رانکین<sup>۴</sup> می‌نامند. در هر دو مقیاس مطلق نقاط صفر معرف یک حالت فیزیکی یکسان و نسبت دو کمیت دما صرف نظر از مقیاس به کار برده برابر است، به عبارت دیگر:

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{\text{Rankine}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{\text{Kelvin}} \quad (1-1)$$

نقطه جوش آب را بدین‌خواه در مقیاس سلسیوس ۱۰۰° و در مقیاس فارنهایت ۲۱۲° انتخاب کرده‌اند. رابطه بین مقیاسها در شکل ۱-۲ نشان داده شده و واضح است که روابط زیر را می‌توان به کار برد:

- 
- 1- Fahrenheit
  - 2- Celsius = Centigrade
  - 3- Kelvin
  - 4- Rankine

$$^{\circ}\text{F} = 32.0 + \frac{9}{5} ^{\circ}\text{C} \quad (1-2)$$

$$^{\circ}\text{R} = \frac{9}{5} \text{K}$$

$$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459.67$$

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15 \quad (1-3)$$

K	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$	$^{\circ}\text{R}$
2273.15	2000	3632	4091.67
1773.15	1500	2732	3191.67
1273.15	1000	1832	2291.67
773.15	500	932	1391.67
673.15	400	752	1211.67
573.15	300	572	1031.67
473.15	200	392	851.67
373.15	100	212.0	671.67
273.15	0	32.0	491.67
233.15	-40	-40	419.67
173.15	-100	-148	311.67

شکل ۱-۲ رابطه بین مقیاسهای دمای فارنهایت و سلسیوس

برای اندازه‌گیری دما احتیاج به تنظیم استانداردهایی است که ممکن است در مدرج کردن دماسنجهای مختلف بکار رود. از جمله این "استانداردها" نقاط انجماد و جوش آب است، اما مطمئناً این دو تمام محدوده دماهای مورد نظر در اندازه‌گیریهای آزمایشی را شامل نمی‌شود. تفاهم بین المللی



۱۹۶۸ مقیاس دما<sup>۱</sup> [5] به تشکیل نقاط استاندارد در محدوده وسیعی از دماها کمک کرد. اولین و دومین نقطه ثابت برای این مقیاس در جدولهای ۱-۱ و ۱-۲ نشان داده شده است. تفاهم بین المللی دما علاوه بر این نقاط ثابت، روشهای دقیقی نیز برای درون یابی بین این مقادیر ارائه می دهد.

توجه کنید که هنوز تعریف دقیقی از دما ارائه نکرده ایم. برای یک تعریف تحلیلی و پذیرفتنی احتیاج به بحث کامل درباره قانون دوم ترمودینامیک داریم، در صورتی که قبلاً توضیح داده شد که در اندازه گیریهای آزمایشی دما، فقط یک سلسله نقاط استاندارد مورد نیاز است. روشهای مفصلی برای اندازه گیری دما در مآخذ شماره [2] تشریح شده است. اندازه گیریهای دقیق دما احتیاج به تجربه فراوان آزمایشگاهی دارد و هر از چندی روشهای نوینی نیز ارائه می گردد.

جدول ۱-۱ نقاط اولیه برای تفاهم بین المللی دما در سال ۱۹۶۸

دمـا		نقطه
°F	°C	فشار معمولی = $101325 \text{ Pa} = 14.6959 \text{ psia}$
-۴۳۴ / ۸۱	-۲۵۹ / ۳۴	نقطه تعادل سه گانه هیدروژن
-۴۲۸ / ۹۹	-۲۵۶ / ۱۰۸	نقطه جوش هیدروژن تعادلی در $\frac{25}{76}$ فشار معمولی
-۴۲۳ / ۱۷	-۲۵۲ / ۸۷	نقطه جوش معمولی (1 atm) هیدروژن تعادلی
-۴۱۰ / ۸۹	-۲۴۶ / ۰۴۸	نقطه جوش معمولی نئون
-۳۶۱ / ۸۲	-۲۱۸ / ۷۸۹	نقطه سه گانه اکسیژن
-۲۹۷ / ۳۳	-۱۸۲ / ۹۶۲	نقطه جوش معمولی اکسیژن
۳۲ / ۰۱۸	۰ / ۰۱	نقطه سه گانه آب
۲۱۲	۱۰۰	نقطه جوش معمولی آب
۷۸۷ / ۲۴	۴۱۹ / ۵۸	نقطه انجماد معمولی روی
۱۷۶۳ / ۴۷	۹۶۱ / ۹۳	نقطه انجماد معمولی نقره
۱۹۴۷ / ۹۷	۱۰۶۴ / ۴۳	نقطه انجماد معمولی طلا

منبع: باربر [5].

#### 1- The International Practical Temperature Scale of 1968

۲- اعداد داخل کروشه مربوط به منابع موجود در انتهای هر فصل می باشد.

جدول ۱-۲ دومین نقاط ثابت برای تفاهم بین المللی دما در سال ۱۹۶۸

نقطه	دما، °C
نقطه سه گانه، $H_2$ معمولی	-۲۵۹ / ۱۹۴
نقطه جوش، $H_2$ معمولی	-۲۵۲ / ۷۵۳
نقطه سه گانه، Ne	-۲۴۸ / ۵۹۵
نقطه سه گانه، $N_2$	-۲۱۰ / ۰۰۲
نقطه جوش، $N_2$	-۱۹۵ / ۸۰۲
نقطه تصعید، $CO_2$ (معمولی)	-۷۸ / ۴۷۶
نقطه انجماد، Hg	-۳۸ / ۸۶۲
نقطه یخ	
نقطه سه گانه، فنوکسی بنزن	۲۶ / ۸۷
نقطه سه گانه، اسید بنزوئیک	۱۲۲ / ۳۷
نقطه انجماد، In	۱۵۶ / ۶۳۴
نقطه انجماد، Bi	۲۷۱ / ۴۴۲
نقطه انجماد، Cd	۳۲۱ / ۱۰۸
نقطه انجماد، Pb	۳۲۷ / ۵۰۲
نقطه جوش، Hg	۳۵۶ / ۶۶
نقطه جوش، S	۴۴۴ / ۶۷۴
نقطه انجماد، Cu-Al زودگذار (اتوکتیک)	۵۴۸ / ۲۳
نقطه انجماد، Sb	۶۳۰ / ۷۴
نقطه انجماد، Al	۶۶۰ / ۷۴
نقطه انجماد، Cu	۱۰۸۴ / ۵
نقطه انجماد، Ni	۱۴۵۵
نقطه انجماد، Co	۱۴۹۴
نقطه انجماد، Pd	۱۵۵۴
نقطه انجماد، Pt	۱۷۷۲
نقطه انجماد، Rh	۱۹۶۳
نقطه انجماد، Ir	۲۴۴۷
نقطه انجماد، W	۳۳۸۷

## ۵-۱ اصل حالت

با توجه به بحث کوتاه گذشته بسادگی دیده می‌شود که بعضی از خواص معین ماده از طریق توابعی به یکدیگر مربوط است: انبساط حرارتی به دما بستگی دارد، فشار یک گاز به دما و حجم مربوط است و... قبلاً تذکر داده شد که تأکید اصلی روی حالت‌های تعادل است زیرا تنها در این حالات می‌توانیم خواص یک سیستم را تعریف کنیم. اولین مسأله عبارت است از تعریف حالت سیستم، و سؤالی که فوراً مطرح می‌گردد این است که برای این تعریف چند خاصیت (یا مختصات ترمودینامیکی) لازم خواهد بود. مجدداً بهتر است که ماهیت این مسأله را با استفاده از تجربیات مکانیک نشان داد. برای حرکت در سطح، تنها دو مختصات و در حرکت فضائی سه مختصات برای مشخص نمودن موقعیت یک ذره لازم است (در اینجا ذره مورد نظر همان سیستم است). پس از مشخص کردن موقعیت ذره در مختصات کارترین، هیچ گونه اطلاعات بیشتری برای دانستن موقعیت آن لازم نیست. به عبارت دیگر دادن مختصات اضافی، اطلاعات بیشتری درباره موقعیت ذره به دست نمی‌دهد. برای مثال می‌توان موقعیت ذره را در مختصات کارترین و همچنین در مختصات استوانه‌ای و کره‌ای مشخص نمود، ولی این مختصات اضافی حاوی هیچ گونه اطلاعات جدیدی نیست. در این مورد حالت یا موقعیت ذره کاملاً به وسیله مختصات کارترین مشخص شده است و همان طور که می‌دانیم مختصات و یا خواص دیگر توسط توابعی با مختصات کارترین مربوط است. البته باید توجه داشت که برای تعیین کامل حالت دینامیکی ذره علاوه بر مختصات مکانی، مختصات سرعت نیز مورد نیاز است.

در سیستم‌های ترمودینامیکی انتظار می‌رود که بعضی خواص معین اولیه را که برای تعریف حالت یک سیستم لازم است در اختیار داشته باشیم. حال آنکه سایر خواص سیستم از طریق توابعی با این متغیرهای اولیه حالت، در ارتباط است. اگرچه تحلیل سیستمی که فقط از یک ذره تشکیل شده برای تشخیص مختصات موقعیت آن بسیار ساده است، ولی برای ساده ترین سیستم ترمودینامیکی نیز باید فکر بیشتری کرد. مسأله ما عبارت است از یافتن آن دسته خواص ترمودینامیکی که برای تعریف حالت سیستم لازم است، که آنها را خواص اولیه می‌نامند. سایر خواص ترمودینامیکی از طریق توابعی به این خواص اولیه مربوط می‌گردد. نظیر مکانیک، در تحلیل‌های ریاضی خواص اولیه به عنوان متغیرهای مستقل و سایر خواص به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته می‌شود. بطور کلی تعداد متغیرهای اولیه برای هر سیستم ترمودینامیکی را فقط از طریق آزمایش و تجربه می‌توان مشخص نمود. برای نمونه در مورد یک

گاز ایده آل فقط دو خاصیت برای مشخص کردن حالت سیستم لازم است. دو خاصیت مذکور ممکن است هر جفتی از خواص فشار، حجم و یا دما باشد.

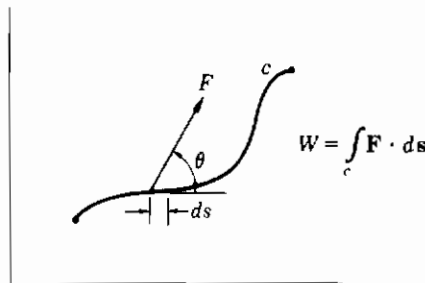
اصل حالت در واقع شامل این قضیه تجربی است که خواص ماده از طریق توابعی به یکدیگر مربوط می‌شوند، و مفاهیم خواص اولیه و خواص وابسته ماده را نتیجه می‌دهد. دقت کنید که «اصل» موضوعی است که آن را بدون اثبات می‌پذیریم، به عبارت دیگر اصل بر اساس تعداد زیادی از مشاهدات تجربی استوار بوده و هیچ استدلال دیگری برای آن وجود ندارد. در آینده ما مطالب بیشتری برای تشخیص حالت یک سیستم خواهیم گفت، اگرچه واضح است که متغیرهایی نظیر ترکیب شیمیایی و تعداد اجزاء موجود در سیستم می‌تواند تأثیر بسیار زیادی در این خصوص داشته باشد. در حال حاضر خواننده باید اصل حالت را به عنوان تعریفی برای معنی و مفهوم خواص اولیه و خواص وابسته یک سیستم در نظر بگیرد. در فصل سوم تعریف دقیقتری درباره این اصل ارائه خواهیم کرد.

## ۶-۱ کار

کار به صورت انرژی صرف شده به وسیله نیرویی که در یک مسیر معین جا به جا می‌شود تعریف شده و از نظر ریاضی بیان آن چنین است:

$$W = \int_C \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} \quad (۱-۴)$$

که انتگرال خطی همان‌طور که در شکل ۳-۱ نشان داده شده بیان‌کننده این مطلب است که فقط حاصل ضرب نیرو و تغییر مکان در جهت نیرو را در نظر گرفته‌ایم. برای محاسبه کار فقط نیاز به مشخص کردن نیرو و حرکت آن داریم. اگر این معلومات در دست باشد هیچ‌گونه احتیاجی به خواص حرارتی سیستم نخواهد بود. ممکن است سؤال شود پس چرا کار در مطالعه ترمودینامیک باید مورد نظر قرار گیرد. جواب این است که کار یک کمیت انرژی بوده که خود در حوزه تحلیل ترمودینامیک است. بعداً خواهیم دید که چگونه کار و انرژی به یکدیگر مربوط می‌شود.



شکل ۱-۳ کار به صورت یک انتگرال خطی یا تابع مسیری بیان شده است.

## ۷-۱ ترمودینامیک میکروسکوپی و ماکروسکوپی

سیستمهای ترمودینامیکی مورد بحث تا اینجا از کمیت‌های ماده با اندازه‌ای مشخص، نظیر هوای متراکم در مخزن فولادی، یا یک قطعه گرم فلزی تشکیل شده است که هر دو این سیستمها تحت عنوان موضوعی به نام ترمودینامیک ماکروسکوپی<sup>۱</sup> قرار می‌گیرد. در تحلیل چنین سیستم‌هایی فقط خواص و ماهیت توده جسم مورد نظر بوده و از ساختمان دقیق اتمی و ملکولی ماده صرف نظر می‌شود. این نوع تحلیل را گاهی اوقات ترمودینامیک کلاسیک می‌نامند.

وقتی که رفتار دقیق اتمی و ملکولی ماده مورد نظر باشد، تحلیل را ترمودینامیک میکروسکوپی<sup>۲</sup> می‌نامند. ترمودینامیک میکروسکوپی بطور قابل ملاحظه‌ای پیچیده تر از ترمودینامیک کلاسیک است. بررسی ترمودینامیک میکروسکوپی می‌تواند ابتدا به وسیله بررسی رفتار مولکولهای گازی بر اساس مکانیک کلاسیک صورت گیرد. این روش بررسی را تئوری جنبشی<sup>۳</sup> می‌نامند. در این روش قوانین مکانیک به عنوان قضایای بدیهی پذیرفته و نشان داده شده است که بعضی از پدیده‌های ویژه ترمودینامیک ماکروسکوپی را با روش تحلیل دقیق میکروسکوپی نیز می‌توان دنبال کرد. کاملاً مشخص شده است که هنگام کاربرد قوانین مکانیک کلاسیک در مقیاسهای اتمی ماده باید

1- Macroscopic thermodynamics

2- Microscopic thermodynamics

3- Kinetic theory

تئوری کوانتم را نیز به آن اضافه کنیم. تعداد ذراتی که در یک تحلیل میکروسکوپی در نظر گرفته می‌شود خیلی زیاد است (از مرتبه  $10^{20}$  ذره بر سانتیمتر مکعب). بنابر این انتظار می‌رود که کاربرد شیوه‌های آماری - برای تشریح محتمل‌ترین نوع توزیع ذرات در بین حالات مشخص انرژی و ممتنم - موفقیت آمیز باشد. وقتی که روشهای آماری توأم با محدودیتهای اعمال شده بوسیله تئوری کوانتم به کار گرفته شود، روش عمومی تحلیل را مکانیک آماری یا ترمودینامیک آماری می‌نامند.

ترمودینامیک میکروسکوپی دارای دو هدف زیر است:

- ۱- نشان دادن چگونگی توزیع انرژی در سطوح اتمی و ملکولی و محاسبه خواص انرژی ماکروسکوپی از روی این توزیع.
- ۲- نشان دادن چگونگی امکان به کار گرفتن معلومات مربوط به توزیع انرژی در سطح میکروسکوپی برای محاسبه شدت انتقال کمیت‌های نظیر انرژی، ممتنم، و یا جرم که در کاربردهای گوناگون مهندسی دارای اهمیت زیادی است.

برای بهتر نشان دادن ماهیت اختلاف بین تحلیلهای ترمودینامیک ماکروسکوپی کلاسیک و ماهیت میکروسکوپی ماده، به عنوان نمونه حجمی از یک گاز - مثلاً یک لیتر - را در دما و فشار اطاق در نظر بگیرید. می‌دانیم که این حجم حدوداً شامل  $10^{23}$  ملکول است که بدون ترتیب در تمام جهات در حرکت بوده و با یکدیگر و جداره ظرف برخورد می‌کنند. فرض کنید که این ملکولها در فرآیندهای برخوردشان نظیر گلوله‌هایی کاملاً الاستیک رفتار کنند. اگر می‌توانستیم برای تعیین حرکات این ذرات در فضا دینامیک نیوتنی را به کار ببریم، لازم بود که قانون دوم حرکت نیوتن را برای هر ذره بنویسیم.

$$\sum F = \frac{d}{dt} (mv)$$

برای تعیین سرعت ذرات مختلف باید که تمام معادلات بدست آمده به طور همزمان حل شود که خود، کار بسیار بزرگی است. حل چنین سیستم معادلاتی حتی بوسیله بزرگترین کامپیوترها ممکن نیست. اگر ما میدان‌های نیروی بین ملکولی و انرژی پیمانه‌ای شده<sup>۱</sup> ذرات را نیز در نظر بگیریم، حل این مسأله بسیار مشکل‌تر خواهد شد. ممکن است سؤال شود پس چرا گفته‌ایم بعضی از تحلیلهای ترمودینامیک بر پایه

بررسی میکروسکوپی (یعنی در نظر گرفتن رفتار دقیق ملکولی) انجام می‌شود؟ جواب بسیار ساده است: ما به جای حلّ این معادلات بی‌شمار، به روشهای دیگری برای استنباط رفتار ملکولی تکیه می‌کنیم که این روشها در ماهیت آماری هستند.

## ۸-۱ خواص ترمودینامیکی

### خواص متمرکز و گسترده ترمودینامیکی

خاصیت ترمودینامیکی ممکن است به صورت هر مشخصه قابل رؤیت يك سیستم تعریف شود. خواص ترمودینامیکی به دو دسته کلی متمرکز<sup>۱</sup> و گسترده<sup>۲</sup> تقسیم می‌شود. خواص متمرکز از مقدار جرم سیستم مستقل است در حالی که مقدار خواص گسترده به طور مستقیم با جرم سیستم متناسب است. بدین ترتیب حجم کل يك سیستم يك خاصیت گسترده است ولی حجم مخصوص (حجم بر واحد جرم) يك خاصیت متمرکز خواهد بود. دما و فشار مثالهای دیگری از خواص متمرکز است. به طور کلی وقتی يك خاصیت گسترده بر جرم سیستم تقسیم شود به يك خاصیت متمرکز تبدیل می‌شود.

### فازها و اجزا

يك سیستم ترمودینامیکی ممکن است شامل بیش از يك فاز باشد، مثلاً آب به صورت مخلوط مایع و بخار، دارای دو فاز مایع و بخار است. مخلوطی از هوا، قطرات آب مایع، و ذرات یخ دارای سه فاز خواهد بود. همچنین يك سیستم ترمودینامیکی ممکن است شامل بیش از يك جزء باشد. مخلوط آب و بخار آب فقط يك جزئی است در صورتی که مخلوط هوا - آب - یخ شامل دو جزء آب و هواست. به تفاوت بین فاز و جزء دقت کنید. مخلوطی از نیتروژن و دی اکسید کربن در فشار و دمای آتمسفر شامل دو جزء ولی فقط يك فاز (فاز گازی) است. اگر اجزاء و فازها به طور یکسان در تمام حجم سیستم توزیع شده باشد، سیستم *راهمگن*<sup>۳</sup> می‌نامند. اگر این توزیع یکسان نباشد سیستم را *ناهمگن*<sup>۴</sup> می‌گویند.

1- Intensive properties

2- Extensive properties

3- Homogeneous

4- Heterogeneous

مخلوط آب و بخار آب در صورتی که آب در آن به شکل قطرات بسیار ریز مایع بوده و به طور یکسان در تمام حجم سیستم توزیع شده باشد، همگن است. اما اگر مایع در پایین ظرف جمع شده و بخار در بالای آن باشد، مخلوط ناهمگن می باشد. مخلوط نیتروژن و دی اکسید کربن مثال دیگری از یک سیستم همگن است.

واضح است که خواص ترمودینامیکی یک سیستم به تعداد فازها و اجزای آن و همگن بودن یا نبودن سیستم بستگی دارد.

## ۹-۱ قوانین اساسی ترمودینامیک

در اینجا ممکن است که حداقل برای به دست آوردن یک تصویر کلی از موضوع، اصول اساسی ترمودینامیک را بدون توضیح مفصل بیان کنیم. این اصول به عنوان قضایای بدیهی پذیرفته شده است زیرا نظیر قوانین اساسی فیزیک بیان کننده تعداد زیادی از مشاهدات تجربی ماست. قانون اول ترمودینامیک می گوید که:

انرژی یک سیستم منزوی<sup>۱</sup> ثابت می ماند

قانون اول همان اصل بقای انرژی است که حتی برای یک مهندس مبتدی نیز آشناست. سیستم منزوی سیستمی است که با محیط اطرافش انرژی مبادله نمی کند. توجه کنید که این قانون به عنوان اصلی بدیهی پذیرفته شده است، زیرا بیان کننده انواع زیادی از مشاهدات تجربی در علوم فیزیکی است.

قانون دوم ترمودینامیک چندین مشاهده تجربی معادل را به عنوان قواعد کلی یا بدیهی می پذیرد که تعدادی از آنها در زیر آمده است:

۱ - حرارت در غیاب سایر اثرات، از دمای بالا به دمای پایین جریان پیدا می کند. یعنی این که درجه حرارت جسمی داغ در اثر تماس با جسمی با دمای کمتر کاهش می یابد ولی عکس آن عملی نیست.



۲ - وقتی دو گاز در محفظه‌ای منزوی قرار گیرند، به طور یکسان مخلوط می‌شوند اما جدا شدن آنها به خودی خود ممکن نیست.

۳ - یک باطری توسط مقاومتی که مقدار معینی انرژی آزاد می‌کند خالی می‌گردد، اما عکس آن عملی نخواهد بود، یعنی این که ممکن نیست با افزایش انرژی به مقاومت مذکور از طریق گرم کردن، باطری خود به خود شارژ شود.

۴ - ساختن وسیله و یا ماشینی که به طور پیوسته کار کند و حرارت را از یک منبع منفرد دریافت کند و به همان مقدار کار تولید نماید امکان پذیر نیست.

می‌بینیم که قانون دوم ترمودینامیک به جهت تبدیل و یا انتقال انرژی مربوط می‌شود؛ به عبارتی هر انتقالی امکان پذیر نیست. تمام پدیده‌های فوق الذکر نتایج قانون دومند اگر چه بیشترین پدیده‌های مورد استفاده بیان ۱ و ۴ می‌باشد. دقت کنید که عبارت ۴ بیان کننده این مطلب است که نمی‌توان موتوری (یا سیکلی) ساخت که بازده آن در تبدیل حرارت از یک منبع منفرد به انرژی مکانیکی صدم درصد باشد<sup>۱</sup>.

قانون سوم ترمودینامیک درباره خواص مواد در دمای صفر مطلق است و باید بعد از تجزیه و تحلیل قوانین اول و دوم بسط داده شود.

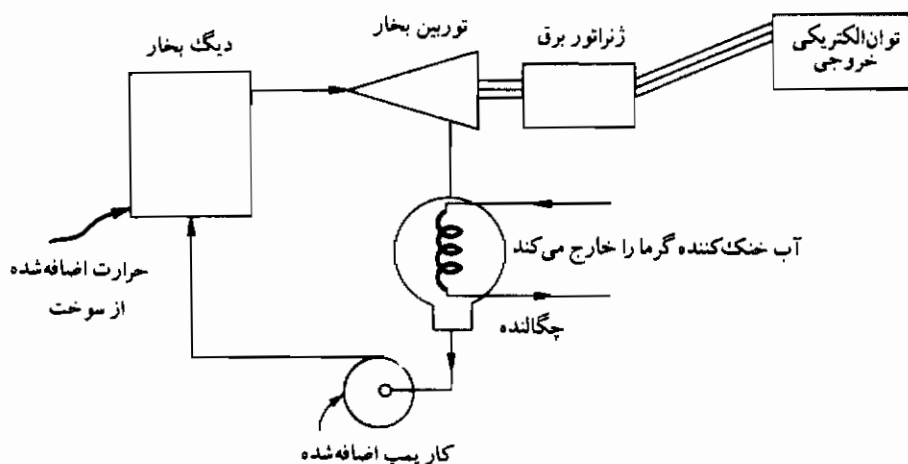
## ۱-۱۰ کاربردهای ترمودینامیک

چون ترمودینامیک مطالعه انرژی و تبدیل آن است لذا بیشترین کاربردهای آن در برگیرنده فرآیندهای تبدیل انرژی سودمند خواهد بود. نیروگاه بخار مثال جالبی است که در شکل ۱-۴ نمایش داده شده است. آب پرفشار وارد دیگ بخار شده و با افزودن حرارت به آن، بخار با فشار و دمای بالا تولید می‌گردد. انرژی حرارتی لازم از تبدیل انرژی شیمیایی یک سوخت فسیلی (گاز طبیعی، نفت، ذغال سنگ) در یک فرآیند احتراق و یا انرژی حرارتی آزاد شده از یک واکنش هسته‌ای تأمین می‌شود. سپس بخار به توربینی هدایت می‌شود که مولد الکتریکی را به حرکت در می‌آورد. در طی این فرآیند

۱- یک بیان مختصر و مفید که بیشتر دانشجویان به آن استناد می‌کنند عبارت است از: قانون اول می‌گوید شما

نمی‌توانید چیزی از هیچ بگیرید. قانون دوم می‌گوید شما نمی‌توانید حتی جلوگیری از اتلاف ننمایید.

جریانی در توربین، انرژی بخار گرفته شده و در نتیجه بخار توربین را در فشار و دمای خیلی کمتری ترك می‌کند. سپس بخار خروجی از توربین وارد دستگاه بزرگی می‌شود که لوله‌های آب سرد از آن می‌گذرد. بخار بر روی سطح خارجی لوله‌ها تقطیر شده و در پائین دستگاه جمع آوری می‌شود که از آن‌جا از طریق پمپ با فشار بالا به دیگ بخار بر می‌گردد.



شکل ۴-۱ طرحواره یک نیروگاه بخار

در نیروگاه بخار اجزاء مشخصه یک سیکل قدرت یا موتور حرارتی دیده می‌شود:

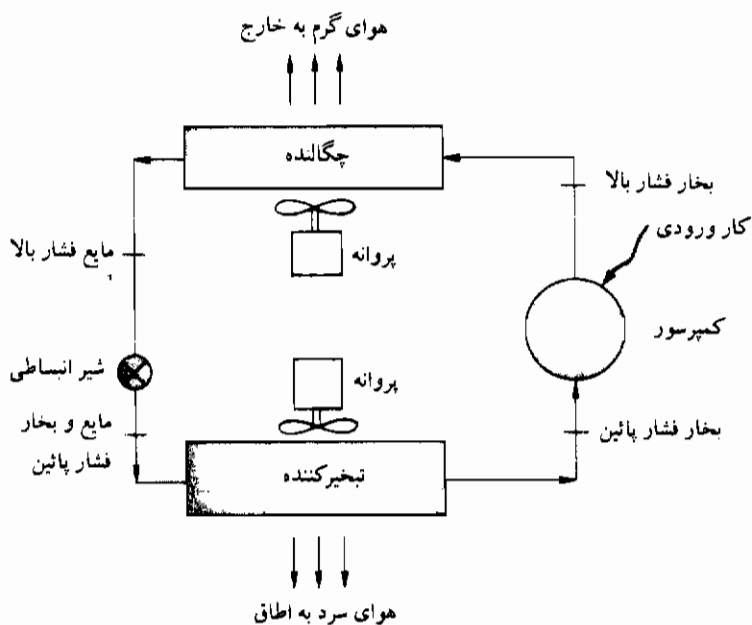
- ۱ - افزودن حرارت در دمای بالا (دیگ بخار)
- ۲ - دفع حرارت در دمای پائین (چگالنده یا کندانسور)
- ۳ - کار مفید خروجی (کار تولیدی توربین منهای کار داده شده به پمپ)

بازده حرارتی یک موتور حرارتی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{بازده حرارتی} = \frac{\text{کار مفید خروجی}}{\text{حرارت افزوده شده در دمای بالا}} \quad (۱-۵)$$

این بازده از نظر اقتصادی اهمیت خاصی دارد زیرا حرارت افزوده شده در دمای بالا نمایانگر انرژی صرف شده یا خریداری شده (سوخت، اورانیوم و غیره) می‌باشد. و کار مفید خروجی نشان دهنده اثر مفید گرفته شده از این انرژی مصرفی است. بازده نیروگاههای بزرگ بخار ممکن است به حدود ۴۰ درصد هم برسد.

در شکل ۱-۵ طرحواره یک سیستم تهویه مطبوع نمونه جهت استفاده در منازل نمایش داده شده است. در این سیستم یک سیال (معمولاً فریون) در فشار و دمای پائین وارد لوله‌های پره‌دار تبخیر کننده (اوپراتور) می‌شود. هوای اتاق بر روی لوله‌های تبخیر کننده وزیده شده و در نتیجه انتقال انرژی



شکل ۱-۵ طرحواره سیستم تهویه مطبوع یا تبرید

به فریون باعث تبخیر (یا جوشش) فریون گردیده که به صورت بخار یا گاز از تبخیر کننده خارج می‌شود. بخار فریون پس از تراکم تا فشار و دمای زیاد در کمپرسور، از دستگاه دیگری با تعدادی لوله‌های پره‌دار عبور می‌کند و جریان هوای خارج از روی لوله‌ها حرارت کافی از فریون جذب نموده و باعث تقطیر آن

در فشار بالا می‌گردد. دمای جوش یا تقطیر يك مایع بستگی به فشار آن دارد، هرچه فشار پائین تر باشد، دمای تبخیر آن هم کمتر است. مرحله بعدی در این سیکل عبور مایع تحت فشار بالا از يك شیر انبساطی است که باعث کاهش فشار شده و در نتیجه دمای ورود به تبخیر کننده هم پائین می‌آید.

هدف تبدیل انرژی در دستگاه تهویه مطبوع یا سیکل تبرید کاملاً متفاوت از نیروگاه بخار است. در سیکل قدرت هدف تولید کار از انرژی حرارت مصرفی می‌باشد در حالی که در سیکل تبرید هدف اثر سرمایش هوای اطاق از طریق انرژی خریداری شده یا کار مصرفی در کمپرسور است. بنابراین هدف خود را در این سیکل با ضریب عملکرد<sup>۱</sup> اندازه می‌گیریم:

$$(۱-۶) \quad \text{COP} = \frac{\text{اثر تبرید}}{\text{کار مصرفی}}$$

ضریب عملکرد دستگاههای تبرید ممکن است در حدود ۳ باشد. بعضی اوقات سیکل تبرید را پمپ حرارتی هم می‌نامند زیرا این سیکل حرارت را در دمای پائین اطاق گرفته و به دمای بالای محیط خارج پمپ می‌کند.

وسایل تبدیل انرژی گوناگون است (پیل‌های سوختی، مولدهای ترمو الکتریک، موتورهای احتراق داخلی) که بررسی آنها با قوانین ترمودینامیک صورت می‌گیرد و این کاربردها را پس از بسط اصول پایه، مورد بحث قرار خواهیم داد. در حال حاضر، منظور جلب توجه خواننده به وجود چنین کاربردها و ایجاد انگیزه جهت مطالعه دقیق روشهای تجزیه و تحلیلی است که در فصول بعدی به کار گرفته می‌شود.

## ۱-۱۱ سیستمهای آحاد

علیرغم تلاشهای فراوان در جوامع علمی و مهندسی جهت استاندارد نمودن آحاد در يك سیستم بین المللی، هنوز چندین سیستم عملاً مورد استفاده قرار می‌گیرد. به خاطر سادگی و مقبولیت سیستم بین المللی، تأکید ما بر روی این سیستم خواهد بود. اگرچه باید این حقیقت را هم در نظر گرفت که خواننده این کتاب با سایر سیستمهای آحاد هم روبرو خواهد شد. بنابراین شایسته نیست که از توضیح

سایر سیستمها که استفاده وسیعی هم دارند و همچنین ضرایب تبدیل مناسب جهت به دست آوردن جوابهای صحیح در محاسبات فنی صرف نظر بشود. مشکلات عمده در آحاد مکانیکی و حرارتی ایجاد می شود زیرا آحاد الکتریکی مدتهاست که استاندارد شده است. بالاخره سیستم آحاد SI (سیستم بین المللی آحاد) متداول خواهد گردید و لذا در مواقع مناسب به استفاده از این سیستم آحاد نیز توجه بیشتری خواهیم کرد.

منظور از سیستم آحاد عبارت است از دادن مقادیر عددی مشخص به پدیده های فیزیکی قابل رؤیت به طوری که بتوان آنها را تحلیل و تشریح نمود. بُعد<sup>۱</sup> يك متغیر فیزیکی است که برای مشخص کردن رفتار یا ماهیت يك سیستم ویژه به کار می رود، و واحد اصطلاحی است برای اندازه گیری بُعد. برای مثال بُعد طول ممکن است بر حسب واحدهای اینچ، فوت، سانتی متر و جز اینها اندازه گیری شود. انتخاب يك سیستم آحاد ویژه معمولاً به صورتی است که با بعضی از اصول فیزیکی به طور مناسبی مطابقت داشته باشد. بعدهای فیزیکی اصلی که برای توضیح تمام پدیده های فیزیکی به کار برده می شود عبارتند از:

$L$ = طول	$\tau$ = زمان
$M$ = جرم	$T$ = دما
$F$ = نیرو	$q$ = بار الکتریکی

در فصلهای بعد علامت  $q$  برای نشان دادن حرارت نیز، که يك فرم انرژی است، مورد استفاده قرار خواهد گرفت. فعلاً از آن برای نشان دادن بار الکتریکی استفاده می شود. سیستمهای مکانیکی آحاد بر دو اصل فیزیکی استوار است: قانون دوم حرکت نیوتن یعنی:

میزان تغییرات ممتنم نسبت به زمان  $\sim$  نیرو

و اصل جاذبه ثقلی نیوتن یعنی:

$$\sim \frac{m_1 m_2}{r^2} \text{ نیرو}$$

شکل معادله ای این اصول چنین است:

$$F = k_N \frac{d(mv)}{d\tau} \quad (1-7)$$

$$F = k_G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1-8)$$

که  $k_N$  و  $k_G$  ثابتهای تناسب هستند. قوانین نیوتنی در شکلهای ۱-۶ و ۱-۷ نمایش داده شده‌اند. ابتدا معادله (۱-۷) را برای ذره‌ای با جرم ثابت در نظر بگیرید، به‌طوری که:

$$F = k_N ma \quad (1-9)$$

که  $a$  شتاب یا  $dv/d\tau$  است. می‌توانیم برای این معادله هر سیستم آحاد را که بخواهیم انتخاب کنیم ولی باید مقدار  $k_N$  بطور دقیق متناسب با سیستم انتخابی باشد. اگرچه لازم به تذکر است که باید مطلبی برای تعریف اندازه هر واحد گفته شود. بیشترین سیستمهای متداول با عبارات زیر مشخص می‌شوند:

۱- یک پوند نیرو (lbf)، یک پوند جرم (lbm) را بمقدار  $32/174 \text{ ft/s}^2$  شتاب می‌دهد.

۲- یک پوند نیرو یک اسلاگ<sup>۱</sup> جرم را بمقدار  $1 \text{ ft/s}^2$  شتاب می‌دهد.

۳- یک دین<sup>۲</sup> نیرو یک گرم جرم را بمقدار  $1 \text{ cm/s}^2$  شتاب می‌دهد.

۴- یک نیوتن نیرو (N) یک کیلوگرم جرم را بمقدار  $1 \text{ m/s}^2$  شتاب می‌دهد.

۵- یک کیلوگرم نیرو یک کیلوگرم جرم را بمقدار  $9/80665 \text{ m/s}^2$  شتاب می‌دهد.



$$F = k_N \frac{d(mv)}{d\tau}$$

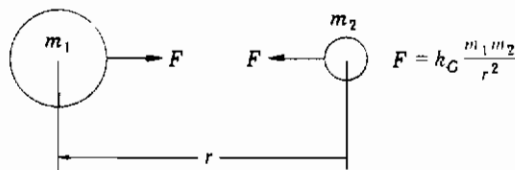
شکل ۱-۶ قانون دوم حرکت نیوتن

به کمک این عبارات کمیت‌های  $FLMr$  توسط معادله دینامیکی (۱-۹) به یکدیگر مربوط می‌گردند. ممکن است سؤال شود که بزرگی یک نیوتن چقدر است؟ جواب این است که آنقدر بزرگ است که به یک کیلوگرم به اندازه  $1 \text{ m/s}^2$  شتاب دهد. سؤالات دیگری نظیر بزرگی یک کیلوگرم، یک

1- Slug

2- Dyne

متر و يك ثانيه ممکن است مطرح شود. جواب این است که این کمیته‌ها در لابراتوارهای مختلف ملی جهان به‌عنوان استاندارد ثابت است (از جمله در سازمان ملی استاندارد در ایالات متحده). واحد استاندارد زمان، ثانیه، عبارت است از زمان لازم برای  $9,192,631,770$  پریود تابش در اثر انتقال الکترون بین دو سطح از نزدیکترین سطوح انرژی اتم سزیم  $^{133}\text{Cs}$ . نهایتاً کلیه سیستمهای آحاد باید متکی بر این استانداردها و نظایر آن باشد اما موضوع استانداردها از حوزه بحث ما خارج است.



شکل ۱-۲ قانون جاذبه ثقل نیوتن

برای سادگی گاهی اوقات ثابت  $k_N$  به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$k_N = \frac{1}{g_c} \quad (1-10)$$

$g_c$  ثابت جدیدی با ابعاد  $MLF^{-1} \tau^{-2}$  می‌باشد.

وزن يك جسم به‌صورت نیروی وارده بر آن در اثر شتاب ثقل تعریف شده است. بدین ترتیب:

$$W = \frac{g}{g_c} m \quad (1-11)$$

که  $g$  شتاب ثقل است. دقت کنید که وزن جسم دارای بُعد نیرو است.

متأسفانه مفهوم  $g_c$  برای اکثر دانشجویان گیج‌کننده است. در اولین سیستم آحادی که در بالا

اشاره شد  $g_c$  دارای مقادیر زیر است:

$$1- \quad g_c = 32.174 \quad \text{lbm.ft/lbf.s}^2$$

در این سیستم مقدار عددی  $g_c$  با مقدار شتاب ثقل در سطح دریا مساوی است اما  $g_c$  شتاب ثقل نیست.  $g_c$  ثابتی دارای بعد بوده که برای ساده کردن کاربرد قانون دوم حرکت نیوتن با این سیستم آحاد بخصوص به کار گرفته می شود.  $g_c$  در سایر سیستمهایی که قبلاً اشاره شد مقادیر زیر را دارا است:

$$\begin{aligned} 2- g_c &= 1 && \text{slug.ft/lbf.s}^2 \\ 3- g_c &= 1 && \text{kg-mass.m/N.s}^2 \\ 4- g_c &= 1 && \text{g-mass.cm/dyn.s}^2 \\ 5- g_c &= 9.8066 && \text{kg-mass.m/kg-force.s}^2 \end{aligned}$$

کیلو پوند نیرو<sup>۱</sup> (kp) علامت دیگری برای کیلوگرم نیرو است که در اروپا به کار می رود. خواننده هوشیار می تواند دریابد که چرا سیستمهای آحاد ۱ و ۵ به وجود آمده اند. هنگامی که کسی گوشت می خرد و یا در مغازه عطاری کار می کند اندازه گیری وزن یا نیرو می باید صورت گیرد. اگر يك جراثقال خرید و فروش می شود، ظرفیت آن بر اساس نیروی بلند کننده آن مشخص می شود. ترازوی عطاری و یا جراثقال بر اساس نیرو<sup>۲</sup> تنظیم (کالیبره) می شود به طوری که:

يك lbm، وزن ۱ lbf را در سطح دریا دارد.

يك کیلوگرم جرم، وزن ۱ kgf را در سطح دریا دارد.

باید دقت کرد که در معادلات گوناگون مورد استفاده در این کتاب واحدهای عبارات مختلف به طور مناسب انتخاب شده باشند. اگر عبارتی شامل يك کمیت دینامیکی بر اساس قانون دوم نیوتن باشد، در آن صورت باید ثابت  $g_c$  متناسب با سیستم آحاد مورد نظر انتخاب گردد. به منظور هماهنگی با شرح علائم بکار رفته در مکانیک،  $g_c$  را در بیشتر معادلات حذف خواهیم کرد. بدین ترتیب در معادله:

$$F = ma$$

با آن که  $g_c$  نوشته نشده، ولی در آن مستتر است. انرژی جنبشی مثال دیگری است که به صورت

1- Kilopond-force

۲- احتمالاً در عمل دستگاه بوسیله جرم استاندارد تنظیم می گردد، اما اساساً نیرو اندازه گیری می شود.



زیر نوشته می‌شود:

$$KE = \frac{1}{2} mV^2$$

اما بدیهی است که منظور ما این است:

$$KE = \frac{1}{2 g_c} mV^2$$

دقت کنید که مقدار عددی  $g_c$  در سه تا از پنج سیستم واحادی که قبلاً گفته شد برابر واحد می‌باشد. این حقیقت دلیلی برای استفاده زیاد آنها در مسائل مکانیک است. سیستم پوند - جرم (lbm) به‌طور وسیعی در بیشتر مسائل ترمودینامیک مورد استفاده قرار می‌گیرد و به همین جهت در موقع کار کردن با  $g_c$  دقت زیادی باید کرد.

### آحاد انرژی

کار و انرژی دارای بُعد نیرو و در فاصله بوده و با توجه به تعاریف زیر به صورت پوند - نیرو - فوت، دین - سانتیمتر، یا نیوتن - متر بیان می‌گردد:

$$1 \text{ (dyn.cm)} = 1 \text{ erg} \quad 1 \text{ دین - سانتیمتر}$$

$$1 \text{ (N.m)} = 1 \text{ joule (J)} \quad 1 \text{ نیوتن - متر}$$

توان (قدرت) عبارت از میزان انجام کار نسبت به زمان بوده و بعضی از آحاد مناسب آن عبارتند از:

$$1 \text{ (W)} = 1 \text{ J/s} \quad 1 \text{ وات}$$

$$1 \text{ (hp)} = 550 \text{ ft.lbf/s} = 745.7 \text{ W} \quad 1 \text{ اسب بخار}$$

بعضی از آحاد انرژی ویژه مطالعات ترمودینامیکی، آحاد انرژی حرارتی نامیده شده‌اند از جمله بی - تی - یو<sup>۱</sup> (Btu) و کالری (cal):

$$1 \text{ Btu} = \text{انرژی لازم برای افزایش دمای } 1 \text{ پوند جرم آب } 1^\circ\text{F} \text{ به مقدار } 1^\circ\text{F}$$

$$1 \text{ cal} = \text{انرژی لازم برای افزایش دمای } 1 \text{ گرم آب } 1^\circ\text{C} \text{ بمقدار } 1^\circ\text{C}$$

$$1 \text{ kcal} = \text{انرژی لازم برای افزایش دمای } 1 \text{ کیلوگرم آب } 1^\circ\text{C} \text{ بمقدار } 1^\circ\text{C}$$

بعضی از ضرایب تبدیل مفید عبارتند از :

$$1 \text{ W} = 3.413 \text{ Btu/h}$$

$$1 \text{ hp} = 2545 \text{ Btu/h}$$

$$1 \text{ Btu} = 252.16 \text{ cal} = 1055.04 \text{ J}$$

يك واحد دیگر انرژی الکترون ولت (eV) است که عبارت از کار لازم برای گذراندن يك الکترون از میان اختلاف پتانسیل يك ولت (V) می باشد. این واحد را با در نظر گرفتن بار الکترون،  $q_e$  می توان به ژول تبدیل کرد .

$$q_e = 1.602189 \times 10^{-19} \text{ Coulomb (C)}$$

اما ولت به صورت کار لازم برای جابه جا نمودن يك واحد بار الکتریکی تعریف شده است، لذا داریم :

$$1 \text{ eV} = 1.602189 \times 10^{-19} \text{ J}$$

### سیستم SI

مشاهده می شود که سیستم آحاد ۳ و ۴ و ۵ به کار رفته در مورد قانون دوم حرکت نیوتن "متریک" است اما هر کدام آحاد متفاوتی برای نیرو، جرم و فاصله دارند. سیستم SI اساساً سیستم آحاد شماره ۴ بوده و استفاده از آحاد حرارتی انرژی را مجاز نمی دارد. به عبارت دیگر ژول تنها واحد انرژی مجاز می باشد. دقت کنید که کالری و کیلو کالری هم متریک هستند ولی SI نمی باشند. معمولاً مفهوم  $g_c$  در سیستم SI استفاده ای ندارد و نیوتن به صورت زیر تعریف می شود :

$$(1-12) \quad 1 \text{ (kg.m/s}^2\text{)} = 1 \text{ مجذورثانیه / متر - کیلوگرم} = 1 \text{ (N) نیوتن}$$

آحاد اساسی و استخراجی SI در جدولهای ۳ - A و ۴ - A (ضمیمه) داده شده اند. در جدول ۳-۱

پیشوندهای استاندارد برای مضارب  $10$  نشان داده شده است. بنابر این سانتیمتر cm، کیلوژول kJ و مگانیوتن MN خواهد بود. هر جا بتوان باید در نتایج عددی از پیشوندهای استاندارد استفاده کرد. برای مثال  $10^5 \text{ J} \times 2/6$  را به صورت kJ یا MJ  $26/0$  می‌نویسیم.

ضرایب تبدیل برای واحدهای گوناگون در جدول ۲ - A ضمیمه آورده شده است.

جدول ۱-۳ پیشوندها و مضارب استاندارد در واحدهای SI

تلفظ	علامت	پیشوندها	مضارب
ترا	T	tera	$10^{12}$
جیگا (گیگا)	G	giga	$10^9$
میگا	M	mega	$10^6$
کیلو	k	kilo	$10^3$
هکتو	h	hecto	$10^2$
دکا	da	deka	$10^1$
دسی	d	deci	$10^{-1}$
سانتی	c	centi	$10^{-2}$
میلی	m	milli	$10^{-3}$
میکرو	$\mu$	micro	$10^{-6}$
نانو	n	nano	$10^{-9}$
پیکو	p	pico	$10^{-12}$
فیمتو	f	femto	$10^{-15}$
آتو	a	atto	$10^{-18}$

## مثال ۱-۱

نیروی  $10$  کیلوپوند (kp) بر جرم  $3 \text{ lbm}$  اعمال می‌شود. شتاب حاصل را محاسبه کنید.

**حل:** محاسبات را در هر سیستم انتخابی می‌توانیم انجام دهیم ولی باید واحدهای انتخاب شده هم آهنگ باشند. با استفاده از سیستم N-m-kg-s داریم:

$$10 \text{ kp} = 98.066 \text{ N}$$

$$3 \text{ lbm} = (3)(0.454) \text{ kg} = 1.362 \text{ kg}$$

سپس از معادله (۱-۹)

$$a = \frac{F_{g_c}}{m} = \frac{(98.066 \text{ N})(1 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{N} \cdot \text{s}^2)}{1.362 \text{ kg}}$$

$$= 72 \text{ m/s}^2 = 236.3 \text{ ft/s}^2$$

اگر سیستم پوند جرم - پوند نیرو را انتخاب کنیم:

$$10 \text{ kp} = (10)(2.2046) = 22.046 \text{ lbf}$$

$$a = \frac{F_{g_c}}{m} = \frac{(22.046 \text{ lbf})(32.174 \text{ lbm} \cdot \text{ft}/\text{lbf} \cdot \text{s}^2)}{3 \text{ lbm}}$$

$$= 236.3 \text{ ft/s}^2 = 72 \text{ m/s}^2$$

## مثال ۱-۲

یک نیروگاه بزرگ همانند شکل ۱-۴ دارای توان خروجی مفید  $1000 \text{ MW}$  می باشد و بازده حرارتی آن  $40\%$  است. حرارت تلف شده در کندانسور به وسیله گرم کردن آب به میزان  $10^\circ\text{F}$  در دمای حدود  $68^\circ\text{F}$  انجام می گیرد. مقدار آب لازم را در هر ثانیه محاسبه کنید.

**حل:** توازن انرژی برای نیروگاه به صورت زیر است:

$$(a) \quad \text{حرارت اتلافی در کندانسور} + \text{کار خالص خروجی} = \text{حرارت اضافه شده به دیگ بخار}$$

از تعریف بازده حرارتی [معادله (۱-۵)] داریم:

$$\text{حرارت اضافه شده در دیگ بخار} = \frac{1000 \text{ MW}}{0.4} = 2500 \text{ MW}$$

سپس از معادله (a)

$$\text{حرارت اتلافی در کندانسور} = 2500 \text{ MW} - 1000 \text{ MW} = 1500 \text{ MW}$$

$$\begin{aligned}\text{حرارت اتلافی در کندانسور} &= 5.12 \times 10^9 \text{ Btu/h} \\ &= 1.427 \times 10^6 \text{ Btu/s}\end{aligned}$$

از تعریف Btu، ۱۰ Btu لازم است که ۱ lbm آب را  $1^\circ\text{F}$  افزایش داد.

$$\begin{aligned}\text{جرم آب مورد نیاز} &= \frac{1.422 \times 10^6 \text{ Btu/s}}{10 \text{ Btu/lbm}} \\ &= 1.411 \times 10^5 \text{ lbm/s}\end{aligned}$$

قانون جاذبه جرمی [معادله (۱-۸)] بیان کننده نیروی جاذبه جرمی بین دو جرم بر حسب فاصله بین آنها  $r$  و ثابت عمومی جاذبه  $k_G$  می باشد. در سیستم SI مقدار  $k_G$  برابر است با:

$$k_G = 6.672 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2 \quad (1-13)$$

این عدد از طریق آزمایش به دست آمده و با دسترسی به نتایج آزمایشی بهتر، به مقدار جزئی اصلاح پذیر است.

واحدهای الکترو استاتیک<sup>۲</sup> براساس قانون کولمب<sup>۳</sup> است که می گوید:

$$F = k_e \frac{qq'}{r^2} \quad (1-14)$$

$F$  نیروی اعمال شده توسط دو بار  $q$  و  $q'$  و  $r$  همانطور که در شکل ۱-۸ نشان داده شده، فاصله جدائی بارها می باشد. مقدار ثابت تناسب،  $k_e$ ، موقعی که بار بر حسب کولمب و نیرو به نیوتن بیان شده است برابر  $9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$  می باشد. معمولاً  $k_e$  به طور قراردادی به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (1-15)$$

حال  $\epsilon_0 = 8.854187818 \times 10^{-12}$  ثابت جدیدی است که ضریب نفوذ پذیری

1- Universal gravitational constant

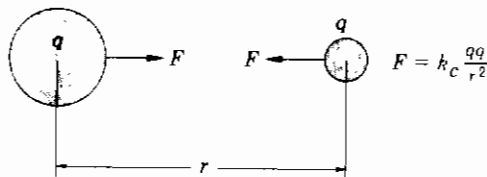
2- Electrostatic

3- Coulomb's law

فضای آزاد<sup>۱</sup> نامیده می‌شود.

قانون آمپر<sup>۲</sup> بیان‌کننده این مطلب است که نیروی بین دو هادی موازی، همان‌طور که در شکل ۱-۹ نمایش داده شده، بر طبق معادله زیر با جریان موجود در هادیها متناسب است.

$$F = k_A I I' \frac{LL'}{r^2} \quad (1-16)$$



شکل ۱-۸ قانون نیروی الکترواستاتیکی کولمب

که \$I\$ و \$I'\$ شدت جریان در هادیها، \$L\$ و \$L'\$ طول هادیها و \$r\$ فاصله بین آنها می‌باشد. اگر شدت جریانها در يك جهت باشند، نیروی مذکور، نیروی جاذبه خواهد بود. موقعی که شدت جریان بر حسب آمپر و نیرو به نیوتن باشد، ثابت تناسب \$k\_A\$ دارای مقدار زیر است:

$$k_A = 10^{-7} \text{ N/A}^2 \quad (1-17)$$

آمپر به وسیله رابطه زیر تعریف می‌شود:

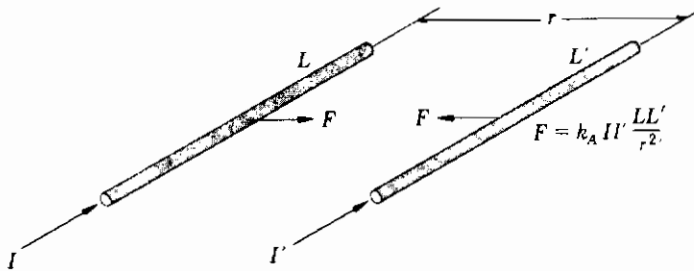
$$1 \text{ آمپر (A)} = 1 \text{ C/s} \quad (1-18)$$

بعضی اوقات به خاطر سادگی جایگزینی زیر صورت می‌گیرد:

$$k_A = \frac{\mu_0}{4\pi} \quad (1-19)$$

1- Permittivity of free space

2- Ampere's law



شکل ۱-۹ قانون آمپر

$\mu_0$  ثابت جدیدی است که ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در فضای آزاد نامیده می‌شود. قانون آمپر نیرو را به حرکت بار الکتریکی (جریان) مربوط می‌کند. اگر بار الکتریکی  $q'$  با سرعت  $v$  در حرکت باشد و در غیاب هرگونه میدان الکترواستاتیکی تحت تأثیر نیروئی قرار گیرد، گفته می‌شود که این نیرو ناشی از یک میدان مغناطیسی  $B$  است. این نیرو به وسیله رابطه زیر با سایر کمیتها مربوط می‌شود:

$$F = q' v \times B \quad (1-20)$$

معادله برداری (۱-۲۰) کمک به تعریف القای مغناطیسی<sup>۱</sup> یا چگالی فلوی مغناطیسی  $B$  می‌کند. می‌بینیم یک سلسله واحد مناسب برای  $B$  به صورت نیوتن - ثانیه بر کولمب - متر می‌باشد. استفاده از واحد جدیدی متداول است که توسط رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$1 \text{ (Wb)} = 1 \text{ N.s.m/C} \quad (1-21)$$

بنابر این واحد  $B$  را می‌توان بر حسب واحد وبر بر متر مربع بیان نمود. شدت الکتریکی<sup>۲</sup>  $E$  به صورت نیروی وارده بر واحد بار الکتریکی در اثر یک میدان الکتریکی تعریف شده است. بدین ترتیب:

1- Magnetic induction

2- Electric intensity

$$E = \frac{F}{q'} \quad (۱-۲۲)$$

پتانسیل الکتریکی  $V$  به صورت کار لازم برای جابه‌جا کردن يك بار الکتریکی بر واحد بار تعریف شده است. از واحدهای متداول برای پتانسیل الکتریکی ژول بر کولمب است (نیوتن - متر بر کولمب) که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$1 \text{ (V)} = 1 \text{ J/C} \quad (۱-۲۳)$$

## ۱۲- ۱ حرکت بسوی سیستم آحاد SI

تحرّک زیادی برای قبول سیستم آحاد SI به عنوان سیستم استاندارد در ایالات متحده وجود دارد، زیرا این سیستم به طور وسیعی در جهان پذیرفته شده است. استاندارد نمودن آحاد مزیت قابل ملاحظه‌ای دارد، اما انتظار می‌رود که تا مدتهای زیادی کارکنان صنعت و بعضی از محققین سیستمهای آحاد متفاوتی را به کار گیرند. به عبارت دیگر آحادی نظیر بی‌تی‌یو، کالری و اسب بخار در مباحثات تکنیکی تا آینده دوری مورد استفاده قرار گیرد. به همین دلیل از آحاد مذکور در این کتاب استفاده خواهیم کرد. برای اینکه خواننده با حدود بزرگی آحاد مختلف آشنا شود، جواب مثالهای کتاب را در صورت لزوم به چندین روش بیان خواهیم کرد.

واضح است که استفاده از سیستمهای آحاد متفاوت اشتباهات قابل ملاحظه‌ای را به همراه خواهد داشت و افراد متفاوت استفاده از سیستمهای متفاوتی را ترجیح می‌دهند. به علاوه ممکن است در مورد انتخاب کمیت‌های فیزیکی اصلی استدلال‌های ایدائی به وجود آید. به عنوان نمونه حواس ما، نسبت به نیروها عکس العمل نشان می‌دهد و ما جرم ماده را توسط نیروی اینرسی وارده از آن احساس می‌کنیم. از طرفی جرم مشخص کننده يك کمیت ماده است در حالی که چنین تفسیر کمی برای نیرو وجود ندارد، مگر از طریق اندازه‌گیری غیر مستقیم بر مبنای اصل فیزیکی ارتباط بین نیرو و خواص "کمی" ماده نظیر معادلات (۱-۷) و (۱-۸). هدف از این بحث کوتاه درباره آحاد و ابعاد، نشان دادن این مطلب است که انتخاب سیستم آحاد بخاطر ساده نمودن کاربرد آنها در مورد پدیده‌های اساسی فیزیکی می‌باشد.



قبلاً بیان کردیم که ترمودینامیک عبارت است از مطالعه انرژی و تبدیل آن. حال که آحاد مختلف انرژی را تعریف نموده‌ایم، جالب است که مقادیر نمونه‌ای از آن را برای خواننده بیان کنیم. جدول ۱-۴ تعدادی از این کمیت‌ها را در هر دو سیستم انگلیسی و SI نشان می‌دهد. (سیستم انگلیسی سیستم متداول ایالات متحده<sup>۱</sup> یا USCS نیز نامیده می‌شود.)

جدول ۱-۴ نمونه کمیت‌های انرژی

SI	انگلیسی (USCS)	
۱۵۷ MJ	۱۴۹۰۰۰ Btu	ارزش حرارتی یک گالن گازوئیل
۳۰ MJ/kg	۱۲۹۰۰ Btu/lbm	ارزش حرارتی ذغال سنگ قیری <sup>۲</sup>
۱۰۴۰ W/m <sup>2</sup>	۳۳۰ Btu/h.ft <sup>2</sup>	انرژی خورشیدی روی زمین، روز آفتابی
۱/۰۵ GJ	۱۰ <sup>۶</sup> Btu	ارزش حرارتی ۱۰۰۰ ft <sup>3</sup> گاز طبیعی
۷۴ × ۱۰ <sup>۶</sup> MJ/kg	۳/۲ × ۱۰ <sup>۱۱</sup> Btu/lbm	انرژی هسته‌ای، اورانیوم
		بار سرمایش تهویه مطبوع برای مناطق مسکونی،
۱۴/۶ kW	۵۰۰۰۰ Btu/h	روزگرم تابستان
۱۰۰۰ MW	۳/۴۱ × ۱۰ <sup>۹</sup> Btu/h	قدرت مفید، نیروگاه بزرگ بخار
۱۳۲ W	۴۵۰ Btu/h	اتلاف حرارتی بدن انسان
۲۳۲۶ kJ/kg	۱۰۰۰ Btu/lbm	انرژی لازم برای تبخیر آب

### مثال ۱-۳

دو هادی بزرگ به طول ۳ فوت که هر کدام دارای شدت جریان ۱۵۰ آمپر بوده و به فاصله ۳ اینچ از یکدیگر قرار دارند، جریان برق را به یک وسیله الکتریکی منتقل می‌کنند. نیروی عمل‌کننده بر روی این هادیها را محاسبه کنید.

1- United States Customary System (USCS)

2- Bituminous

**حل :** برای این محاسبه قانون آمپر را به کار می‌بریم :

$$F = k_A I I' \frac{LL'}{r^2}$$

$$L = L' = 3 \text{ ft} = 0.9144 \text{ m}$$

$$I = I' = 1500 \text{ A}$$

$$r = 3 \text{ in} = 0.0762 \text{ m}$$

بنابراین :

$$\begin{aligned} F &= \frac{(10^{-7} \text{ N/A}^2) (1500 \text{ A})^2 (0.9144)^2}{(0.0762 \text{ m})^2} \\ &= 32.4 \text{ N} = 7.28 \text{ lbf} \end{aligned}$$

#### مثال ۴-۱

وزن انسانی که در يك سفینه فضائی به دور زمین در حال حرکت است در يك مکان اندازه گیری شده و برابر ۲۷۵ نیوتن می‌باشد. از روی دستگاههای اندازه گیری پرواز معلوم شده که شتاب ثقل در این مکان بخصوص  $11 \text{ ft/s}^2$  است. جرم و وزن این انسان را روی زمین در سطح دریا محاسبه کنید .

**حل :** مقدار  $g$  برابر است با  $3/3528 \text{ m/s}^2 = 11 \text{ ft/s}^2$  و معادله (۱-۱۱) را به کار می‌بریم :

$$\begin{aligned} W &= m \frac{g}{g_c} \\ 275 \text{ N} &= m \frac{(3.3528 \text{ m/s}^2)}{1 \text{ kg.m/N.s}^2} \\ m &= 82.021 \text{ kg} = 180.83 \text{ lbm} \end{aligned}$$

در سطح دریاداریم  $g = ۳۲/۱۷۴ \text{ ft/s}^2 = ۹/۸۰۶۶ \text{ m/s}^2$  به طوری که وزن برابر خواهد بود با:

$$W = \frac{mg}{g_c} = \frac{(82.021 \text{ kg}) (9.8066 \text{ m/s}^2)}{1.0 \text{ N.m/kg.s}^2} \\ = 804.34 \text{ N} = 180.83 \text{ lbf}$$

البته توجه داریم که يك lbf در سطح دریا يك lbf وزن دارد.

### ۱۳ - ۱ فشار و محیط پیوسته<sup>۱</sup> (یکپارچه)

بیشتر خوانندگان با ماهیت اتمی و ملکولی ماده آشنایی داشته و می دانند که يك حجم محدود و قابل رؤیت از يك گاز و یا يك مایع شامل تعداد بسیار زیادی از ذرات است. جرم مخصوص چنین حجم محدودی،  $\rho$ ، عبارت است از جرم بر واحد حجم یا:

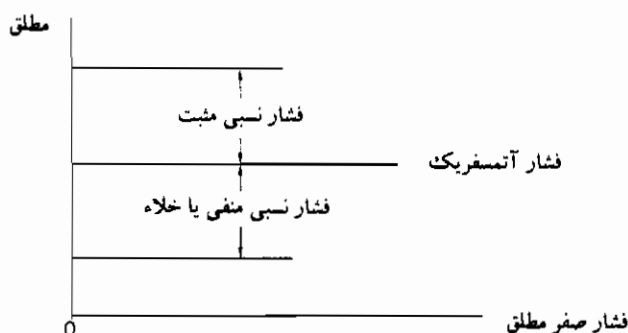
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (۱-۲۴)$$

در این تعریف فرض می شود که حجم به قدر کافی بزرگ است به طوری که تعداد کل ذرات موجود در آن به مقدار قابل ملاحظه ای با زمان تغییر نکند. در این مورد می گوئیم که سیستم را ممکن است به صورت پیوسته یا یکپارچه در نظر گرفت.

فشار به صورت مؤلفه قائم نیروی وارده بر واحد سطح به وسیله يك سیال بر روی يك مرز تعریف می شود. تعریف فشار فقط برای جزء (المان) سطحی صورت می گیرد که به قدر کافی بزرگ باشد به طوری که بتوان سیال را به صورت پیوسته در نظر گرفت. بنابراین:

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow \Delta A'} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} \quad (۱-۲۵)$$

$\Delta A'$  کوچکترین سطحی است که سیال به صورت پیوسته در آن رفتار می کند. به طور کلی رفتار پیوسته یا یکپارچه موقعی بروز می کند که میانگین مسافتی را که يك ملکول سیال بین دو برخورد



شکل ۱۰-۱ رابطه بین بیانهای فشار

طبی می‌کند نسبت به بعد مرز سیستم (در این مورد نسبت یک ضلع المان سطح  $\Delta A'$  کوچک باشد). فشار کل وارده بر یک دیوار مرزی فشار مطلق<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. فشار وارده بر یک دیواره به وسیلهٔ اتمسفر فشار اتمسفری نامیده شده و مقدار آن در مناطق و ارتفاعات مختلف روی سطح زمین متفاوت است. فشار اتمسفری نتیجهٔ وزن هوا در یک نقطه بخصوص می‌باشد. فشار نسبی<sup>۲</sup> نشان دهندهٔ اختلاف بین فشار مطلق و فشار اتمسفری در یک سیستم ویژه است و معمولاً به وسیلهٔ دستگاهی که فشار اتمسفر را به عنوان یک مرجع دارد اندازه‌گیری می‌شود. خلأ نشان دهندهٔ مازاد فشار اتمسفری نسبت به فشار مطلق در یک سیستم است. لغت خلأ مترادف با فشار نسبی منفی است. با توجه به این تعاریف مشخص است که فشار مطلق ممکن نیست منفی باشد و همچنین خلأ نمی‌تواند بیشتر از فشار اتمسفری محل باشد. بیانهای گوناگون فشار در شکل ۱۰-۱ نمایش داده شده‌اند.

در سیستم مهندسی اتحاد آمریکائی معمولاً فشار بر حسب پوند نیرو بر اینچ مربع مطلق ( $\text{lb/in}^2 \text{ abs}$  یا  $\text{psia}$ ) و فشار نسبی به صورت پوند نیرو بر اینچ مربع نسبی ( $\text{lb/in}^2 \text{ gage}$  یا  $\text{psig}$ ) بیان می‌شود. غالباً فشار بر حسب ارتفاع ستونی از جیوه بیان می‌شود که در دمای  $20^\circ\text{C}$  ( $68^\circ\text{F}$ ) نگهداری خواهد شد. در فشار استاندارد اتمسفر که  $14.7/696 \text{ psia}$  است این ارتفاع با توجه به چگالی جیوه  $13.6/5951 \text{ g/cm}^3$ ، برابر  $760 \text{ mm}$  می‌باشد. واحد SI برای فشار، نیوتن بر متر مربع یا پاسکال

1- Absolute pressure

2- Gage pressure

(Pa) می‌باشد. ضرایب تبدیل برای فشار در ضمیمه داده شده‌اند. سایر واحدهایی که معمولاً استفاده می‌شوند، عبارتند از :

$$\begin{aligned} 1 \text{ microbar } (\mu\text{bar}) &= 1 \text{ dyn/cm}^2 = 10^{-6} \text{ bar} = 0.1 \text{ Pa} \\ 1 \text{ millimeter} &= 1 \text{ mmHg} = 1333.22 \text{ microbars} \\ 1 \text{ micrometer} &= 1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ mHg} = 10^{-3} \text{ mmHg} \\ 1 \text{ torr} &= 1 \text{ mmHg} \end{aligned}$$

بعضی از واحدهای معمول برای فشار استاندارد اتمسفر عبارتند از :

$$1 \text{ standard atmosphere} = \begin{cases} 14.696 \text{ lbf/in}^2 \text{ abs(psia)} \\ 29.92 \text{ inHg at } 32^\circ\text{F} \\ 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa} \\ 1.0332 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (kp/cm}^2\text{)} \end{cases}$$

باید دقت کنیم که منظور از یک بار ( $10^5 \text{ Pa}$ )، یک برابر فشار بارومتریک<sup>۱</sup> می‌باشد، اما همان‌طور که در بالا اشاره شد مقدار آن حدود یک درصد کمتر از اتمسفر استاندارد است.

## ۱-۱۴ گاز ایده‌آل

یک مول کمیتی از یک ماده است که جرم آن از نظر عددی برابر با وزن ملکولی ماده باشد. برای مثال یک کیلو (گرم) مول<sup>۲</sup> اکسیژن برابر ۳۲ کیلوگرم و یک پوند مول برابر ۳۲ پوند جرم خواهد بود. وزن ملکولی را با  $M$  و تعداد مولها را با  $\eta$  نشان می‌دهیم. بنابر این جرم ماده،  $m$ ، برابر است با :

$$m = \eta M \quad (۱-۲۶)$$

جرم هر ملکول با  $M^*$  نشان داده می‌شود. به‌طوری که نسبت جرم بر مول برابر است با :

### 1- Barometric pressure

۲- معلوم نیست چرا نویسنده کیلوگرم مول به کار برده است. در سیستم SI، کیلومول معادل کیلوگرم مول گرفته شده

است. (مترجم)

$$\frac{m}{\eta} = M^* N_0 = M \quad (۱-۲۷)$$

$N_0$  تعداد ملکولها در يك مول است. بدین ترتیب:

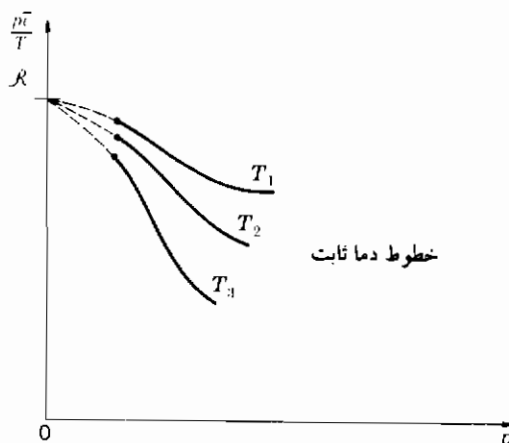
$$N_0 = \frac{M}{M^*} \quad (۱-۲۸)$$

این نسبت مقدار ثابتی به نام عدد آووگادرو<sup>۱</sup> بوده و دارای مقدار زیر است.

$$N_0 = 6.022045 \times 10^{23} \text{ molecules/g mol} \quad (۱-۲۹)$$

حجم کل با علامت  $V$ ، حجم مخصوص (حجم بر واحد جرم) با  $v$  و حجم مخصوص مولی (حجم بر مول) به وسیله  $\bar{v}$  نشان داده می شود.

حال فرض کنید که يك سری آزمایشها با گازهای مختلف انجام شده و فشار، حجم و دما برای يك مول از هر کدام از این گازها در فشارها و دماهای مختلف اندازه گیری شده باشد. نتایج آزمایشها را می توان برای يك گاز به صورت شکل ۱-۱۱ رسم کرد. به طور آزمایشی معلوم شده که صرف نظر از



شکل ۱-۱۱ تعیین ثابت عمومی گاز

نوع گاز، تمام خطوط دمای ثابت در این نمودار در فشارهای نزدیک صفر به یک نقطه نزدیک می‌شوند. این مقدار به عنوان ثابت عمومی (همگانی) گاز تعریف شده:

$$\Re = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p \bar{v}}{T} \quad (1-30)$$

و دارای مقدار عددی  $1545/35 \text{ ft} \cdot \text{lbf/lbm} \cdot \text{mol} \cdot ^\circ\text{R}$  یا  $8314/41 \text{ J/kg} \cdot \text{mol} \cdot \text{K}$  می‌باشد. بیشتر گازها در محدوده نسبتاً وسیعی از فشارها و دماها با تقریب نسبتاً خوبی از معادله ساده زیر پیروی می‌کنند.

$$p \bar{v} = \Re T \quad (1-31)$$

معادله (۱-۳۱) معادله حالت<sup>۱</sup> یک گاز ایده‌آل نامیده می‌شود. عبارت معادله حالت بدین معنی است که روابطی بین آن دسته از خواص ترمودینامیک به وجود می‌آورد که برای تعریف حالت یک سیستم لازم است.

لازم به تذکر است که در معادله (۱-۳۱) دما باید بر حسب واحدهای مطلق یعنی واحدهای رانکین و یا کلوین بیان شود.

برای تشریح کارآیی معادله گاز ایده‌آل از عبارت نامشخص "محدوده نسبتاً وسیع" در مورد فشار و درجه حرارت استفاده کرده‌ایم که امید است باعث گمراهی نگردد. در واقع گازهایی نظیر اکسیژن، نیتروژن، هوا، هلیوم، دی اکسید کربن و غیره در دمای متعارف تا فشار ده‌ها اتمسفر از معادله (۱-۳۱) پیروی می‌کنند. در فصل ۶ بعضی روشهای مستقیم را در مورد گازهای غیر ایده‌آل بررسی خواهیم نمود. در حال حاضر برای حل مسائل، خواننده باید رفتار گاز ایده‌آل را در نظر داشته باشد.

معادله (۱-۳۱) را می‌توان به چند طریق مختلف نوشت: چون  $\bar{v} = \frac{V}{\eta}$  داریم.

$$pV = \eta \Re T \quad (1-32)$$

و چون  $V = mv$  لذا:

$$pv = \frac{\eta}{m} RT \quad (۱-۳۳)$$

اما  $m/\eta = M$  بنابر این :

$$pv = \frac{R}{M} T = RT$$

نسبت  $R/M = R$  ثابت گاز برای یک گاز بخصوص نامیده می شود. همچنین می توان نوشت :

$$pV = mRT \quad (۱-۳۴)$$

در معادله (۱-۳۴) جرم حجمی<sup>۱</sup> (جرم مخصوص) یک حجم معین را به صورت جرم در واحد حجم تعریف کردیم یا :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad (۱-۳۵)$$

بنابر این معادله گاز ایده آل را می توان به صورت زیر هم نوشت :

$$p = \rho RT \quad (۱-۳۶)$$

انتخاب هر کدام از رابطه های بالا برای محاسبات مورد نظر، کاملاً بستگی به این دارد که کار با کدام یک آسانتر انجام می شود.

## مثال ۱-۵

لاستیک اتومبیلی به قطر ۲۰ سانتیمتر و شعاع داخلی ۲۰ سانتیمتر را در نظر بگیرید. جرم هوای موجود در آن را در  $۲۰^{\circ}\text{C}$  و فشار نسبی ۲ اتمسفر محاسبه کنید. وزن ملکولی معادل هوا ۲۸/۹۷ است.

**حل :** جرم هوا با جایگزینی مقادیر مناسب در معادله (۱-۳۴) محاسبه می شود. حجم به صورت زیر



محاسبه می‌گردد:

$$V = \frac{\pi(20)^2}{4} (2\pi) (20 + 10) = 59218 \text{ cm}^3 = 0.0592 \text{ m}^3$$

ثابت گاز برای هوا عبارت است از:

$$R = \frac{\mathfrak{R}}{M} = \frac{8314 \text{ J/kg.mol.K}}{28.97 \text{ kg/kgmol}} = 287 \text{ J/kg.K}$$

عبارت فشار نسبی اشاره به فشار بالاتر از فشار اتمسفر دارد. بدین ترتیب فشار مطلق برابر است با:

$$p = 2 \text{ atm} + \text{atm} = 3 \text{ atm} = 3.04 \times 10^5 \text{ Pa}$$

جرم از معادله (۱-۳۴) برابر است با:

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{(3.04 \times 10^5)(0.0592)}{(287)(20 + 273)} = 0.214 \text{ kg}$$

## مثال ۱-۶

تعداد ملکولهای اکسیژن ( $O_2$ ) موجود در ظرفی به حجم ۱۷۰ سانتیمتر مکعب را در ۲ اتمسفر و  $25^\circ\text{C}$  محاسبه کنید.

**حل:** برای این مسأله ابتدا تعداد کیلوگرم مولهای اکسیژن را محاسبه کرده و سپس از عدد آووگادرو در معادله (۱-۲۹) استفاده می‌کنیم:

$$V = 170 \text{ cm}^3 = 1.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$p = 2 \text{ atm} = 2.0264 \times 10^5 \text{ Pa (N/m}^2\text{)}$$

$$T = 250^\circ\text{C} = 523 \text{ K}$$

حال می‌توان تعداد کیلوگرم مولها را با استفاده از معادله (۱-۳۲) و با در نظر گرفتن

$$\mathfrak{R} = 8314 \text{ J/kg.mol.K}$$

محاسبه نمود.

$$\eta = \frac{pV}{RT} = \frac{(2.0264 \times 10^5) (1.7 \times 10^{-4})}{(8314)(523)} = 7.92 \times 10^{-6} \text{ kg.mol}$$

بدین ترتیب تعداد ملکولها برابر است با:

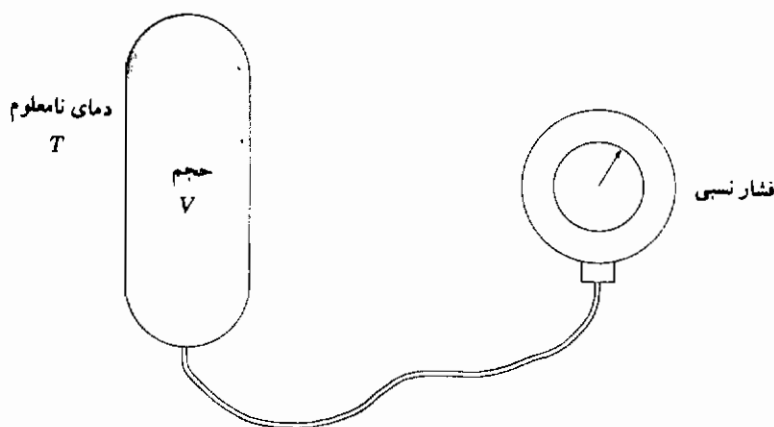
$$N = \eta N_0 = (7.92 \times 10^{-6}) (6.022 \times 10^{26} \text{ molecules/kg.mol}) \\ = 4.77 \times 10^{21} \text{ molecules}$$

دقت کنید که نوع گاز (در اینجا اکسیژن) تأثیری در جواب ندارد. اگر می‌خواستیم که جرم اکسیژن را محاسبه کنیم، می‌توانستیم از رابطه زیر استفاده نمائیم:

$$m = \eta M = (7.92 \times 10^{-6} \text{ kg.mol})(32 \text{ kg/kg.mol}) \\ = 2.53 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

## ۱۵-۱ دماسنجی با گاز ایده آل

بحث بالا اصولی بنیادی برای یک وسیله اندازه‌گیری دما در اختیار می‌گذارد که شاید به‌عنوان دومین استاندارد آزمایشی مورد استفاده قرار گیرد. همان‌طور که در شکل ۱۲-۱ نمایش داده شده حجم



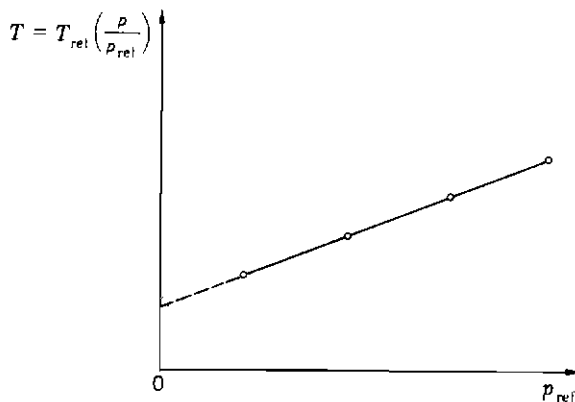
شکل ۱۲-۱ طرحواره دماسنج گاز ایده آل

ثابتی به وسیله يك گاز پر شده در معرض درجه حرارتی که باید اندازه گیری شود، قرار می گیرد. فشار سیستم گاز در دمای  $T$  اندازه گیری می شود. سپس حجم مذکور در معرض يك دمای استاندارد مرجع (همان طور که در قسمت ۴ - ۱ بحث شد) قرار گرفته و فشار در تحت این شرایط مجدداً اندازه گیری می شود. بر طبق معادله (۱-۳۱) در حجم ثابت داریم:

$$T = T_{\text{ref}} \left( \frac{P}{P_{\text{ref}}} \right) \quad \text{حجم ثابت} \quad (1-37)$$

حال فرض کنید که مقداری گاز از حجم مورد نظر خارج و اندازه گیریهای فشار تکرار شود. به طور کلی چون مقدار گاز تغییر کرده است، اختلافی جزئی در نسبت فشار در معادله (۱-۳۷) وجود خواهد داشت. حال اندازه گیریها ممکن است صرف نظر از نوع گاز مورد استفاده تکرار و نتایج آن به صورت شکل ۱-۱۳ رسم شود. دمای واقعی همان طور که به وسیله معادله حالت گاز ایده آل تعریف شده از ادامه این منحنی تا خط فشار صفر به دست می آید. با استفاده از دماسنج گاز می توان دماهای پایین تا  $1\text{ K}$  را از طریق برون یابی اندازه گرفت.

تشکیل يك دمای مأخذ یا مرجع به منظور استفاده از اصول کار دماسنج گاز - هر دماسنج دیگری که به این منظور به کار می رود اهمیت زیادی دارد. این دمای مرجع را می توان با استفاده از مقیاس بین المللی دما (همان طور که در بخش ۴ - ۱ بحث شد) تشکیل داد.



شکل ۱-۱۳ نتایج اندازه گیریهای با دماسنج گاز ایده آل

## ۱۶-۱ تئوری جنبشی ساده يك گاز ایده آل

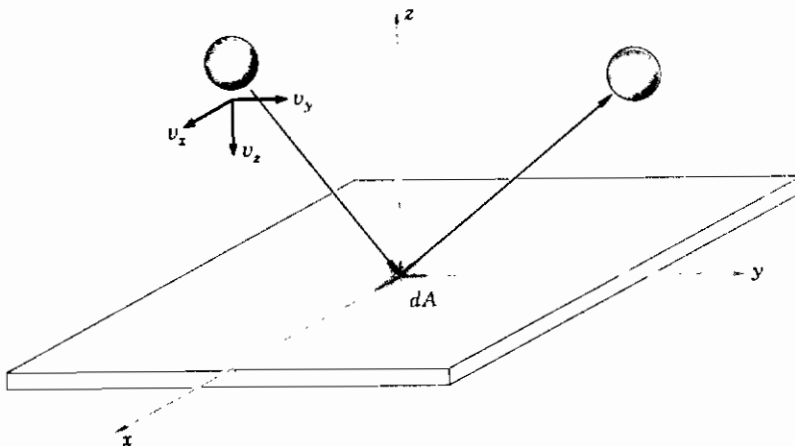
برای نشان دادن رابطه تحلیلی و مقدماتی بین ترمودینامیک ماکروسکپی و میکروسکپی به تجزیه و تحلیل جنبشی بسیار ساده ملکولهای گاز می پردازیم. فرض کنیم که تمام ملکولها کره ای شکل و در فرآیند برخوردشان کاملاً ارتجاعی باشند.

فشار گاز با نیروی وارده بر يك دیواره ظرف در اثر برخوردهای ملکولی طبق شکل ۱-۱۴ مشخص می شود. ضربه وارده بر دیواره به وسیله هر ذره با رابطه زیر معلوم می شود:

$$\delta F d\tau = M^* v_z - M^* (-v_z) = 2 M^* v_z \quad (1-38)$$

$M^*$  جرم ذره و  $v_z$  مؤلفه سرعت در جهت محور  $z$  است. مقدار این مؤلفه در يك برخورد کاملاً الاستیک، قبل و بعد از برخورد، یکی خواهد بود. حال سطح کوچک  $dA$  را در نظر بگیرید. شدت برخورد ملکولها به این سطح عبارت است از نرخ جریان ملکولها در جهت محور  $z$  یا:

$$\dot{n} = n dA v_z \quad \text{ملکول بر ثانیه} \quad (1-39)$$



شکل ۱-۱۴ تفسیر فشار يك گاز ایده آل از دید تئوری جنبشی

$n$  چگالی ملکولی (ملکولها بر واحد حجم) است. اگر حرکت ملکولی را بی نظم در نظر بگیریم، فقط نیمی از ملکولها به طرف پائین در حرکتند، به طوری که شدت جریان ملکولی مورد نظر برابر است با:

$$\dot{n}_z = \frac{1}{2} n dA v_z \quad (1-40)$$

بنابر این کل ضربه رسیده به سطح در زمان  $d\tau$  به صورت حاصل ضرب معادلات (۱-۳۸) و (۱-۴۰) است:

$$\delta F d\tau = (2M^* v_z) \left( \frac{1}{2} n v_z dA d\tau \right)$$

لذا نیرو بر واحد سطح یا فشار عبارت است از:

$$\frac{F}{dA} = p = M^* n v_z^2 \quad (1-41)$$

در حقیقت کلیه ملکولها با سرعت یکسان حرکت نمی کنند و ضریب سرعت در معادله (۱-۴۱) باید مقدار متوسطی باشد. کاملاً منطقی است که حرکت ملکولها را در تمام جهات به طور نامنظم فرض کنیم به طوری که هر مؤلفه کاملاً نظیر دیگری باشد. داریم:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

فرض "بی نظمی" <sup>۱</sup> به این معنی است که:

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2} \quad (1-42)$$

علامت خط تیره نشان دهنده مقدار متوسط است. نوشتن مجدد معادله (۱-۴۱) با توجه به معادله (۱-۴۲) نتیجه می دهد که:

$$p = \frac{1}{3} n M^* \overline{v^2} \quad (1-43)$$

حاصل ضرب  $nM^*$  جرم بر واحد حجم را نشان می دهد که البته عکس حجم مخصوص (حجم بر واحد

جرم) است لذا معادله (۱-۴۳) را می توان به صورت زیر نوشت :

$$pv = \frac{1}{3} \overline{v^2}$$

یا

$$pV = m \frac{1}{3} \overline{v^2} \quad (1-44)$$

معادله (۱-۴۴) نظیر همان معادله (۱-۳۴) است در صورتی که رابطه زیر برقرار باشد :

$$\frac{1}{3} \overline{v^2} = RT \quad (1-45)$$

بدین ترتیب دما در این تفسیر جنبشی گاز ایده آل، نشان دهنده میزان انرژی جنبشی متوسط ملکولهای گاز است .

## مثال ۷-۱

سرعت متوسط مجذوری<sup>۱</sup> (ریشه دوم میانگین مجذورهای چند عدد) ملکولهای اکسیژن را در ۷۰ °F و ۱۴/۷ psia محاسبه کنید. به صورت زیر تعریف شده است :

$$v_{rms} = (\overline{v^2})^{1/2}$$

حَلّ : از معادله (۱-۴۵) برای محاسبه میانگین مجذور سرعت و در نتیجه مقدار  $v_{rms}$  استفاده می کنیم:

$$\overline{v^2} = 3 RT \quad (a)$$

ثابت گاز برای اکسیژن به صورت زیر محاسبه می شود :

$$R_{O_2} = \frac{\mathfrak{R}}{M_{O_2}} = \frac{1545}{32} = 48.3 \text{ ft.lbf/lbm.}^\circ\text{R} = 259.9 \text{ J/kg.K} \quad (b)$$

یادآور می شویم که در موقع کار با کمیت های دینامیکی بایستی از  $g_c$  به طور مناسبی استفاده شود .

چون با سیستم آحاد پوند جرم - پوند نیرو کار می‌کنیم،  $g_c = 32/174 \text{ lbm.ft/lbf.s}^2$  و مشخص است که انرژی جنبشی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$KE = \frac{1}{2g_c} mv^2$$

این بدان معنی است که رابطه  $(a)$  شامل  $g_c$  می‌باشد زیرا  $\overline{v^2}$  نشان دهنده انرژی جنبشی است، داریم:

$$\overline{v^2} = 3 RT = (3)(48.3)(460 + 70) = 7.67 \times 10^4 \text{ ft.lbf/lbm}$$

دقت کنید که یک ضرب ساده با  $g_c$  واحدهای مناسب را برای  $\overline{v^2}$  به دست می‌دهد.

$$\overline{v^2} = (7.67 \times 10^4 \text{ ft.lbf/lbm}) (32.174 \text{ lbm.ft/lbf.s}^2)$$

$$\overline{v^2} = 2.47 \times 10^6 \text{ ft}^2/\text{s}^2$$

بدین ترتیب سرعت متوسط مجذوری برابر است با:

$$v_{\text{rms}} = (\overline{v^2})^{1/2} = (2.47 \times 10^6)^{1/2} = 1570 \text{ ft/s} = 478.5 \text{ m/s}$$

در تجزیه و تحلیل فوق الذکر چندین شرط محدود کننده باید اعمال گردد که در فصلهای بعد درباره آن بحث خواهیم کرد. اکنون خواننده باید به این حقیقت واقف باشد که تجزیه و تحلیل میکروسکپی ممکن است برای به دست آوردن تفسیرهای با ارزش فیزیکی از پدیده‌های قابل رؤیت (پدیده‌های ماکروسکپی) به کار گرفته شود. تجزیه و تحلیل میکروسکپی حتی در مورد ساده‌ای که در بالا اشاره کردیم  $(a)$  دما را به وسیله انرژی جنبشی ملکولی تشخیص داده است،  $(b)$  "گاز ایده آل" را به صورت گازی بابر خوردهای کاملاً الاستیک فرض کرده است، و حرکت ملکولی گاز ایده آل را به صورت کاملاً نامنظم در نظر گرفته است. نتایج  $(b)$  و  $(c)$  مفروضات اولیه برای فرموله کردن این مدل بودند. این حقیقت که مفروضات بالا به پیش بینی قانون گاز ایده آل منجر می‌گردند، خود دلیلی بر صحت آنها است.

### خود آزمایی (سؤالات مروری)

۱ - اصطلاحات زیر را توضیح دهید:

(الف) سیستم (ه) محیط (ط) فاز

(ب) حالت	(و) شبه ساکن	(ی) جزء
(ج) خاصیت	(ز) کار و حرارت	(ک) ابعاد و آحاد
(د) فرآیند	(ح) مرز	

- ۲- مقیاسهای دما برای کار آزمایشی را تعریف کنید.
- ۳- کار را تعریف کنید.
- ۴- قانون اول ترمودینامیک چیست؟
- ۵- یک پدیده فیزیکی را که نتیجه قانون دوم ترمودینامیک باشد، تشریح کنید.
- ۶- آحاد اصلی در سیستم SI چه هستند؟
- ۷- چرا پوند جرم و پوند نیرو با هم فرق دارند؟
- ۸- کیلوپوند بزرگتر است یا نیوتن؟
- ۹- آحاد حرارتی انرژی را تشریح کنید.
- ۱۰- چرا  $g$  شتاب ثقل نیست؟
- ۱۱- محیط پیوسته یا یکپارچه چیست؟
- ۱۲- گاز ایده آل چیست؟
- ۱۳- منظور از عبارت فشار چیست؟
- ۱۴- مول چیست؟
- ۱۵- عبارتهای فشار نسبی و خلأ چه معنی دارد؟
- ۱۶- چرا مفهوم تعادل در تشریح سیستمهای ترمودینامیکی اهمیت دارد؟
- ۱۷- درباره تشابه بین یک جسم آزاد و مفهوم یک سیستم ترمودینامیکی توضیح دهید.
- ۱۸- فرآیند شبه ساکن چیست؟
- ۱۹- حرارت و دما چگونه به هم مربوط می شوند؟
- ۲۰- چرا خواص ترمودینامیکی لازمند؟
- ۲۱- چه عاملی حالت یک سیستم ترمودینامیکی را مشخص می کند؟
- ۲۲- حجم مخصوص چیست؟
- ۲۳- بازده حرارتی یک موتور حرارتی، را تعریف کنید.



- ۲۴ - عملکرد يك دستگاه تيريد را چگونه می توان مشخص نمود ؟
- ۲۵ - قانون دوم حرکت نيوتن چیست ؟
- ۲۶ - يك بی تی یو چیست ؟
- ۲۷ - يك كيلو پوند - نیرو چیست ؟

## مسائل (آحاد مختلط)

- ۱ - ۱ يك نیروی ۱ نیوتنی بر جرم ۳ lbm اعمال می شود. شتاب جرم مذکور را بر حسب  $\text{ft/s}^2$  محاسبه و مقدار  $g$  مناسب را برای این سیستم به خصوص آحاد تعیین نماید.
- ۱ - ۲ دو جسم هرکدام به جرم ۱ lbm ، ۴ اینچ از یکدیگر فاصله دارند. نیروی جاذبه ثقلی بین آنها را محاسبه کنید. این نیرو چه شتابی بر حسب  $\text{ft/s}^2$  تولید می کند ؟
- ۱ - ۳ با فرض اینکه قطر زمین ۸۰۰۰ مایل باشد، جرم معادل زمین را با استفاده از شتاب ثقل در سطح دریا ( $32/174 \text{ ft/s}^2$ ) و قانون جاذبه ثقل نیوتن محاسبه کنید.
- ۱ - ۴ وزن جسمی به جرم ۱ slug در نقطه ای با شتاب ثقل  $10 \text{ ft/s}^2$  چقدر است ؟
- ۱ - ۵ دو هادی موازی ۱ فوتی هرکدام دارای شدت جریان ۱۰۰۰ آمپر بوده و  $1/5$  اینچ از یکدیگر فاصله دارند، نیروی جاذبه بین هادیها را بر حسب واحد lbf محاسبه کنید.
- ۱ - ۶ جسمی به وزن ۱ lbf در نقطه ای با  $11 \text{ ft/s}^2 = g$  تحت اثر يك نیروی ۱ نیوتنی قرار دارد، شتاب را محاسبه کنید.
- ۱ - ۷ چه نیروئی بر حسب نیوتن برای شتاب دادن ۱ slug به مقدار  $1 \text{ ft/s}^2$  لازم است ؟
- ۱ - ۸ ۵ پوند جرم نیتروژن در ظرفی در  $10 \text{ psia}$  و  $500^\circ\text{F}$  قرار دارد. حجم ظرف، تعداد ملکولهای موجود در آن، و همچنین سرعت rms را برای ملکولها محاسبه کنید.
- ۱ - ۹ هوا ( $M = 28/97$ ) از فشار و دمای استاندارد اتمسفر ( $14.7 \text{ psia}$ ،  $59^\circ\text{F}$ ) تا  $300 \text{ psia}$  و  $300^\circ\text{F}$  متراکم می شود. حجم ابتدایی هوا  $1 \text{ ft}^3$  است. حجم را تحت شرایط فشار زیاد محاسبه کنید.
- ۱ - ۱۰ نیتروژن در تانکی به حجم  $3/5 \text{ m}^3$  در فشار  $10 \text{ MPa}$  و دمای  $40^\circ\text{C}$  قرار دارد. جرم را بر حسب کیلوگرم محاسبه کنید.

- ۱-۱۱ يك قطعه كروچك فلزی در سفینه ای وزن شده است كه شتاب ثقل آن برابر  $3 \text{ m/s}^2$  می باشد. وزن مشاهده شده  $10 \text{ N}$  است. جرم قطعه را بر حسب کیلوگرم و سایر واحدها محاسبه نمائید.
- ۱-۱۲ سرعت rms ملکولهای نیتروژن را در دمای  $100^\circ\text{C}$  محاسبه کنید.
- ۱-۱۳ مقداری اکسیژن از  $100 \text{ kPa}$  و  $50^\circ\text{C}$  تا  $200 \text{ kPa}$  و دمای  $100^\circ\text{C}$  تراکم شده است. درصد تغییر حجم حاصله از این تراکم را محاسبه نمائید.
- ۱-۱۴ چه تعداد ملکول در  $1$  پوند مول هوا وجود دارد؟
- ۱-۱۵ دماهای زیر را به درجه سانتی گراد تبدیل کنید.
- (الف)  $40^\circ\text{F}$  - (ب)  $^\circ\text{F}$  (ج)  $1000^\circ\text{F}$
- (د)  $2500^\circ\text{R}$  (ه)  $1300 \text{ K}$
- ۱-۱۶ جرم مخصوص گازهای زیر را در شرایط مشخص شده محاسبه نمائید. جوابها را بر حسب  $\text{kg/m}^3$  و  $\text{lbm/ft}^3$  بیان کنید.
- (الف) هوا در  $1 \text{ atm}$  و  $68^\circ\text{F}$
- (ب) اکسیژن در  $500 \text{ psia}$  و  $300^\circ\text{F}$
- (ج) اکسیژن در  $3 \text{ MPa}$  و  $200^\circ\text{C}$
- (د) هلیوم ( $M=4$ ) در  $50 \text{ psia}$  و  $400^\circ\text{F}$
- (ه) هلیوم در  $100 \text{ kPa}$  و  $20^\circ\text{C}$
- (و) دی اکسیدکربن ( $M=44$ ) در  $3 \text{ psia}$  و  $100^\circ\text{F}$
- (ز) دی اکسیدکربن در  $10 \text{ kPa}$  و  $50^\circ\text{C}$
- ۱-۱۷ ظرفی به يك پمپ خلا متصل شده و تا فشار مطلق  $10^{-9} \text{ atm}$  تخلیه شده است. تعداد ملکولهای هوا در واحد حجم را در این فشار پائین و  $70^\circ\text{F}$  محاسبه نمائید.
- ۱-۱۸ نیروی مرزی<sup>۱</sup> وارده بر يك جسم غوطه ور در يك سیال با وزن سیال جابه جا شده برابر است. بالونی به قطر  $10 \text{ ft}$  پر شده از هلیوم در فشار  $3 \text{ psig}$  و  $70^\circ\text{F}$  را در نظر بگیرید. نیروی خالص بالا برنده بالون را اگر در هوای اتمسفری استاندارد در  $14/7 \text{ psia}$  و  $70^\circ\text{F}$  رها شود، محاسبه کنید. از وزن بالون صرف نظر می شود.

- ۱- ۱۹ سرعت rms ملکولهای هیدروژن را در گاز با دمای  $1000\text{ K}$  محاسبه کنید .
- ۱- ۲۰ تعداد ملکولهای هوا را در اتاقی به ابعاد  $20$  در  $20$  در  $10\text{ ft}$  محاسبه کنید .
- ۱- ۲۱ فشار وارده به وسیله یک ستون  $1$  فوت از جیوه را محاسبه کنید .
- ۱- ۲۲ یک سیال ویژه مانومتر با جگالی مخصوص  $2/95$  برای اندازه گیری فشار  $17/5\text{ psia}$  در نقطه ای با فشار بارومتریک  $28/9\text{ inHg}$  به کار می رود. سیال مانومتر چه ارتفاعی را ثبت خواهد کرد ؟
- ۱- ۲۳ جرمی  $3$  کیلوگرمی تا سرعت  $20\text{ ft/s}$  شتاب داده شده است. کار لازم برای انجام این شتاب را بر حسب واحدهای (الف)  $\text{ft.lbf}$  ، (ب) ژول (ج)  $\text{Btu}$  محاسبه کنید .
- ۱- ۲۴ اگر دو جرم بزرگ  $1000$  کیلوگرمی که به فاصله  $300\text{ ft}$  از هم قرار دارند از حالت سکون رها شوند، با فرض اینکه هر کدام در فضای آزاد از اصل جاذبه ثقل نیوتن پیروی کنند، سرعت آن دو در فاصله  $50$  فوت از یکدیگر، محاسبه کنید .
- ۱- ۲۵ دو هادی موازی  $6$  فوتی که هر کدام حامل شدت جریان  $10000$  آمپر است،  $2$  اینچ از هم فاصله دارند. نیروی جاذبه بین آنها را بر حسب  $\text{lbf}$  محاسبه کنید .
- ۱- ۲۶ در ظرفی محتوی اکسیژن در فشار  $80\text{ psia}$  و دمای  $500^\circ\text{F}$  تعداد ملکولهای  $\text{O}_2$  برخورد کننده با جداره بر واحد سطح و در واحد زمان را محاسبه کنید .
- ۱- ۲۷ مسئله ۲۶- ۱ را برای فشار  $10^{-5}\text{ atm}$  و دمای  $100^\circ\text{F}$  - تکرار کنید .
- ۱- ۲۸ ثابت خورشیدی، فلوی انرژی خورشیدی است که به لبه خارجی اتمسفر می رسد و دارای مقدار  $444/2\text{ Btu/h.ft}^2$  می باشد. این ثابت را بر حسب واحدهای  $\text{cal/in}^2$  ،  $\text{W/cm}^2$  ،  $\text{J/h.in}^2$  بیان کنید .
- ۱- ۲۹ در ارزشیابی اقتصادی سیستمهای انرژی معمولاً هزینه به ازای هر میلیون  $\text{Btu}$  انرژی، عددی است که برای مقایسه انتخابهای مختلف به کار می رود. برای هر کدام از منابع زیر ارزش انرژی را بر حسب این واحد بیان کنید :

منبع	واحد هزینه	ظرفیت حرارتی
گاز طبیعی	$4/1000\text{ ft}^3$ دلار	$1000\text{ Btu/ft}^3$
بنزین	$1/5\text{ gal}$ دلار	$14000\text{ Btu/gal}$
الکتریسته	$0/08\text{ kWh}$ دلار	

- ۱-۳۰ فرض کنید يك اتومبیل با سرعت  $60 \text{ mi/h}$  به میزان  $12 \text{ mi/gal}$  بنزین مصرف کند، با استفاده از اطلاعات مسأله ۱-۲۹ میزان هزینه انرژی و ارزش سوخت مصرفی در مایل را محاسبه کنید.
- ۱-۳۱ نیتروژن در ظرفی با فشار  $25$  اتمسفر و دمای  $75^\circ\text{C}$  نگهداری می‌شود. جرم گاز را در ظرفی به حجم  $1000 \text{ cm}^3$  محاسبه کنید.
- ۱-۳۲ برای شتاب دادن اتومبیلی به جرم  $4800 \text{ lbm}$  تا سرعت  $60 \text{ mi/h}$  چقدر کار لازم است؟
- ۱-۳۳ تقریباً  $80$  گالری برای ذوب  $1$  گرم یخ لازم است. يك واحد متداول برای بیان ظرفیت تبرید "تن" است که عبارت است از انرژی لازم برای انجماد  $1$  تن آب در مدت زمان  $24$  ساعت. مقدار تن تبرید را بر حسب  $\text{Btu/h}$  و  $\text{kW}$  بیان کنید.
- ۱-۳۴ در يك نیروگاه بخار بزرگ، حرارتی که باید در يك دریاچه نزدیک آن تلف شود، معادل  $2800 \text{ MW}$  ( $1 \text{ MW} = 10^6 \text{ Watts}$ ) است. از آب دریاچه برای انجام عمل سرمایش استفاده شده و در ضمن جریان در نیروگاه درجه حرارتش به مقدار  $12^\circ\text{F}$  بالا می‌رود. اگر جرم هر گالن آب  $8/33 \text{ lbm}$  و برای افزایش دمای هر پوند جرم به مقدار  $1^\circ\text{F}$  انرژی به مقدار  $1 \text{ Btu}$  لازم باشد، تعداد گالنه‌ای آب سرد لازم در هر دقیقه را محاسبه کنید.
- ۱-۳۵ سیستم قابل جایگزینی برای مسأله ۱-۳۴ پیشنهاد شده که در آن از يك برج خنک کننده بزرگ برای دفع حرارت به وسیله تبخیر آب استفاده می‌شود. اگر برای تبخیر هر پوند جرم آب  $1040 \text{ Btu}$  لازم باشد، برای دفع  $2800 \text{ MW}$  چه تعداد گالن آب باید در هر دقیقه تبخیر شود؟
- ۱-۳۶ يك شخص متوسط روزانه حدود  $3000 \text{ kcal}$  انرژی غذایی مصرف می‌کند. فرض کنید که انرژی خورشید بعد از جذب در اتمسفر به میزان  $200 \text{ Btu/h.ft}^2$  به سطح زمین برسد (البته این عددی است که در يك مدت زمان  $8$  ساعته معدل گیری شده است)، برای جذب انرژی خورشیدی معادل با انرژی غذایی مصرفی روزانه يك شخص چه مقدار  $\text{ft}^2$  لازم است؟
- ۱-۳۷ يك سیکل قدرت بخار برای تولید  $300000 \text{ kW}$  طراحی شده و انرژی مصرفی در سیکل  $13500 \text{ Btu/kWh}$  توان تولیدی آن است. دو سوخت را در نظر بگیرید:
- (الف) ذغال سنگ با ظرفیت انرژی  $12500 \text{ Btu/lbm}$  و ارزش  $35$  دلار به ازای هر تن،

(ب) گاز طبیعی با ظرفیت انرژی  $1000 \text{ Btu/ft}^3$  و ارزش  $2/5$  دلار به ازای هر  $1000 \text{ ft}^3$  هزینه کارکردی سیکل را در هر ساعت برای هر کدام از سوختها محاسبه نماید.

### مراجع

- 1 Stimson, H. F.: The International Temperature Scale of 1948, *J. Res. Natl. Bur. Std.* (paper, 1962), vol. 42, p. 211, March 1949.
- 2 Holman, J. P.: "Experimental Methods for Engineers," 4th ed., McGraw - Hill Book Company, New York, 1984.
- 3 Hatsopoulos, G. N., and Keenan, J. H.: "Principles of General Thermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
- 4 Sears, F. W.: "Thermodynamics," 2d ed., Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1953.
- 5 Barber, C. R.: The International Practice Temperature Scale of 1968, *Metrologia*, Vol. 5, no. 2, p. 35, 1969.
- 6 Cohen, E. R., and Taylor B. N.: The 1973 Least-Squares Adjustment of the Fundamental Constants, *J. Phys. Chem. Ref. Data.*, vol. 2, no. 4, 1973.
- 7 The Metric System of Measurement: Interpretation and Modification of the International System of Units for the United States, *Federal Register*, vol. 41, no. 239, pp. 54018-54019, Dec. 10, 1976.
- 8 Mechtly, E. A.: "The International System of Units, Physical Constants, and Conversion Factors, Revised", NASA SP-7012, 1973.



## فصل ۲

### قانون اول ترمودینامیک

#### ۲-۱ مقدمه

قانون اول ترمودینامیک به زبان ساده به صورت اصل بقای انرژی بیان شده است، ولی کاربرد عمومی آن در عمل می تواند کاملاً پیچیده باشد زیرا همه انواع انرژی هایی که در یک فرآیند شرکت دارند باید به دقت شناسایی شوند. حتی با شناختن انواع انرژی ها هم تجزیه و تحلیل مسأله الزاماً ساده نخواهد بود.

در این فصل سعی می کنیم تا اصل بقای انرژی را به طریقی مطرح کنیم که بتوان آن را صریحاً به شکل تحلیلی بیان نمود. تجزیه و تحلیل سیستمها بر اساس قانون اول ترمودینامیک به صورت محاسبه انواع انرژی و موازنه آنها بر طبق اصل بقای انرژی می باشد. تاکنون مردّد بوده ایم که بگوییم قانون اول به صورت این و یا آن معادله است و بیشتر به یک تجزیه و تحلیل گیج کننده پرداخته ایم در حالیکه اصل ساده فیزیکی، حداقل گاهی فراموش شده است. اگر چه تکراری به نظر می رسد ولی بهتر است یادآوری کنیم که تمام فرمولهای تحلیلی فقط بیان ریاضی اصول فیزیکی است. نکته اساسی قابل توجه "اصل بقا" است، و اگر تردیدی در مورد یک تجزیه و تحلیل وجود داشته باشد، باید آن را بررسی کرد و مطمئن شد که با اصول فیزیکی مطابقت دارد.

پس از بیان قانون اول به صورت تحلیلی می توان فوراً آنرا در مورد هر سیستم مهندسی مورد نظر به کاربرد. کاربرد هرچه بیشتر اصل بقای انرژی، لزوم معرفی اطلاعاتی در مورد خواص ترمودینامیکی و روابط بین آنها را ایجاب می کند. این اطلاعات اضافی به منظور مطالعه انواع فرآیندهای

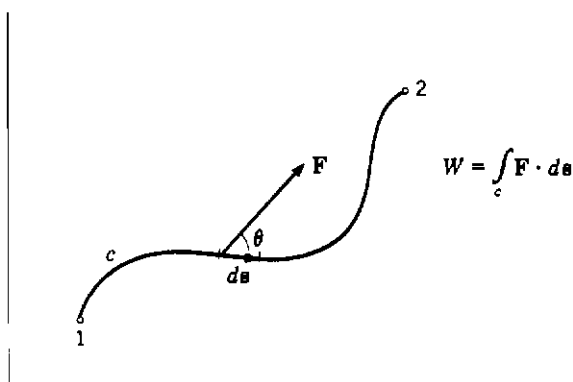
به کار رفته در کاربردهای مهندسی لازم است.

## ۲-۲ کار

کار به صورت انرژی صرف شده توسط یک نیروی عمل کننده در طول یک تغییر مکان تعریف شده و از نظر ریاضی به صورت زیر بیان می گردد.

$$W = \int_c \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = \int F \cos \alpha \, ds \quad (2-1)$$

حاصل ضرب داخلی<sup>۱</sup> بردارهای نیرو و تغییر مکان نشان می دهد که در محاسبه کار فقط مؤلفه نیرو در جهت تغییر مکان در نظر گرفته شده است. این محاسبه در شکل ۲-۱ نشان داده شده که در آن نیرو در امتداد مسیر مشخصی حرکت می کند. کل کار انجام شده به وسیله انتگرال خطی در طول مسیر مشخص می شود. فوراً به این نتیجه می رسیم که کار بستگی به مسیر دارد زیرا یک انتگرال مسیری<sup>۲</sup> برای محاسبه کار باید ارزشیابی شود.



شکل ۲-۱ تعریف کار

1- Dot product

2- Path integral



## قرارداد علامت برای کار

نکته قابل توجه علامت قراردادی برای کار است که در معادله (۲-۱) به آن اشاره شده است. اگر بردارهای نیرو و تغییر مکان در یک جهت باشند کار انجام شده مثبت و اگر در خلاف جهت یکدیگر باشند کار منفی خواهد بود. به عبارت دیگر اگر نیرویی در جهت راست وارد شده و به سمت راست تغییر مکان دهد، کار مثبت ولی اگر نیرو به سمت راست وارد شده و به سمت چپ تغییر مکان دهد کار منفی است.

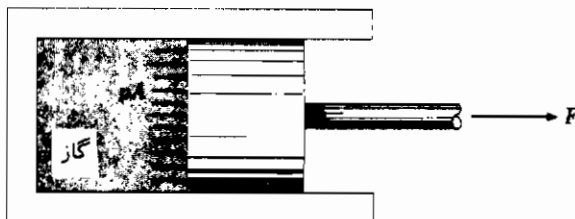
معادله (۲-۱) تعریف تحلیلی بنیادی کار بوده و همیشه می توان از آن به عنوان مبنائی برای محاسبه کار استفاده کرد. حال برای بهتر نشان دادن این محاسبه، بعضی از کاربردهای معادله (۲-۱) را در مورد چند فرآیند ساده در نظر می گیریم.

## ۲-۳ کار انبساط یا تراکم در یک سیلندر

ابتدا انبساط یک گاز را در داخل سیلندر در پشت یک پیستون نظیر شکل ۲-۲ در نظر بگیرید. فشار داخل سیلندر  $p$  و حجم گاز با  $V$  نشان داده شده است. نیروی وارده بر پیستون عبارت است از:

$$F = p.A$$

$A$  سطح مقطع پیستون است که در برابر گاز قرار دارد. حرکت پیستون در جهت نیروی وارده بر آن است و تغییر مکان جزئی  $ds$  می تواند بر حسب تغییر در حجم گاز  $dV$  بیان شود:



شکل ۲-۲ کار انبساط در یک سیلندر

$$ds = \frac{dV}{A}$$

با ترکیب توابع نیرو و تغییر مکان، مقدار کار انجام شده به وسیله نیروی وارده بر پیستون برابر است با:

$$dW = pA \frac{dV}{A}$$

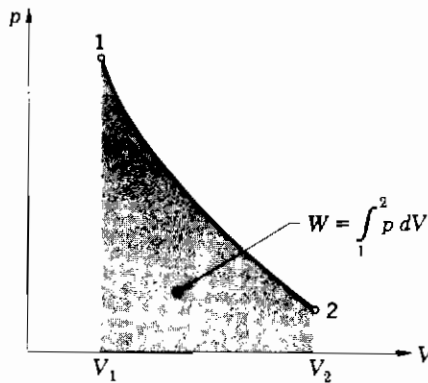
یا

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV \quad \text{کار انجام شده بر روی پیستون} \quad (2-2)$$

دقت کنید که کار انجام شده بر روی صفحه پیستون موقعی است که پیستون در جهت نیرو حرکت می‌کند، یعنی وقتی که  $dV$  مثبت باشد. این کار، کار انجام شده به وسیله نیروی فشار گاز بر روی پیستون است می‌توان آن را به صورت سطح زیر منحنی در شکل ۲-۳ نشان داد. حال اجازه دهید که اندکی در مورد سیستم‌های ترمودینامیکی فکر کنیم. اگر پیستون را به عنوان یک سیستم ترمودینامیکی انتخاب کنیم (یا جسم آزاد) کار انتقال یافته به مرز سیستم به وسیله نیروهای فشار گاز، از طریق معادله (۲-۲) نشان داده می‌شود. از طرفی اگر گاز داخل سیلندر را به عنوان سیستم ترمودینامیکی در نظر بگیریم، کار انتقال یافته به مرز سیستم منفی خواهد بود (با فرض این که  $dV$  مثبت باشد) زیرا بر دارهای نیرو و تغییر مکان در خلاف جهت یکدیگرند. اگر گاز را به عنوان سیستم در نظر بگیریم، معادله (۲-۲) را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم:

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} p \, dV \quad \text{کار انجام شده بر روی گاز به وسیله پیستون} \quad (2-2a)$$

از مثال ساده بالا معلوم می‌شود که علامت کار بستگی به سیستم انتخاب شده دارد. نظیر قراردادهای علامت موجود در مکانیک، نتیجه می‌گیریم که اگر نیروی وارد بر سیستم و تغییر مکان در یک جهت باشد کار انجام شده بر روی سیستم مثبت است در صورتی که کار انجام شده به وسیله سیستم منفی خواهد بود. همان‌طور که قبلاً متذکر شدیم در ترمودینامیک بیشتر بحث درباره کار انتقال یافته به مرز یک سیستم خواهد بود و نه درباره نیرو و تغییر مکان، ولی با وجود این باید به خاطر داشت که مفهوم بنیادی کار تصوّر یک نیروی عمل‌کننده در طول یک جابه‌جایی می‌باشد.



شکل ۲-۳ نمایش ترسیمی کار انبساطی

## سیستمهای باز و بسته

در مجموعه پیستون - سیلندر اگر سیال را به عنوان سیستم ترمودینامیکی در نظر بگیریم، سیستم را سیستم بسته می‌گویند. سیستم بسته سیستمی است که انتقال جرم در مرز آن صورت نگیرد. روشهای تحلیلی برای سیستمهای باز که انتقال جرم در مرز آنها امکان پذیر است، در فصل ۴ ارائه خواهد گردید.

## اثرات حالت غیر تعادلی

در فصل اول فرآیند شبه ساکن یا نیمه ساکن را به صورت یک سلسله حالت‌های تعادل متوالی تشریح کردیم. چنین فرآیندی برای گاز داخل سیلندر موقعی وجود دارد که انبساط به آهستگی صورت گرفته، فشار و دما در طول هر مرحله از فرآیند یکسان باقی بماند. اگر انبساط (یا تراکم) خیلی سریع انجام پذیرد ممکنست که فشار در سیلندر یکسان نباشد و در نتیجه نیروی فشار در صفحه پیستون نشان دهنده فشار در سایر نقاط سیلندر نیست. کار انتقال یافته به مرز سیستم هنوز هم از انتگرال گیری نیروها و تغییر مکانها در مرز سیستم محاسبه می‌شود، ولی حالت غیر تعادل هیچ رابطه ساده‌ای با حالت ترمودینامیکی گاز داخل سیلندر ندارد. یک بار دیگر از این بحث نتیجه می‌گیریم که کار پدیده‌ای است

که در مرز یک سیستم واقع می‌شود و قویاً به‌طریقه انجام یک فرآیند ترمودینامیکی بستگی دارد. حال اثر اصطکاک را در محاسبه کار انبساطی در سیلندر در نظر بگیرید. اصطکاک در سطح تماس بین پیستون و سیلندر وجود دارد و در جهت خلاف حرکت پیستون عمل می‌کند. بنابراین اصطکاک در جهت کاهش کار انتقال یافته به محیط خارج از مجموعه سیلندر - پیستون عمل می‌کند، حتی اگر فرآیند مربوط به گاز کاملاً به صورت شبه ساکن (نیمة ساکن) باشد. بعضی از اوقات ممکن است از سیستم ترمودینامیکی متشکل از گاز و پیستون صحبت شود زیرا غالباً کار حاصله از ترکیب این دو مورد توجه می‌باشد. در چنین سیستم مرکبی فقط در صورتی که پیستون آهسته حرکت کند و بدون اصطکاک باشد، فرآیند شبه ساکن خواهد بود. برای ارزیابی و محاسبه کار انجام شده بوسیله نیروهای مختلف عمل کننده بر روی جسم فقط تشکیل جسم آزاد لازم است. محاسبه به‌وسیله معادله (۲-۱) صورت می‌گیرد.

در بحث در مورد کار انبساطی در سیستم پیستون - سیلندر، گازی را به‌عنوان ماده واسطه موجود در سیلندر، در نظر گرفتیم. باید دقت نمود که معادله (۲-۲a) را در مورد مایع و یا جامد هم بخوبی می‌توان بکار برد. البته در این موارد برای تغییر قابل ملاحظه‌ای در حجم، به فشارهای خیلی بزرگی احتیاج است.

## ۲-۴ کار در میدان جاذبه ثقل

حال سیستمی متشکل از یک وزنه را در نظر بگیرید. می‌خواهیم کاری را محاسبه کنیم که صرف بالا بردن وزنه تا ارتفاع  $h$  در میدان جاذبه ثقل می‌شود. مجدداً جهت محاسبه کار، نیرو و تغییر مکان را باید مشخص نمود. همان‌طور که در شکل ۲-۴ نشان داده شده، نیرو برابر وزن بوده و عبارت است از

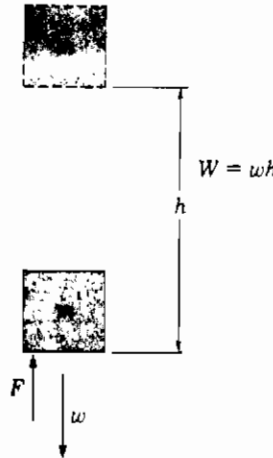
$$F = w = m \frac{g}{g_c}$$

کار انجام شده به‌وسیله این نیرو از معادله (۲-۱) برابر است با

$$W = \int_0^h F \cdot ds = \int_0^h w \cdot ds = wh \quad (2-3)$$

همان‌طور که در شکل ۲-۴ نشان داده شده به‌علامت قراردادی برای نیرو و تغییر مکان، و به این حقیقت

که کار انجام شده بر روی سیستم مثبت است، توجه داشته باشید.



شکل ۲-۴ کار لازم برای جابه‌جایی وزنه در میدان جاذبه نقل

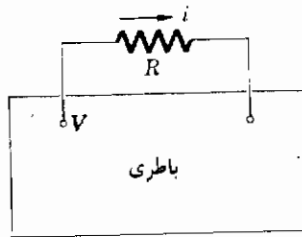
## ۲-۵ کار الکتریکی و مغناطیسی

یک سیستم ساده الکتریکی نظیر شکل ۲-۵ را در نظر بگیرید. باتری را به عنوان سیستم ترمودینامیکی در نظر گرفته و می‌خواهیم کار انجام شده در ضمن خالی شدن باتری از طریق مقاومت  $R$  را محاسبه کنیم. معنی فیزیکی کار در این مورد در واقع به یک نیروی الکتریکی لازم برای راندن بار الکتریکی از درون مقاومت مذکور مربوط می‌شود. یادآوری می‌کنیم که پتانسیل الکتریکی  $V$  عبارت است از پتانسیل برای انجام کار بر واحد بار الکتریکی. شدت جریان الکتریکی  $i$  میزان تغییرات بار الکتریکی نسبت به زمان است یا

$$q = \int i \, d\tau = i \, \Delta\tau$$

$\Delta\tau$  یک نمو زمانی مشخص است. بنابراین کار الکتریکی صرف شده در نمو زمانی  $\Delta\tau$  برابر است با:

$$W = Vi \, \Delta\tau \quad (۲-۴)$$



شکل ۵-۲ کار الکتریکی

در معادله (۲-۴)،  $W$  عبارت است از کار انجام شده به وسیله سیستم ترمودینامیکی (باتری) بر روی مقاومت، چون محاسبه به وسیله تجزیه و تحلیل نیروهای الکتریکی عمل کننده بر روی بارهای الکتریکی خارج از باتری صورت می گیرد. قرار داد علامتی که قبلاً پذیرفتیم ایجاب می کند که این کار همراه با یک علامت منفی باشد زیرا کار، توسط سیستم (باتری) انجام شده است. اگر مقاومت را به عنوان سیستم ترمودینامیکی انتخاب کرده بودیم، کار انجام شده مثبت بود. به عبارت ساده باتری توسط نیروهای الکتریکی بر روی مقاومت مذکور کار انجام می دهد.

بالاخره یک سیستم خیلی ساده را که شامل کار مغناطیسی است در نظر می گیریم. با توجه به شکل ۲-۶ می خواهیم کار انجام شده به وسیله حرکت یک هادی در یک میدان مغناطیسی  $B$  با سرعت  $v$  را محاسبه کنیم. نیروی وارده بر یک بار الکتریکی متحرک که در یک میدان مغناطیسی قرار دارد عبارت است از:

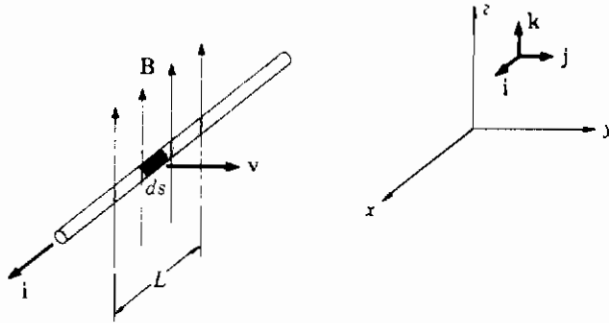
$$F = qv \times B \quad (2-5)$$

البته این نیرو سعی در جابه جا نمودن بارهای الکتریکی در هادی را داشته، در نتیجه جریانی در جهت نشان داده شده در شکل به وجود می آورد. سپس حرکت بارهای الکتریکی در جهت جریان، نیروی باز دارنده ای را ایجاد می کند که بر هادی مذکور وارد می شود. برای یک المان به طول  $ds$  از هادی داریم:

$$qv = \int i \, d\tau \frac{ds}{d\tau} = \int i \, ds \quad (2-6)$$

با قرار دادن معادله (۲-۶) در معادله (۲-۵) داریم:

$$\mathbf{F} = \int_0^L d\mathbf{s} \times \mathbf{B} = -iBL\mathbf{j} \quad (2-7)$$



شکل ۲-۶ کار انجام شده به وسیله هادی عبورکننده از میدان مغناطیسی

شدت انجام کار عبارت است از :

$$W = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} = \left( \int_0^L i d\mathbf{s} \times \mathbf{B} \right) \cdot \mathbf{v}$$

برای مختصات نشان داده شده در شکل ۲-۶ رابطه بالا به صورت زیر در می آید :

$$W = - (iBL\mathbf{j}) \cdot (v\mathbf{j}) = -iLBv \quad (2-8)$$

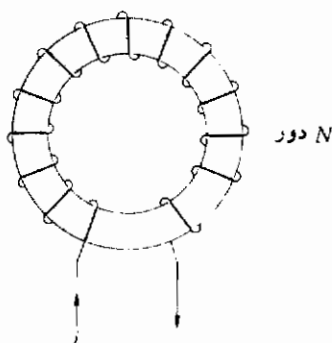
در این مثال هادی (مجموعه بارهای الکتریکی) را به عنوان سیستم ترمودینامیکی در نظر گرفته، کار انجام شده بر روی هادی به وسیله میدان مغناطیسی را محاسبه می کنیم. نیروی نشان داده شده در معادله (۲-۷) نیروی باز دارنده ای است که به وسیله میدان مغناطیسی بر هادی وارد می شود. برای به حرکت در آوردن هادی در این میدان باید یک نیروی خارجی برابر با نیروی  $F$  اما در جهت عکس آن اعمال نمود. کار انجام شده بر روی هادی به وسیله این نیروی خارجی عبارت است از :

$$W = +iLBv \quad (2-8a)$$

این مثال شبیه به مسئله محاسبه کار لازم برای بالا بردن یک وزنه در میدان جاذبه ثقل می باشد. در این مثال کار نیروی خارجی در میدان مغناطیسی و در مسئله جاذبه ثقل، کار نیروی خارجی در میدان جاذبه ثقل

ذخیره شده است.

سیستم دیگری که شامل کار مغناطیسی است در شکل ۷-۲ نمایش داده شده است. مساحت سطح مقطع هسته حلقوی  $A$  و طول محیط آن  $L$  می باشد. چگالی فلوی مغناطیسی  $B$ ، تعداد سیم پیچ های اطراف حلقه  $N$  و شدت جریان  $i$  است. محاسبه کار انجام شده در موقع تغییر شدت جریان در سیم پیچ اطراف حلقه مورد نظر است. بر اساس قانون القای الکترو مغناطیسی فاراده<sup>۱</sup> نیروی محرکه الکتریکی القا شده  $E$  (emf) برابر است با:



شکل ۷-۲ کار مغناطیسی بر روی هسته حلقوی

$$E = N \frac{d(BA)}{d\tau} \quad (۷-۹)$$

و کار انجام شده در طول زمان  $d\tau$  عبارت است از:

$$dW = Ei d\tau = N Ai dB$$

شدت مغناطیسی  $H$  از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$H = \frac{Ni}{L}$$

بنابراین:

1- Faraday's law

۲- بهتر بود برای کار به جای علامت  $d$  از علامت  $\delta$  استفاده می شد (مترجم).



$$dW = ALH dB \quad (۲-۱۰)$$

توجه داریم که  $AL$  حجم کل سیم پیچ بوده به طوری که کار را می توان به صورت زیر نوشت:

$$dW = VH dB \quad (۲-۱۱)$$

در این مورد مشاهده می کنیم که کار مولد نیرو عبارت از کاری است که برای غلبه بر نیروی ضد محرکه سیم پیچ لازم است. محاسبه در مورد یک سیم پیچ حلقوی انجام شده اما برای سیم پیچهای باریک طویل با سطح مقطع یکنواخت نیز معتبر می باشد.

### مثال ۲-۱ انبساط گاز در یک سیلندر

گازی در یک سیلندر بر طبق رابطه ثابت  $pV^{1.3} = C$ ، انبساط پیدا می کند. حجم اولیه گاز  $۱ \text{ ft}^3$ ، فشار اولیه آن  $۲۰۰ \text{ psia}$  و فشار نهایی آن  $۱۵ \text{ psia}$  می باشد. کار انجام شده به وسیله نیروی فشار گاز بر روی صفحه پیستون را محاسبه کنید.

**حل:** معادله (۲-۲) در این مسئله به کار می رود به طوری که:

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p dV$$

با استفاده از رابطه داده شده  $pV^{1.3} = C$  یا  $p = CV^{-1.3}$  بدین ترتیب:

$$W = \int_{v_1}^{v_2} CV^{-1.3} dV = -\frac{C}{0.3} (V^{-0.3})_{v_1}^{v_2} \quad (a)$$

اما  $C = p_1 V_1^{1.3} = p_2 V_2^{1.3}$ ، به طوری که:

$$W = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{-0.3} \quad (b)$$

حجم نهایی برابر است با:

$$V_2 = V_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{1/1.3}$$

$$V_2 = 1 \left( \frac{200}{15} \right)^{1/1.3} = 7.32 \text{ ft}^3 \quad (0.2073 \text{ m}^3)$$

با قرار دادن این مقدار در معادله (b) نتیجه می‌گیریم:

$$W = - \frac{(144)[(15)(7.32) - (200)(1)]}{0.3}$$

$$= 4.33 \times 10^4 \text{ ft.lbf} \quad (5.87 \times 10^4 \text{ J})$$

## مثال ۲-۲ کار مغناطیسی

یک هادی به طول ۱ فوت که حامل شدت جریان ۱۰ آمپر است از یک میدان مغناطیسی با چگالی فلوی مغناطیسی  $1 \text{ Wb/m}^2$  می‌گذرد. میدان و هادی همان طور که در شکل ۲-۶ نشان داده شده عمود بر یکدیگرند. نیروی لازم برای حرکت دادن هادی و شدت انجام کار را با سرعت  $15 \text{ ft/s}$  محاسبه کنید.

**حل:** اولین مرحله در حل این مسأله عبارت از هماهنگ کردن تمام کمیت‌های فیزیکی در یک سیستم آحاد است. سیستم متریک را که ساده‌ترین است انتخاب می‌کنیم.

$$L = 1 \text{ ft} = 0.305 \text{ m}$$

$$v = 15 \text{ ft/s} = 4.58 \text{ m/s}$$

از معادله (۲-۷) نیرو برابر است با

$$F = iBLj$$

$$= (10)(1)(0.305) = 3.05 \text{ N}$$

$$= 3.05 \hat{\mathbf{N}}$$

سپس مقدار کار بر واحد زمان از معادله (۲-۸a) به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$W = iBLv = (10)(1)(0.305)(4.58)$$

$$= 13.98 \text{ N} \cdot \text{m/s} = 13.98 \text{ J/s} = 13.98 \text{ W}$$

## ۲-۶ انرژی داخلی

در بخشهای قبلی نشان دادیم که چگونه کار انجام شده بر روی یک سیستم را می توان از طریق محاسبه انرژی صرف شده به وسیله یک نیروی عمل کننده در طول یک مسافت ارزیابی نمود. پس کار یک شکل از انرژی است که ممکن است از مرز یک سیستم عبور کند. مجدداً یادآوری می کنیم که برای انجام کار باید یک عکس العمل داخلی نیرو بین سیستم و محیط اطراف آن وجود داشته باشد. پس یک بار دیگر به این مطلب پی می بریم که کار بستگی به فرآیند دارد زیرا فقط در صورتی مشاهده می شود که سیستم از حالتی به حالت دیگر تغییر پیدا کند.

انرژی پتانسیل مفهوم آشنایی است که در مکانیک، الکترومغناطیس، و دیگر زمینه ها وجود دارد. مروری بر این مفهوم بی مناسبت نیست، زیرا به یک نوع عمومی تر انرژی که در ترمودینامیک بررسی می شود مربوط می گردد. یادآوری می شود که انرژی پتانسیل جاذبه ثقل قبلاً به صورت کار لازم برای بالا بردن یک وزنه تا ارتفاعی بالاتر از یک سطح مرجع تعریف شده است. انرژی جنبشی از طریق تعیین کار لازم برای شتاب دادن جسمی از حالت سکون تا سرعت مشخصی ارزیابی می گردد. بنابراین:

$$F = \frac{ma}{g_c} = \frac{m}{g_c} \frac{dv}{d\tau} = \frac{m}{g_c} \frac{dv}{ds} \frac{ds}{d\tau} = \frac{mv}{g_c} \frac{dv}{ds}$$

و

$$W = \int F \cdot ds = \int \frac{mv}{g_c} dv = \frac{1}{2g_c} mv^2 = KE \quad (2-12)$$

وقتی که سرعت یک سیستم از سرعت اولیه  $v_1$  تا سرعت نهایی  $v_2$  تغییر می کند، تغییر در انرژی جنبشی مربوطه آن عبارت است از:

$$KE_2 - KE_1 = \int_{v_1}^{v_2} \frac{m}{g_c} v dv = \frac{1}{2g_c} m(v_2^2 - v_1^2)$$

بدین ترتیب کار مربوط به شتاب را می توان به صورت انرژی جنبشی ذخیره شده تصور نمود. اگر حرکت جسم توسط بعضی نیروهای باز دارنده کند گردد، این انرژی به صورت کار انتقال یافته به مکانیزم بازدارنده، بازیابی می شود (با فرض این که از اتلاف در اثر اصطکاک صرف نظر شود). به همین طریق پتانسیل الکتریکی به صورت کار لازم برای جابه جا نمودن بار الکتریکی در

یک میدان الکتریکی تعریف می‌شود. در تمام این موارد مفهوم انرژی پتانسیل با کار مشخص شده است و تابعی از حالت سیستم بوده و به فرآیند خاص مورد نظر، بستگی ندارد. بنابراین انرژی جنبشی یک جسم، به حالت سکون آورده شده یا حتی به جهت بردار سرعت بستگی ندارد. همچنان که انرژی پتانسیل جاذبه ثقل هم به روشی که یک وزنه تا ارتفاع معینی بالا برده شده بستگی ندارد بلکه فقط به مقدار ارتفاع وابسته است. باز هم کاملاً توجه داشته باشید که مفهوم آشنای انرژی پتانسیل بر حسب کار تعریف شده است. به علاوه دقت کنید که کار انجام شده به وسیله نیروهای عمل کننده بر روی یک سیستم را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\Delta PE = W = PE_{\text{پایانی}} - PE_{\text{ابتدایی}} \quad (۲-۱۳)$$

البته این رابطه برای آن دسته بخصوص از سیستمهای مذکور که تنها ارتباطشان با محیط اطراف، به شکل کار می‌باشد نوشته شده است. لازم به تذکر است که اگر انواع کار، تنها آنهایی بودند که یک تابع انرژی پتانسیل در آنها قابل تعریف بود، تجزیه و تحلیل انرژی سیستمها در واقع مسأله ساده‌ای بود زیرا کار همیشه مستقل از فرآیند است. توجه کنید که شیوه‌های تعریف عبارات انرژی پتانسیل به طور اتوماتیک ما را مجبور می‌کند تا مقادیری را که بر حسب یک تابع پتانسیل ممکن است بیان شود از عبارات کار در معادله (۲-۱۳) خارج کنیم. همان طور که در مورد مکانیک به خاطر دارید اگر تنها کار انجام شده توسط یک سیستم آن کاری باشد که مستقل از مسیر است، سیستم راگنرواتیو<sup>۱</sup> می‌نامند. نیروهای وارده بر چنین سیستمی، نیروهای کنسرواتیو نامیده می‌شود. پس معادله (۲-۱۳) را می‌توان به صورت زیر تفسیر نمود.

کار انجام شده توسط نیروهای غیر کنسرواتیو = کار انجام شده توسط نیروهای کنسرواتیو

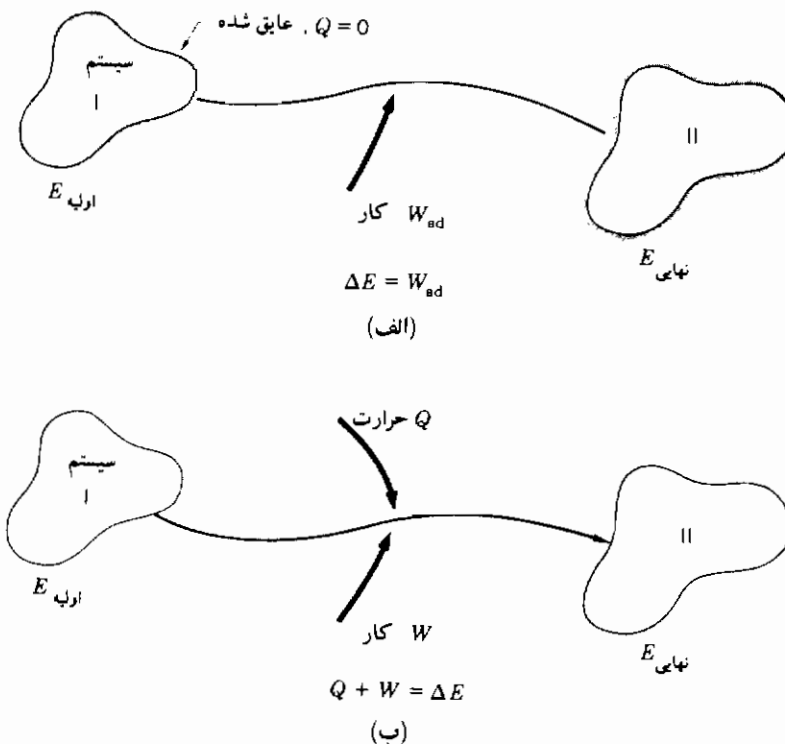
تابع انرژی داخلی کلی برای یک فرآیند آدیاباتیک<sup>۲</sup> (بی دررو)

معادله (۲-۱۳) تنها آن دسته از انرژیهای پتانسیل را می‌پذیرد که از طریق مفهوم نیروی

1- Conservative

2- Adiabatic process

کنسرواتو بیان شده است. قانون اول ترمودینامیک تعمیم مفهوم انرژی پتانسیل را مجاز می‌دارد. برای روشن کردن این اصل، سیستمی را که از حالت  $I$  به حالت  $II$  تغییر می‌کند، طبق شکل ۲-۸ در نظر بگیرید. اجازه دهید که سیستم را به صورت کاملاً عایق فرض کنیم، به طوری که هیچ گونه حرارتی به داخل و یا خارج از آن انتقال نیابد. تصریح می‌کنیم که تنها رابطه با محیط به شکل کار بوده و همه انواع کارهایی را که به صورت تغییراتی در توابع پتانسیل ممکن است بیان شود از این کار مستثنی می‌کنیم. به این ترتیب ما از کاری صحبت می‌کنیم که در حقیقت به وسیله محیط خارجی یا یک مکانیزم متصل به سیستم، انتقال یافته است. در نتیجه فرآیند، اصل بقای انرژی تعریف یک تابع عمومی انرژی داخلی  $E$  را میسر می‌سازد به طوری که :



شکل ۲-۸ اصل بقای انرژی برای سیستمی که از حالت  $I$  به حالت  $II$  تغییر می‌کند  
(الف) در فرآیند آدیاباتیک و (ب) در فرآیند عمومی شامل انتقال حرارت

$$E_{\text{نهایی}} - E_{\text{ابتدایی}} = \Delta E = W_{ad} \quad (۲-۱۴)$$

که  $W_{ad}$  نشان دهنده کار است. اندیس «ad» نشان می‌دهد که کار در یک فرآیند آدیاباتیک انجام شده است، یعنی جایی که هیچ گونه مبادله حرارت بین سیستم و محیط اتفاق نمی‌افتد. حرارت را نمی‌توان به صورت نیروئی اثرکننده در طول یک مسافت بیان نمود، لذا فعلاً از حذف آن ناگزیریم. بیان لغوی معادله (۲-۱۴) به صورت زیر است:

$$\text{کار آدیاباتیک انتقال یافته سیستم توسط} = \text{افزایش در انرژی داخلی}$$

$$\text{کلیه نیروهای عمل کننده بر روی سیستم}$$

از طریق آزمایش مشخص شده که صرف نظر از فرآیند، کار آدیاباتیک بین دو حالت ابتدایی و نهایی همیشه یکسان است. بنابراین نتیجه می‌گیریم که کمیت  $E$  یک خاصیت بوده و فقط تابع حالت سیستم می‌باشد. کمیت  $E$  انرژی داخلی سیستم نامیده می‌شود.

در فصل اول خاصیت یک سیستم را به صورت تابعی از حالت سیستم بیان کردیم، به عبارتی یک تابع نقطه‌ای، یا بهتر بگوییم کمیتی که تغییراتش بین دو حالت ابتدایی و نهایی به مسیر فرآیند به کار رفته بستگی ندارد. کمیت  $E$  با این تعریف مطابقت دارد لذا آن را یک خاصیت سیستم می‌نامیم. توجه کنید که تعریف  $E$  بر حسب کار آدیاباتیک، کمکی به ایجاد یک مقیاس مطلق برای انرژی داخلی یا یک سطح مبنا برای جدول بندی خواص مواد نمی‌کند. سطوح مبنا را نظیر نقاط مبنا برای مقیاس بین المللی دما می‌توان به طور دلخواه انتخاب کرد. اما تعیین مقادیر مطلق تابع انرژی داخلی تنها از طریق بررسیهای مفصل میکروسکوپی امکان پذیر است. نکته مهم این است که خاصیتی بنام  $E$  وجود دارد و وجود آن یک واقعیت تجربی است.

#### اثر حرارت

در مورد مفهوم تابع انرژی داخلی مطالب زیادی خواهیم گفت اما فعلاً اجازه دهید که اثر انتقال حرارت را در فرآیندی طی شده توسط یک سیستم بررسی کنیم. فرض کنید که سیستم مانند قبل فرآیندی را بین حالات ابتدایی و نهایی، یکسان طی کند ولی در اینجا سیستم عایق نشده، ممکن

است با محیط خارج مبادله حرارت داشته باشد. تغییر در انرژی داخلی مشابه گذشته است چون حالات ابتدایی و نهایی یکسان است، اما کار بر طبق اصل بقای انرژی به مقدار انرژی حرارتی اضافه شده، تغییر کرده است. لذا:

$$W + Q = W_{ad} \quad (2-15)$$

اگر انرژی حرارتی افزوده شود آن را مثبت و اگر سیستم انرژی حرارتی پس دهد آن را منفی تعریف می‌کنیم. معادله (۲-۱۵) با توجه به معادله (۲-۱۴) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Q + W = \Delta E \quad (2-16)$$

معادله (۲-۱۶) تفسیر فیزیکی بسیار ساده‌ای دارد. این معادله بیان‌کننده این است که، انرژی افزوده شده در مرز سیستم در اثر نیروهای وارده بر آن (کار) با اضافه تمام انرژیهای دیگری که به مرز سیستم افزوده شده است (حرارت) باید برابر با افزایش انرژی داخلی سیستم باشد یا:

$$\text{ذخیره انرژی در سیستم} = \text{انرژی افزوده شده به سیستم}$$

یا به عبارت دیگر

$$\text{انرژی داخلی نهایی} = \text{انرژی اضافه شده در مرز به صورت حرارت و کار} + \text{انرژی داخلی ابتدایی}$$

$$E_1 + W + Q = E_2 \quad \text{یعنی:}$$

در اینجا یادآوری می‌کنیم که بحث ما محدود به سیستمهای بسته یا سیستمهایی است که انتقال جرم در مرز سیستم وجود ندارد. در حالتی که انتقال جرم مجاز باشد، همراه آن انتقال انرژی هم وجود دارد. در فصل ۴ این انتقال انرژی را تجزیه و تحلیل خواهیم کرد.

## ۲-۲ قانون اول ترمودینامیک

معادله (۲-۱۶) غالباً به عنوان بیان تحلیلی قانون اول ترمودینامیک ارائه می‌گردد ولی باید

بخطا داشت که این معادله همان بیان اصل بقای انرژی بوده که در آن حرارت، کار، و انرژی داخلی را به صورت شکلهای مختلف انرژی مورد توجه قرار می‌دهیم. می‌توانیم معادله (۲-۱۶) را به عنوان تعریف حرارت بر حسب کار و انرژی داخلی در نظر بگیریم. از نقطه نظر فیزیکی

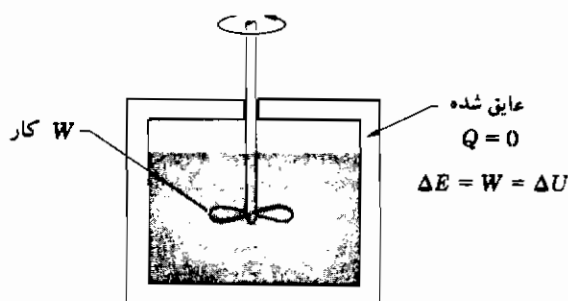
حرارت عبارت از مبادله انرژی با محیط اطراف است که به صورت یک نیروی وارده در طول یک مسافت (کار) نمی‌باشد.

دقت کنید که اصل بقا در مورد یک سیستم منزوی (سیستمی که هیچ گونه انرژی از مرز آن عبور نمی‌کند) کاملاً روشن است. بنابراین

$$\Delta E_{\text{منزوی}} = 0 \quad (2-17)$$

به عبارت دیگر، انرژی داخلی یک سیستم منزوی تغییر ناپذیر است؛ تنها می‌تواند از یک نوع به نوع دیگر تغییر یابد. استدلال این مطلب در شکل ۲-۸ نمایش داده شده است.

حال ماهیت تابع انرژی داخلی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. واضح است که انرژی داخلی، توابع انرژی پتانسیل نظیر انرژی جاذبه ثقل و جنبشی را در بر می‌گیرد و شامل سایر انواع انرژی داخلی نیز می‌گردد. برای نشان دادن این مطلب فرآیند نمایش داده شده در شکل ۲-۹ را در نظر بگیرید. با هم زدن آب در ظرفی که نسبت به محیط عایق شده کار انجام می‌دهیم. پس از هم زدن، آب مجدداً به حالت سکون برمی‌گردد. مشخص است که در این فرآیند انرژیهای جاذبه ثقل و جنبشی تغییر نمی‌کند،



شکل ۲-۹ فرآیندی که در آن کار صرف افزایش انرژی حرارتی داخلی سیستم می‌شود



اما در اثر عمل هم زدن به علت افزودن انرژی به آب، باید انرژی داخلی آن افزایش یابد. مثال مشابهی تراکم یک گاز در داخل سیلندر است. مجدداً اگر سیلندر عایق باشد، انرژی داخلی گاز بالا می‌رود. در هر دو سیستم فوق افزایش در کل انرژی داخلی سیستم، به علت تغییر در انرژی حرارتی داخلی آن می‌باشد. از جنبه فیزیکی، این انرژی حرارتی داخلی نتیجه انرژی جنبشی ملکولهای ماده است که سیستم را تشکیل می‌دهد و معمولاً با توجه به بالا بودن یا پایین بودن دمای سیستم مشخص می‌شود. انرژی حرارتی داخلی با علامت  $U$  نشان داده می‌شود. می‌توان انرژی شیمیایی ذاتی ماده را هم در نظر گرفت که می‌تواند کار خارجی تولید کند، مثل باتری که کار الکتریکی را به یک مدار خارجی منتقل می‌کند. می‌توانیم بررسی انرژی داخلی کل را با توجه به رابطه نسیت جرم - انرژی

$$E = mc^2$$

در مورد واکنش‌های هسته‌ای بیشتر از اینها گسترش دهیم.

رابطه زیر بحث درباره تابع انرژی داخلی را خلاصه می‌کند.

$$E = U + KE + PE + ChE + \dots \quad (2-18)$$

که انرژیهای الکتریکی، مغناطیسی، و هسته‌ای در مواقع لزوم ممکن است به این رابطه اضافه شود. حروف بزرگ ( $E$  و  $U$ ) برای نشان دادن مجموع خواص کل یک سیستم به کار می‌رود. حروف کوچک ( $e$  و  $u$ ) نشان دهنده خواص بر واحد جرم سیستم است. در بعضی شرایط از  $\bar{e}$  و  $\bar{u}$  برای نشان دادن خواص بر واحد مول ماده استفاده خواهیم کرد. واحدهای نمونه برای  $e$  و  $u$  Btu/lbm یا kJ/kg است. بار دیگر یادآوری می‌کنیم که معادله (۲-۱۶) مکانیزم انتقال انرژی را در فرآیندی نشان می‌دهد که سیستم از حالتی به حالت دیگر تغییر کند. حال فرض کنید که سیستم یک تغییر میکلی (چرخه‌ای) را طی کند، به عبارتی یک سلسله فرآیندهای پیوسته سیستم را متناوباً به حالت اولیه اش برگرداند. قانون اول را به صورت دیفرانسیلی برای تغییرات کوچک سیستم می‌توان چنین نوشت:

$$dQ + dW = dE$$

چون انرژی داخلی  $E$  فقط تابع حالت سیستم است، تغییراتش حول هر چرخه (سیکل) کامل باید برابر

صفر باشد.

$$\oint dQ + \oint dW = 0 \quad (2-19)$$

که علامت انتگرال فرآیند سیکلی را نشان می‌دهد.

به‌طور کلی باید تأکید شود که حرارت و کار تابع مسیر هستند و برای ارزیابی مقادیر آنها باید فرآیند مربوطه مورد نظر قرار گیرد. از طرف دیگر انرژی داخلی یک تابع حالت است و از نظر ریاضی به‌صورت زیر مشخص می‌شود:

$$\oint dE = 0$$

بنابر این به‌زبان ریاضی  $dE$  بیان دیفرانسیل کامل<sup>۱</sup> است در صورتی که  $dQ$  و  $dW$  دیفرانسیلهای غیر کامل<sup>۲</sup> می‌باشند. از این به‌بعد علامتهای اصلاح شده  $d'Q$  و  $d'W$  را برای نشان دادن این حقیقت که دیفرانسیلهای کار و حرارت به‌طور کلی توابع مسیر هستند، به‌کار خواهیم برد. در بعضی از نوشته‌ها دیفرانسیلهای مشخص شده با  $\delta W$  و  $\delta Q$  بر این واقعیت تأکید می‌کند که کار و حرارت بستگی به فرآیند دارند.

## ۲-۸ حرارت و گرمای ویژه

مشاهده کرده‌ایم که حرارت یک عکس العمل داخلی انرژی بین سیستم ترمودینامیکی و محیط اطرافش است؛ اگر چه این عکس العمل داخلی انرژی را نمی‌توان مانند کار به‌وسیله کاربرد یک نیرو در طول یک مسافت محاسبه نمود. بنابراین کار و حرارت به‌طور اساسی انواع مختلفی از انرژی می‌باشند. واضح است که ما حرارت را با دمای سیستم مربوط می‌کنیم زیرا معمولاً در موقع حرارت دادن سیستم درجه حرارت آن بالا می‌رود. مطالعه تکامل تاریخی ترمودینامیک نشان می‌دهد که زمانی دانشمندان حرارت را ماده‌ای به‌نام کالریک می‌پنداشتند که می‌توانست از جسمی به‌جسم دیگر ریخته شود، همان‌طور که آب داغ را می‌توان از جسمی به‌جسم دیگر یا از طریق ظرفی به‌ظرف دیگر ریخت

1- Exact differential

2- Inexact differential

بنابراین استدلال می‌کردند که حرارت در داخل جسم محبوس است. اکنون می‌دانیم که این عقیده درست نیست و حرارت نمی‌تواند در داخل یک سیستم باشد بلکه فقط عکس العمل داخلی سیستم نسبت به محیط اطراف است و در صورتی نمودار می‌گردد که سیستم از حالتی به حالت دیگر تغییر نماید.

آب داغ و آب سرد "شامل" مقدار حرارت یکسانی می‌باشند: ابتدا این طور نیست.

مفهومی که از تئوری قدیمی کالریک بجای مانده ظرفیت حرارتی و یا به قول امروزها گرمای ویژه است. اگر حرارتی باندازه  $d'Q$  به یک سیستم اضافه شود و در نتیجه باعث تغییر دمای آن به مقدار  $dT$  گردد، گرمای ویژه  $C$  با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$d'Q = C dT \quad (2-20)$$

یک سیستم ترمودینامیکی را در نظر می‌گیریم که تنها تغییرات در انرژی داخلی آن، در تابع انرژی حرارتی  $U$  وجود داشته باشد. به علاوه اجازه دهید فرض کنیم که تنها تبادل کار با محیط اطراف آنها می‌باشد که طبق شکل ۲-۲ در اثر تغییری در حجم سیستم به دست آمده است. در این فرآیند فرض بر این است که انواع دیگر کار وجود ندارد و حجم سیستم افزایش می‌یابد. برای چنین سیستمی معادله (۲-۱۶) را می‌توانیم چنین بنویسیم:

$$d'Q + d'W = dU \quad (2-21)$$

$$d'Q - p dV = dU$$

که  $p$  فشار سیستم است. قرار داد علامت برای کار را در موقع به دست آوردن معادله (۲-۲۱) به خاطر داشته باشید. سپس برای حرارت افزوده شده می‌توان نوشت:

$$d'Q = dU + p dV \quad (2-21a)$$

حال اگر این سیستم فرآیندی را در حجم ثابت طی کند یعنی  $dV = 0$ ، برای گرمای ویژه در حجم ثابت و بر واحد جرم می‌توان چنین نوشت:

$$dQ_v = c_v dT_v$$

یا

$$du_v = c_v dT_v$$

که در اینجا اندیسها نمایانگر تغییر در خواص سیستم تحت شرایط حجم ثابت است. (به خاطر داشته باشید که حروف بزرگ نشان دهنده خواص کل سیستم و حروف کوچک نشان دهنده خواص سیستم بر واحد جرم می باشد). بنابراین گرمای ویژه بر واحد جرم چنین نوشته می شود:

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (2-22)$$

اگرچه رابطه بالا برای سیستم بخصوصی به دست آمده ولی آن را به عنوان تعریف گرمای ویژه در حجم ثابت در نظر خواهیم گرفت. در این جا تفاوت مفهوم جدید را با تئوری قدیم کالریک متذکر می شویم. در مفهوم جدید گرمای ویژه به عنوان یک خاصیت سیستم در نظر گرفته شده که می توان آن را بر حسب سایر خواص سیستم، نظیر معادله (2-22) برای گرمای ویژه در حجم ثابت، بیان نمود. حال تصور کنید که سیستم ساده قبلی فرآیندی تحت فشار - ثابت را طی کند. انتقال حرارت بر واحد جرم چنین بیان می شود:

$$d'Q_p = du_p + p dv_p \quad (2-23)$$

انتالپی

خاصیت جدیدی به نام انتالپی<sup>۱</sup> را با رابطه زیر تعریف می کنیم:

$$h = u + pv \quad (2-24)$$

دیفرانسیل انتالپی عبارت است از:

$$dh = du + p dv + v dp$$

و در فشار ثابت :

$$dh_p = du_p + p dv_p \quad (۲-۲۵)$$

بنابراین :

$$dQ_p = dh_p = c_p dT_p$$

و

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (۲-۲۶)$$

بنابر این گرمای ویژه در فشار ثابت یک خاصیت سیستم بوده و همان طور که در معادله (۲-۲۶) نشان داده شده، می توان آن را بر حسب سایر خواص تعریف نمود.

واحدهای متداول برای گرمای ویژه عبارت است از  $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$  و  $\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$  ،  $\text{Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{F}$  و علامتهای  $\bar{c}_p$  و  $\bar{c}_p$  را برای مشخص نمودن گرمای ویژه در مبنای مولی به کار خواهیم برد.

می بینیم که به طور کلی، حرارت اضافه شده (بر اساس واحد جرمی) در یک فرآیند فشار ثابت مساوی است با تغییر انتالپی زیرا :

$$Q_p = \int dh_p = h_2 - h_1 \quad (۲-۲۷)$$

نظیر سایر خواص ترمودینامیکی، گرماهای ویژه هم با دما و فشار ماده تغییر زیادی می کند، و از داده های آزمایشی باید جهت به دست آوردن مقادیر منطقی آنها استفاده کرد. مقادیر گرمای ویژه را در محاسبات محدود متوسطی از دما، معمولاً می توان ثابت فرض نمود. برای مایعات و جامدات  $c_p$  و  $c_v$  تقریباً یکسان است در حالی که در مورد گازها اختلاف قابل ملاحظه ای بین آنها وجود دارد. جدول ۲-۱ بعضی مقادیر نمونه را نشان می دهد.

### مثال ۲-۳ کار چرخ پره دار

یک موتور مخلوط کن به قدرت ۱ hp برای هم زدن آب در یک مخزن طبق شکل ۲-۹ به کار

می‌رود. مخزن حاوی ۵۰ lbm آب است و عمل هم زدن به مدت یک ساعت انجام می‌گیرد. با فرض این که مخزن کاملاً عایق باشد، تغییر در انرژی داخلی آب را محاسبه کنید. همچنین افزایش دمای آب را با فرض این که فرآیند در حجم ثابت صورت گرفته و  $c_v$  برای آب  $1 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{F}$  باشد، محاسبه نمایید.

**حل:** ضرایب تبدیل مناسب برای این مسأله عبارت است از:

$$1 \text{ hp} = 550 \text{ ft.lbf/s} = 2545 \text{ Btu/h}$$

$$778.16 \text{ ft.lbf} = 1 \text{ Btu} = 1055 \text{ J}$$

جدول ۱ - ۲ مقادیر نمونه گرمای ویژه

$c_v$		$c_p$		ماده
$\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$	$\text{Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{F}$	$\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$	$\text{Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{F}$	
جامدات ( $20^\circ\text{C}$ )				
		۰ / ۸۹۶	۰ / ۲۱۴	آلومینیم
		۰ / ۳۸۳	۰ / ۰۹۱	مس
		۰ / ۴۵۲	۰ / ۱۰۸	آهن
		۰ / ۲۳۴	۰ / ۰۵۶	نقره
		۰ / ۱۳۴	۰ / ۰۳۲	تنگستن
		۰ / ۸۴	۰ / ۲۰۱	آجر
		۰ / ۷	۰ / ۱۶۷	پشم شیشه
		۲ / ۸	۰ / ۶۶۹	چوب (کاج)
مایعات ( $20^\circ\text{C}$ )				
		۴ / ۱۸	۱ / ۰	آب
		۰ / ۹۶۶	۰ / ۲۳۱	فریون ۱۲
		۴ / ۸	۱ / ۱۵	آمونیاک
		۱ / ۹	۰ / ۴۵	روغن موتور
		۰ / ۱۴	۰ / ۰۳۳	جیوه
		۲ / ۳۸	۰ / ۵۷	اتیلن گلیکول
گازها ( $1 \text{ atm}$ , $20^\circ\text{C}$ )				
۰ / ۷۱۸	۰ / ۱۷۱۵	۱ / ۰۰۵	۰ / ۲۴	هوا
۱۰ / ۱۷	۲ / ۴۳	۱۴ / ۳۲	۳ / ۴۲	هیدروژن
۰ / ۶۵۳	۰ / ۱۵۶	۰ / ۸۴۶	۰ / ۲۰۲	دی اکسید کربن

آب را به عنوان سیستم ترمودینامیکی در نظر گرفته و قانون اول را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$W + Q = \Delta U$$

که از تغییرات انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی صرف نظر شده است. افزایش در انرژی داخلی آب عبارت است از کار افزوده شده به آن در مدت ۱ ساعت، چون برای مخزن عایق شده  $Q = 0$ :

$$\begin{aligned}\Delta U = W &= (550)(3600) = 1.98 \times 10^6 \text{ ft.lbf} \\ &= 2545 \text{ Btu } (2.68 \times 10^6 \text{ J})\end{aligned}$$

در این محاسبه از انرژی جنبشی آب در مخزن صرف نظر شده است. این فرض در فرآیند هم زدن برای سرعت‌های کم قابل قبول است. از معادله (۲-۲۲) نتیجه می‌گیریم:

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

برای گرمای ویژه ثابت می‌توانیم مشتق را به طور تقریبی چنین بنویسیم:

$$c_v \approx \left( \frac{\Delta u}{\Delta T} \right)_v$$

یا

$$\Delta u = c_v \Delta T$$

از ضرب نمودن در جرم نتیجه می‌گیریم:

$$m \Delta u = \Delta U = mc_v \Delta T$$

حال افزایش در دما چنین محاسبه می‌گردد:

$$\Delta T = \frac{\Delta U}{mc_v} = \frac{2545}{(50)(1)} = 50.9^\circ \text{F} \quad (28.28^\circ \text{C})$$

## ۲-۹ گرمای ویژه برای گازهای ایده آل

در اینجا مناسب است که جهت ایجاد مبنایی برای محاسبات فصول آینده، رفتار گرمای ویژه

گازها را مورد بررسی قرار دهیم.

در فصل ۶ نشان داده خواهد شد که اگر گازی از معادله حالت (۱-۳۴) پیروی کند، یعنی:

$$pV = mRT$$

انرژی داخلی و انتالپی آن فقط تابع دما است. لذا می توان از معادلات (۲-۲۲) و (۲-۲۶) انتگرال گرفت.

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT \quad (2-28)$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \quad (2-29)$$

به علاوه اگر گرماهای ویژه ثابت باشد، نتایج ساده زیر به دست می آید:

$$u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1) \quad (2-30)$$

$$h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1) \quad (2-31)$$

یک گاز ایده آل از نقطه نظر میکروسکوپی گازی است که ملکولهای آن به قدر کافی از یکدیگر فاصله داشته باشد به طوری که انرژی داخلی آن را بتوان بر اساس انرژی جنبشی متوسط ملکولها محاسبه نمود. لذا همانطور که در تجزیه و تحلیل ساده بخش ۱-۱۶ نشان داده شد، این انرژی تابعی از دمای ماکروسکوپی گاز است. اگر گازی تا فشار زیادی متراکم گردد به طوری که ملکولها اجباراً به یکدیگر نزدیک شوند و عکس العمل داخلی میدان نیروهای ملکولی قابل ملاحظه باشد، در آن صورت انرژی داخلی تابعی از فشار و دما خواهد بود.

برای تأکید بر اهمیت انرژی داخلی یک گاز ایده آل، مجدداً آن را با حروف بزرگ می نویسیم:

**انرژی داخلی و انتالپی یک گاز ایده آل فقط تابعی از دما است.**

این واقعیت مهم مکرراً در محاسبات مربوط به موازنه انرژی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. اصطلاحات متفاوتی برای گازها در منابع مختلف وجود دارد. گازی که از معادله (۱-۳۱) پیروی می کند، بعضی مواقع از نظر حرارتی کامل<sup>۱</sup> گفته می شود. اگر گرماهای ویژه این گاز ثابت باشد،



آن را از نظر کالریکی کامل<sup>۱</sup> گویند. عبارات گاز ایده آل و گاز کامل به وسیله مؤلفین مختلف در مورد گازی به کار رفته که از معادله حالت  $pv = RT$  پیروی کند، و ما از این اصطلاحات در بخشهای بعدی استفاده خواهیم کرد. خواننده عبارات گاز ایده آل و گاز کامل را در این کتاب باید مترادف هم بداند. موضوع گرماهای ویژه با بیان مناسبی نظیر گاز ایده آل با گرماهای ویژه ثابت همراه خواهد بود. برای گازهای فشار پائین، گرماهای ویژه تقریباً ثابت است و در محدوده متوسطی از دما تغییر نمی‌کند. اگر محاسبات با فرض گرماهای ویژه ثابت انجام شود، مقادیر مناسب مورد استفاده مطابق جدول ۲-۲ خواهد بود.

رابطه مفید بین  $c_p$  و  $c_v$  برای یک گاز ایده آل را می‌توان چنین بدست آورد:

$$dh = c_p dT$$

$$du = c_v dT$$

از تفریق این عبارات نتیجه می‌گیریم:

$$dh - du = (c_p - c_v) dT$$

اما

$$dh = du + d(pv) = du + R dT$$

بنابراین:

$$R dT = (c_p - c_v) dT$$

و

$$R = c_p - c_v \quad (۲-۳۲)$$

بدین ترتیب به این نتیجه می‌رسیم که ثابت گازها را می‌توان به صورت تفاضل بین گرمای ویژه در فشار ثابت و گرمای ویژه در حجم ثابت، محاسبه نمود. یا اگر یکی از گرماهای ویژه به همراه ثابت گاز مشخص باشد، به سادگی گرمای ویژه دیگر قابل محاسبه است. بالاخره اگر گرماهای ویژه در مبنای مولی بیان شود:

جدول ۲-۲ خواص گازهای ایده آل در فشارهای پایین و دمای معمول محیط ۲۰°C

$\gamma$	$R$		$c_p$		$c_p$		وزن مولی	گاز
	$\text{ft-lbf/lbm}^\circ\text{R}$	$\text{J/kg.K}$	$\text{Btu/lbm}^\circ\text{F}$	$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$	$\text{Btu/lbm}^\circ\text{F}$	$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$		
۱/۴۰	۵۳/۲۵	۲۸۷/۱	۰/۱۷۱۵	۰/۷۱۸	۰/۲۴	۱/۰۰۵	۲۸/۹۷	هوا
۱/۴۱	۷۱۷	۴۱۲۷	۲/۴۳	۱۰/۱۷	۳/۴۲	۱۴/۳۲	۲/۰۱۱	هیدروژن، $\text{H}_2$
۱/۶۱	۳۸۱/۳	۲۰۷۸	۰/۷۵	۳/۱۴	۱/۲۵	۵/۲۳۴	۴/۰۰۳	هلیوم، $\text{He}$
۱/۳۲	۹۱/۴	۵۱۸/۷	۰/۴۰۳	۱/۱۸۷	۰/۵۳۲	۲/۲۲۷	۱۶/۰۴	متان، $\text{CH}_4$
۱/۳۳	۸۵/۱	۴۱۰/۱	۰/۳۳۱	۱/۴۰۷	۰/۴۴۱	۱/۸۱۷	۱۸/۰۲	بخار آب، $\text{H}_2\text{O}$
۱/۲۳	۵۹/۴	۳۱۹/۱	۰/۳۳۳	۱/۳۹۴	۰/۴۰۹	۱/۷۱۲	۲۱/۰۴	استیلن، $\text{C}_2\text{H}_2$
۱/۴۰	۵۵/۱۳	۲۹۱/۱	۰/۱۷۸	۰/۷۴۵	۰/۲۴۹	۱/۰۴۳	۲۸/۰۱	مونوکسید کربن، $\text{CO}$
۱/۴۰	۵۵/۱۲	۲۹۱/۱	۰/۱۷۷	۰/۷۴۱	۰/۲۴۸	۱/۰۳۸	۲۸/۰۲	نیتروژن، $\text{N}_2$
۱/۱۸	۵۱/۳	۲۷۱	۰/۳۵۷	۱/۴۹۵	۰/۴۲۲	۱/۷۱۷	۳۰/۰۷	اتان، $\text{C}_2\text{H}_6$
۱/۴۰	۴۸/۲۴	۲۵۹/۱	۰/۱۵۱	۰/۱۵۳	۰/۲۱۹	۰/۹۱۷	۳۲	اکسیژن، $\text{O}_2$
۱/۱۷	۳۸/۱۵	۲۰۸	۰/۰۷۴	۰/۳۱۰	۰/۱۲۳	۰/۵۱۵	۳۹/۹۴	آرگون، $\text{Ar}$
۱/۳۰	۳۵/۱	۱۸۸/۹	۰/۱۵۱	۰/۱۵۳	۰/۲۰۲	۰/۸۴۱	۴۴/۰۱	دی اکسید کربن، $\text{CO}_2$
۱/۱۲	۳۵	۱۸۸/۳	۰/۳۱۰	۱/۵۰۷	۰/۴۰۴	۱/۱۹۲	۴۴/۰۹	پروپان، $\text{C}_3\text{H}_8$
۱/۰۹	۲۱/۱	۱۴۳/۱	۰/۳۸۷	۱/۱۲	۰/۴۲۰	۱/۷۵۸	۵۸/۱۲	ایزوبتان، $\text{C}_4\text{H}_{10}$

$$\eta = \bar{c}_p - \bar{c}_v \quad (2-33)$$

یا اختلاف بین گرماهای ویژه مولی برای تمام گازهای ایده آل یک ضریب ثابتی است.

### چه زمانی گاز را می‌توان گاز ایده آل در نظر گرفت

خواننده ممکن است این سؤال را مطرح کند، که چه موقع یک گاز ایده آل است؟ از نقطه نظر میکروسکوپی، گاز موقعی ایده آل است که فاصله بین ملکولها زیاد باشد به طوری که میدان نیروهای ملکولی نقش مهمی در فشار وارده به وسیله گاز بر ظرف محتوی آن، نداشته باشد. این بدان معنی است که رفتار گاز ایده آل موقعی مشاهده می‌گردد که جرم مخصوص گاز خیلی کم باشد (تعداد ملکولها در واحد حجم نسبتاً کم باشد) اما هنوز مفهوم مناسبی برای پیش بینی محدوده‌ای از فشار و دما برای قابلیت کاربرد قانون گاز ایده آل عنوان نکرده‌ایم. بخش ۱۳-۶ کتاب اطلاعاتی در این مورد در دسترس ما می‌گذارد. در حال حاضر از نظر خواننده، گازهایی نظیر هوا، نیتروژن، اکسیژن، هلیوم و غیره در فشار و دمای اتمسفر (۱ atm و ۲۰ °C) از معادله حالت گاز ایده آل پیروی می‌کنند.

موقعی که فشار گاز به قدر کافی پائین باشد چنان که از معادله حالت گاز ایده آل پیروی کند و بخواهیم تغییرات گرمای ویژه با دما را هم منظور کنیم، روابط تجربی جدول ۲-۳ را می‌توان به کار برد. باید دقت کرد که این عبارات فقط در فشارهای پائین مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مثال بخار آب در شرایط معمول اتمسفر، گاز ایده آل نیست، و از روابط جداول ۲-۳ و ۲-۳M برای محاسبه گرمای ویژه آن در فشار اتمسفر نمی‌توان استفاده نمود.

### مثال ۲-۴ حرارت دهی در حجم ثابت

ظرفی به حجم ۱ ft<sup>3</sup> با هوا در فشار ۲۰ psia و ۱۰۰ °F پُر شده است. اگر ۱۰ Btu حرارت به آن افزوده گردد، فشار نهایی آن را محاسبه کنید. رفتار گاز را ایده آل گرماهای ویژه را ثابت فرض نمایید.

**حل:** هوا را به عنوان سیستم ترمودینامیکی و مخزن را به عنوان مرز سیستم انتخاب می‌کنیم و قانون

اول را چنین می‌نویسیم :

$$Q + W = \Delta U$$

از نظر محاسباتی در این فصل و فصول بعدی فرض خواهیم کرد که گازهای جدول ۲-۲ بجز بخار آب رفتار گاز ایده‌آل دارند مگر این که خلاف این نظر بیان گردد.

جدول ۲-۳ گرمای ویژه مولی در فشار ثابت برای گازهایی با فشارهای خیلی پایین  
بر طبق مأخذ [1] آحاد انگلیسی

گاز یا بخار	$\bar{c}_{po}, \text{Btu/lb}\cdot\text{mol}\cdot^\circ\text{R}$ $T, ^\circ\text{R}$	محدوده $^\circ\text{R}$	حد اکثر خطا %
$\text{O}_2$	$\bar{c}_{po} = 11.515 - \frac{172}{\sqrt{T}} + \frac{1530}{T}$	540-5000	1.1
	$= 11.515 - \frac{172}{\sqrt{T}} + \frac{1530}{T}$	5000-9000	0.3
	$+ \frac{0.05}{1000} (T - 4000)$		
$\text{N}_2$	$\bar{c}_{po} = 9.47 - \frac{3.47 \times 10^3}{T} + \frac{1.16 \times 10^6}{T^2}$	540-9000	1.7
$\text{CO}$	$\bar{c}_{po} = 9.46 - \frac{3.29 \times 10^3}{T} + \frac{1.07 \times 10^6}{T^2}$	540-9000	1.1
$\text{H}_2$	$\bar{c}_{po} = 5.76 + \frac{0.578}{1000} T + \frac{20}{\sqrt{T}}$	540-4000	0.8
	$= 5.76 + \frac{0.578}{1000} T + \frac{20}{\sqrt{T}}$	4000-9000	1.4
	$- \frac{0.33}{1000} (T - 4000)$		
$\text{H}_2\text{O}$	$\bar{c}_{po} = 19.86 - \frac{597}{\sqrt{T}} + \frac{7500}{T}$	540-5400	1.8
$\text{CO}_2$	$\bar{c}_{po} = 16.2 - \frac{6.53 \times 10^3}{T} + \frac{1.41 \times 10^6}{T^2}$	540-6300	0.8
$\text{CH}_4$	$\bar{c}_{po} = 4.52 + 0.00737T$	540-1500	1.2
$\text{C}_2\text{H}_4$	$\bar{c}_{po} = 4.23 + 0.01177T$	350-1100	1.5
$\text{C}_2\text{H}_6$	$\bar{c}_{po} = 4.01 + 0.01636T$	400-1100	1.5
$\text{C}_8\text{H}_{18}$	$\bar{c}_{po} = 7.92 + 0.0601T$	400-1100	4 (est.)
$\text{C}_{12}\text{H}_{26}$	$\bar{c}_{po} = 8.68 + 0.0889T$	400-1100	4 (est.)

منبع: کالین [1].

جدول ۲-۳  $M$  گرمادهای ویژه مولی در فشار ثابت برای گازهای  
با فشارهای پایین، واحدها SI

گاز یا بخار	$\bar{c}_{p0}$ , kJ/kg-mol·K $T$ , K	محدوده K
$O_2$	$\bar{c}_{p0} = 48.212 - \frac{536.8}{\sqrt{T}} + \frac{3559}{T}$ $= 48.212 - \frac{536.8}{\sqrt{T}} + \frac{3559}{T}$ $+ 3.768 \times 10^{-4} (T - 2222)$	300-2800 2800-5000
$N_2$	$\bar{c}_{p0} = 39.65 - \frac{8071}{T} + \frac{1.5 \times 10^6}{T^2}$	300-5000
CO	$\bar{c}_{p0} = 39.61 - \frac{7652}{T} + \frac{1.38 \times 10^6}{T^2}$	300-5000
$H_2$	$\bar{c}_{p0} = 24.12 + 4.356 \times 10^{-3}T + \frac{62.41}{\sqrt{T}}$ $= 24.12 + 4.356 \times 10^{-3}T + \frac{62.41}{\sqrt{T}}$ $- 5.94 \times 10^{-4}(T - 2222)$	300-2200 2200-5000
$H_2O$	$\bar{c}_{p0} = 83.15 - \frac{1863}{\sqrt{T}} + \frac{17445}{T}$	300-3000
$CO_2$	$\bar{c}_{p0} = 67.83 - \frac{15189}{T} + \frac{1.82 \times 10^6}{T^2}$	300-3500
$CH_4$	$\bar{c}_{p0} = 18.92 + 0.055T$	300-830
$C_2H_4$	$\bar{c}_{p0} = 17.71 + 0.0887T$	200-650
$C_2H_6$	$\bar{c}_{p0} = 16.79 + 0.123T$	220-600
$C_8H_{18}$	$\bar{c}_{p0} = 33.16 + 0.453T$	220-600
$C_{12}H_{26}$	$\bar{c}_{p0} = 36.34 + 0.670T$	220-600

که  $\Delta KE$  و غیره ناچیز فرض می‌شوند. در این مورد کاری وجود ندارد، زیرا ظرف صلب بوده و نیروهای مربوط به فشار جابه‌جانی‌شوند. قانون اول چنین است:

$$Q = \Delta U = m(u_2 - u_1)$$

برای گاز ایده آل این رابطه به صورت زیر درمی‌آید:

$$Q = mc_v (T_2 - T_1) \quad (a)$$

جرم هوا عبارت است از

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{(20)(144)(1)}{(53.35)(560)} = 0.0963 \text{ lbm} \quad (0.04368 \text{ kg})$$

برای هوا  $c_v = 0.1715 \text{ Btu/lbm.}^\circ\text{F}$ ، لذا معادله (a) به صورت زیر در می آید:

$$10 = (0.0963)(0.1715) (T_2 - 100)$$

$$T_2 = 706^\circ\text{F} = 1166^\circ\text{R} \quad (374^\circ\text{C}, 647 \text{ K})$$

حال فشار نهایی را می توان محاسبه نمود

$$p = \frac{mRT}{V} = \frac{(0.0963)(53.35)(1166)}{1}$$

$$= 5980 \text{ lbf/ft}^2 = 41 \text{ psia} \quad (2.827 \times 10^5 \text{ Pa})$$

## مثال ۲-۵

نیتروژن در فشار ثابت از  $100^\circ\text{F}$  تا  $3000^\circ\text{F}$  حرارت داده می شود. درصد خطای حاصله از فرض رفتار گرمای ویژه ثابت از جدول ۲-۲ را در محاسبه انتقال حرارت، تعیین کنید.

**حل:** انتقال حرارت "واقعی" به ازای هر مول عبارت است از:

$$Q_p = \int_{T_1}^{T_2} \bar{c}_p dT \quad (a)$$

رابطه برای  $\bar{c}_p$  از جدول ۲-۳ گرفته می شود. سپس این نتیجه با رابطه زیر مقایسه می گردد:

$$Q_p = \bar{c}_p (T_2 - T_1) \quad (b)$$

در اینجا  $\bar{c}_p$  مقداری است که از روی اطلاعات جدول ۲-۲ محاسبه شده است. برای نیتروژن از

جدول ۲-۳ داریم:

$$\bar{c}_p = 9.47 - \frac{3.47 \times 10^3}{T} + \frac{1.16 \times 10^6}{T^2} \text{ Btu/lbm.mol.}^\circ\text{R}$$

$T$  بر حسب درجه رانکین است. بنابراین مقدار انتقال حرارت " واقعی " عبارت است از :

$$Q_p = \int_{T_1}^{T_2} \left( 9.47 - \frac{3.47 \times 10^3}{T} + \frac{1.16 \times 10^6}{T^2} \right) dT$$

$$= \left( 9.47 T - 3.47 \times 10^3 \ln T - \frac{1.16 \times 10^6}{T} \right) \Big|_{T_1}^{T_2} \quad (c)$$

که  $T_1 = 560^\circ \text{R}$  و  $T_2 = 3460^\circ \text{R}$ . از محاسبه معادله (c) نتیجه می گیریم :

$$Q_p = 22920 \text{ Btu/lbm.mol}$$

با استفاده از داده های جدول ۲-۲

$$Q_p = (28.02)(0.248)(3460 - 560) = 20100 \text{ Btu/lbm.mol}$$

بنابراین خطای حاصله از فرض گرمای ویژه ثابت برابر است با :

$$\text{خطا} = \frac{22920 - 20100}{22920} = 0.123 = 12.3 \text{ درصد}$$

این مثال لزوم در نظر گرفتن تغییرات گرمای ویژه را در مواقعی که با محدوده وسیعی از دما روبرو هستیم، نشان می دهد.

## مثال ۲-۶

مجموعه سیلندر - پیستون نشان داده شده به سطح مقطع  $4 \text{ cm}^2$  و حجم اولیه  $20 \text{ cm}^3$  حاوی هوای می باشد. هوا ابتدا در شرایط  $1 \text{ atm}$  و  $20^\circ \text{C}$  است. فزنی با ضریب تغییر شکل  $k_s = 1.00 \text{ N/cm}$  به پیستون متصل بوده که ابتدا در حالت سکون (بدون تغییر شکل) است. برای افزایش فشار تا  $3 \text{ atm}$  اتمسفر، چقدر حرارت باید به هوا داده شود؟ دستگاه با هوای اتمسفر احاطه شده است.

**حل :** سیستم مذکور در شکل نشان داده شده است. نیروی لازم برای متراکم کردن فنر عبارت است از

$$F_s = k_s x \quad (a)$$

که  $x$  جابه جایی از حالت تعادل می باشد. بنابراین کار لازم برای متراکم کردن فنر برابر است با <sup>۱</sup>

$$W_s = \int F_s dx = \int_0^x k_s x dx = \frac{1}{2} k_s x^2 = \Delta PE_s \quad (b)$$

حال هوا را به عنوان سیستم ترمودینامیکی در نظر بگیرید. کار از دو قسمت تشکیل شده است:

۱ - کار لازم برای متراکم نمودن فنر  $W_s$ .

۲ - کار لازم برای جابه جانا نمودن هوای محیط در  $1 \text{ atm}$  یا  $W_{surr} = -p\Delta V$  در صورتی که فشار محیط ثابت باشد.

$$Q + W_s + W_{surr} = \Delta U_{air} \quad (c)$$

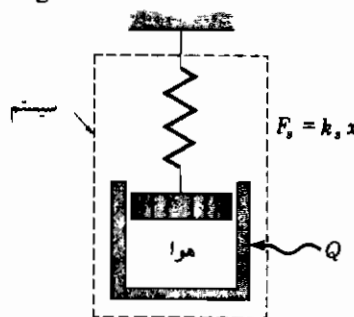
برای هوا، ثابت  $c_v \approx$  و

$$\Delta U_{air} = m_a c_v \Delta T_a \quad (d)$$

از جدول ۲-۲ داریم  $T_1 = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$

$$c_v = 0.1715 \text{ Btu/lbm}^\circ\text{F} = 718 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$m_a = \frac{p_1 V_1 M_a}{R T_1} = \frac{(1.0132 \times 10^5)(20 \times 10^{-6})(28.97)}{(8314)(293)} \\ = 2.41 \times 10^{-5} \text{ kg}$$



شکل مثال ۲-۶



اگر پیستون رابه عنوان یک جسم آزاد در نظر بگیریم، مشاهده می‌کنیم که فشار اولیه هوای موجود در سیلندر به وسیله فشار اتمسفری محیط اطراف کاملاً متعادل شده است و نیروی خالصی برابر با صفر باقی می‌گذارد که به وسیله فنر وارد می‌شود. در شرایط نهایی ۳ atm در سیلندر هنوز فشار موازنه کننده‌ای برابر با ۱ atm از طرف محیط داریم و ۲ atm فشار دیگر که بر سطح  $4 \text{ cm}^2$  اعمال می‌گردد به وسیله فنر تولید می‌شود. بنابراین:

$$F_{s2} = (2)(1.0132 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(4 \times 10^{-4} \text{ m}^2) = 81 \text{ N}$$

جابه جایی نهایی فنر از معادله (a) به دست می‌آید.

$$x = F_s/k_s = (81 \text{ N})/(100 \text{ N/cm}) = 0.81 \text{ cm}$$

حجم اضافی به خارج رانده شده به وسیله پیستون برابر است با:

$$A \Delta x = (4 \text{ cm}^2)(0.81 \text{ cm}) = 3.24 \text{ cm}^3$$

لذا حجم نهایی هوا عبارت است از:

$$V_2 = V_1 + 3.24 = 20 + 3.24 = 23.24 \text{ cm}^3$$

کار لازم برای جابه‌جا نمودن محیط برابر است با:

$$W_{surr} = -p_{atm} \Delta V = -(1.0132 \times 10^5)(3.24 \times 10^{-6}) = -0.3283 \text{ J}$$

دمای نهایی از قانون گاز ایده آل به دست می‌آید که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$m = \frac{p_2 V_2}{RT_2} = \frac{p_1 V_1}{RT_1}$$

به طوری که

$$T_2 = \frac{(293)(3)(23.24)}{(20)(1)} = 1021 \text{ K} = 748^\circ \text{C}$$

از معادله (b)

$$W_s = -\frac{1}{2} k_s x^2 = \frac{1}{2} (100 \text{ N/cm}) (0.81 \text{ cm})^2$$

$$= -32.81 \text{ N.cm} = -0.3281 \text{ J}$$

علامت منفی به کار می رود زیرا کار بر روی هوا (سیستم ترمودینامیکی) به وسیله فنر صورت گرفته است. هوا کار مثبت بر روی فنر انجام می دهد. همچنین از معادله (d)

$$\Delta U_a = (2.41 \times 10^{-5} \text{ kg})(718 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(748 - 20) = 12.60 \text{ J}$$

حال کل حرارت افزوده شده از رابطه انرژی معادله (c) بدست می آید.

$$Q = 0.3283 + 0.3281 + 12.6 = 13.26 \text{ J} \quad (0.0126 \text{ Btu})$$

در این مثال می بینیم که قسمت اعظم حرارت افزوده صرف بالا بردن دمای هوا شده تا آن جا که باعث افزایش فشار نیز می گردد.

## مثال ۲-۲ حرارت دهی در فشار ثابت

هوا در فشار ۱ atm و دمای  $20^\circ\text{C}$  حجم اولیه ای برابر با  $1000 \text{ cm}^3$  را در یک سیلندر اشغال می کند. هوا به وسیله پیستونی با نیروی بازدارنده ثابتی در سیلندر محبوس شده است به طوری که همیشه فشار گاز ثابت باقی می ماند. به هوا آنقدر حرارت داده می شود تا دمای آن به  $260^\circ\text{C}$  برسد. حرارت داده شده، کار انجام شده به وسیله گاز بر روی پیستون، و تغییر در انرژی داخلی گاز را محاسبه کنید.

**حل:** انتقال حرارت از رابطه زیر محاسبه می شود

$$Q_p = mc_p \Delta T_p \quad (a)$$

همان طوری که قرار شده انجام دهیم، رفتار گرمای ویژه را ثابت فرض می کنیم. با یادآوری اینکه جرم ملکولی هوا  $28/97$  می باشد، ثابت گاز برای هوا عبارت است از:

$$R = \frac{\dot{Q}}{M} = \frac{8314 \text{ J/kg.mol.K}}{28.97 \text{ kg/kg mol}} = 287 \text{ J/kg.K}$$

(که می‌توانست مستقیماً از جدول ۲-۲ بدست آید) و جرم به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{(1.0132 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(1000 \times 10^{-6} \text{ m}^3)}{(287 \text{ J/kg.K})(293 \text{ K})}$$

$$= 1.205 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

و انتقال حرارت عبارت است از:

$$Q_p = (1.205 \times 10^{-3} \text{ kg}) (1.005 \times 10^3 \text{ J/kg.}^\circ\text{C})(260 - 20)$$

$$= 290.6 \text{ J} \quad (0.275 \text{ Btu})$$

کار انجام شده به وسیله پیستون توسط معادله (۲-۲) داده شده است:

$$W = \int p \, dV$$

این رابطه برای فرآیندی در فشار ثابت به صورت زیر در می‌آید:

$$W = p(V_2 - V_1) \quad (b)$$

حجم نهایی از طریق رابطه پایین محاسبه می‌گردد

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = mR = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

یا

$$V_2 = V_1 \frac{p_1}{p_2} \frac{T_2}{T_1} = (1000)(1) \left( \frac{533}{293} \right) = 1819 \text{ cm}^3$$

حال کار از معادله (b) محاسبه می‌شود

$$W = (1.0132 \times 10^5 \text{ Pa})(1819 - 1000)(10^{-6})$$

$$= 82.98 \text{ J} \quad (0.079 \text{ Btu})$$

کار انجام شده بر روی گاز برابر همین مقدار ولی با علامت منفی است یا

$$W \text{ (بر روی گاز)} = - 82.98 \text{ J}$$

اگر ما هوا را به عنوان سیستم ترمودینامیکی انتخاب کنیم، تغییر در انرژی داخلی هوا با کاربرد معادله (۱-۲) به دست می آید (با صرف نظر کردن تمام کمیت‌های موجود در تابع  $E$  بجز  $U$ ):

$$Q + W = \Delta U$$

$$290.6 - 82.48 = \Delta U = 207.6 \text{ J} \quad (0.197 \text{ Btu})$$

به خاطر این که هوا گاز ایده آل با گرمای ویژه ثابت فرض شده می‌توانیم تغییر انرژی داخلی را مستقیماً از رابطه زیر محاسبه کنیم

$$\Delta U = mc_v (T_2 - T_1) \quad (c)$$

از جدول ۲-۲،  $c_v = 718 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ، بنابراین

$$\Delta U = (1.205 \times 10^{-3} \text{ kg})(718 \text{ J/kg}^\circ\text{C})(260 - 20) = 207.6 \text{ J}$$

که منطبق با محاسبات قبل ما می‌باشد. توجه کنید که  $\Delta U$  با  $c_v$  محاسبه شده است هر چند که فرآیند در فشار ثابت است. این نتیجه این واقعیت است که  $U$  برای گازهای ایده آل تنها تابع دما می‌باشد. هر وقت دما در معادله (c) مشخص گردید مقدار  $\Delta U$  تعیین می‌گردد، صرف نظر از فرآیند صورت گرفته، زیرا  $U$  یک خاصیت یا تابع حالت می‌باشد.

به طور خلاصه مقدار  $290.6/6$  حرارت که به هوا اضافه شده است صرف بالابردن انرژی داخلی به مقدار  $207.6/6$  و انتقال  $82.48/89$  کار به محیط اطراف سیستم (پیستون) شده است.

## مثال ۸-۲ تراکم در دمای ثابت

گاز ایده آلی که از معادله حالت  $pV = mRT$  پیروی می‌کند، در یک سیلندر به طریقی تراکم می‌شود که دما ثابت باقی می‌ماند (فرآیند ایزوترمال). عبارتی برای کار انجام شده بر روی گاز

به دست آوردید و مقدار کار را موقعی که ۲ kg هلیوم از شرایط 1 atm و ۲۰ °C تا ۱ MPa با ثابت ماندن دما تراکم شود را محاسبه نمایید. همچنین گرمای اضافه شده و تغییر در انرژی داخلی را محاسبه کنید.

**حل :** معادله (۲-۲a) را به کار می‌بریم، با علم به این که

$$p = \frac{mRT}{V} \quad (a)$$

بنابراین

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} \frac{mRT}{V} dV \quad (b)$$

چون  $T$  ثابت است از معادله بالا نتیجه می‌گیریم

$$W = - mRT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (c)$$

مجدداً چون دما ثابت است،

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$$

و لذا رابطه (c) را به صورت زیر داریم

$$W = - mRT \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (d)$$

حال می‌توانیم مقدار کار را برای هلیوم محاسبه کنیم. ثابت گاز برابر است با

$$R = \frac{\Re}{M} = \frac{8314 \text{ J/kg} \cdot \text{mol} \cdot \text{K}}{4 \text{ kg/kg} \cdot \text{mol}} = 2078.5 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

و یا مستقیماً از جدول ۲-۲ به دست می‌آید

$$W = - (2 \text{ kg})(2078.5 \text{ J/kg} \cdot \text{K})(293 \text{ K}) \ln \frac{1.0132 \times 10^5}{1 \times 10^6} = 2.789 \text{ MJ}$$

اگر ما، هلیوم را به عنوان سیستم ترمودینامیکی در نظر بگیریم، قانون اول ترمودینامیک چنین نوشته می‌شود

$$Q + W = \Delta U$$

اما به ما گفته شده است که: تابعی تنها از دما = (گاز ایده آل)  $U$

بنابراین اگر تغییر دمایی نباشد (فرآیند ایزوترمال)، تغییر انرژی داخلی وجود ندارد پس  $\Delta U = 0$  و

$$Q = -W = -2.789 \text{ MJ}$$

## مثال ۹-۲ حرارت دهی به اتاق

۲۰ نفر در یک مهمانی در اتاق کوچکی به ابعاد  $25 \text{ ft} \times 30 \text{ ft}$  و ارتفاع  $8 \text{ ft}$  شرکت می‌کنند. هرنفر در ساعت  $450 \text{ Btu}$  حرارت به محیط پس می‌دهد. با فرض این که اتاق کاملاً مسدود و عایق باشد، افزایش دمای آنرا در طول  $15$  دقیقه محاسبه کنید. فرض کنید که هرنفر حجم  $2/5 \text{ ft}^3$  را اشغال می‌کند.

**حل:** در این مسئله هوای اتاق را به عنوان سیستم ترمودینامیکی در نظر می‌گیریم و فرض می‌کنیم که افراد در یک فرآیند حجم ثابت حرارت به هوای اتاق می‌افزایند. حجم اتاق برابر است با

$$V_{\text{اتاق}} = (30)(25)(8) = 6000 \text{ ft}^3 \quad (169.9 \text{ m}^3)$$

با کسر حجم اشغال شده توسط افراد از این مقدار، حجم هوا بدست می‌آید.

$$V_{\text{هوا}} = 6000 - (20)(2.5) = 5950 \text{ ft}^3 \quad (168.5 \text{ m}^3)$$

با فرض این که فرآیند حرارت دهی در حجم ثابت در شرایط استاندارد اتمسفری  $14.7 \text{ psia}$  و  $70^\circ \text{F}$  شروع شود، جرم هوا برابر است با

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{(14.7)(144)(5950)}{(53.35)(530)} = 445.4 \text{ lbm} \quad (202 \text{ kg})$$

برای فرآیند حجم - ثابت

$$c_v \approx \left( \frac{\Delta u}{\Delta T} \right)_v$$

و

$$\Delta U_v = m c_v \Delta T_v \quad (a)$$

تغییر در انرژی داخلی هوا برابر با حرارت افزوده شده توسط افراد می‌باشد، چون

$$Q + W = \Delta U \quad (b)$$

و احتمالاً هیچگونه کاری بر روی هوا انجام نشده، زیرا نیروی فشار در مرز سیستم از طریق جابه‌جایی اعمال نمی‌شود. بنابراین:

$$\Delta U = (20)(450) = 9000 \text{ Btu/h} \quad (2637 \text{ W})$$

یا برای مدت زمان ۱۵ دقیقه

$$\Delta U = \frac{15}{60} (9000) = 2250 \text{ Btu} \quad (2133 \text{ kJ})$$

حال افزایش دما از معادله (a) چنین محاسبه می‌گردد

$$\Delta T = \frac{\Delta U}{mc_v} = \frac{2250}{(445.4)(0.1715)} = 29.46^\circ \text{F} \quad (16.37^\circ \text{C})$$

این مسأله لزوم تهویه مناسب را موقمی که افراد زیادی در یک فضای کوچک قرار دارند، نشان می‌دهد.

## ۲-۱۰ فرآیندهای گاز ایده‌آل

در مثالهای قبلی از روابط گاز ایده‌آل برای شماری از فرآیندها به‌طور قابل ملاحظه‌ای استفاده گردید. برای نشان دادن رفتار سیستم، برای موارد خاصی از جمله دمای ثابت (ایزوترمال)، حجم ثابت و غیره، موازنه انرژی به‌عمل آمد. در این جای‌آوری می‌کنیم که فقط سیستمهای بسته (که در آنها جرم از مرز سیستم عبور نمی‌کند) مورد بررسی قرار گرفتند. حال می‌خواهیم که فرآیندهای گاز ایده‌آل را به‌طور عمومی‌تری مدنظر قرار دهیم. روابط تحلیلی که در اینجا به‌دست می‌آید برای هر دو مورد

سیستمهای بسته (که در این فصل بررسی شد) و سیستمهای باز (که در فصل چهارم درباره آن بحث خواهد شد، کار بُرد دارد.

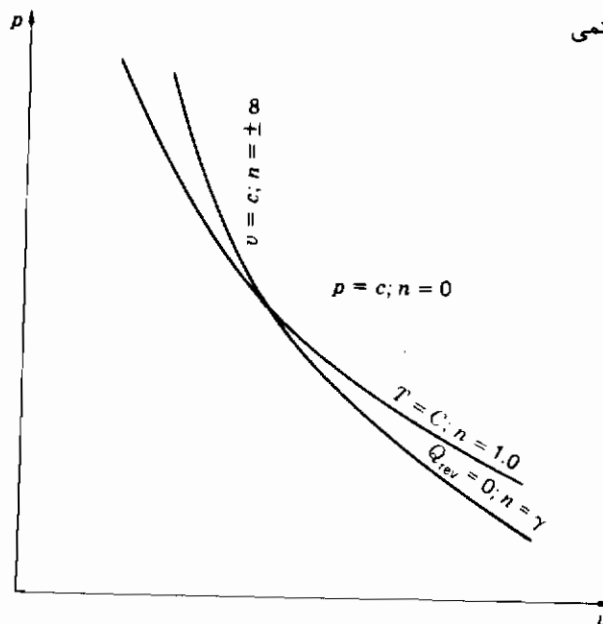
ابتدا اصطلاحاتی را که در مورد فرآیندهای خاصی به کار می‌رود به طور خلاصه بیان می‌کنیم.

- ۱ - دمای ثابت یا ایزوترمال
- ۲ - فشار ثابت یا ایزوباریک
- ۳ - حجم ثابت عبارت است از ایزومتريک یا ایزوگرئیک<sup>۱</sup>
- ۴ - انتقال حرارت صفر یا آدیاباتیک (یعنی کاملاً در مرز عایق شده باشد)

فرآیند پلی‌تروپیک فرآیندی است که رابطه زیر در مورد آن صادق باشد.

$$pv^n = \text{ثابت} = C \quad (2-34)$$

یا در شکل لگاریتمی



شکل ۲-۱۰ فرآیند پلی‌تروپیک بر طبق، ثابت  $pv^n =$



$$\ln p = -n \ln v + \ln C \quad (۲-۳۵)$$

که  $n$  نمای پلی تروپیک نامیده می شود. برای یک گاز ایده آل

$$pv = RT \quad (۲-۳۶)$$

و می توان معادلات (۲-۳۴) و (۲-۳۵) را با معادله (۲-۳۶) مقایسه نمود و چهار فرآیند خاص ذکر شده در بالا را با استفاده از مقادیر زیر برای  $n$  می توان با رابطه پلی تروپیک نشان داد.

$$T = \text{const.} \quad n = 1.0$$

$$p = \text{const.} \quad n = 0$$

$$v = \text{const.} \quad n = \pm \infty$$

$$Q = 0 \quad n = \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

این فرآیندها در یک نمودار  $p-v$  در شکل ۲-۱۰ رسم شده و رابطه لگاریتمی معادله (۲-۳۵) در شکل ۲-۱۱ نمایش داده شده است. دقت کنید که شیب خطوط مستقیم در این شکل  $-n$  است. هنوز حالت آدیاباتیک را بررسی نکرده ایم ولی در قسمت بعدی نشان خواهیم داد که در چنین موردی  $n = \gamma$  می باشد. معادله (۲-۳۴) را می توان بین دو حالت ابتدایی و انتهایی به صورت زیر نوشت:

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n = C \quad (۲-۳۷)$$

با انجام بعضی عملیات جبری بر روی این رابطه به همراه قانون گاز ایده آل [معادله (۲-۳۶)]، چندین عبارت برای حالت انتهایی در یک فرآیند پلی تروپیک می توان به دست آورد:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{1/n} \quad (۲-۳۸)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} \quad (۲-۳۹)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \quad (۲-۴۰)$$

توجه کنید که معادلات (۲-۳۹) و (۲-۴۰) فقط در مورد گازهای ایده آل به کار می رود.

حال ممکن است که حالت عمومی کار تراکمی گاز ایده آل را در یک مجموعه سیلندر - پیستون مورد بررسی قرار دهیم. کار عبارت است از:

$$W = - \int p \, dv \quad (۲-۴۱)$$

با جایگزینی رابطه پلی تروپیک برای  $p$

$$W = - \int_{v_1}^{v_2} C v^{-n} \, dv = C \left( \frac{v^{1-n}}{n-1} \right)_{v_1}^{v_2} \quad (۲-۴۲)$$

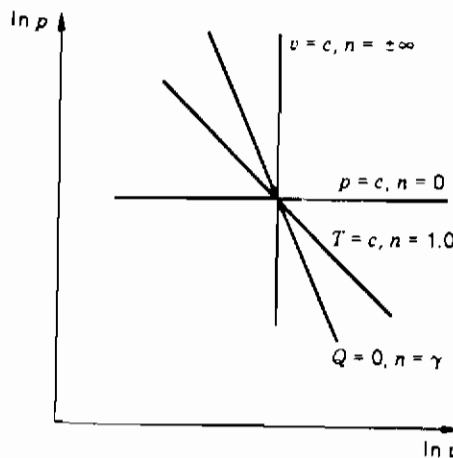
اما  $C = p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$  به طوری که:

$$W = \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{n-1} \quad (۲-۴۳)$$

این رابطه را با توجه به معادله (۲-۳۶) می توان چنین نوشت:

$$W = R \frac{(T_2 - T_1)}{n-1} \quad (۲-۴۴)$$

برای مورد خاص یک فرآیند دمای ثابت،  $n = 1$  و معادلات (۲-۴۳) و (۲-۴۴) غیر قابل محاسبه است اگرچه می توان با  $n = 1$  به معادله (۲-۴۲) برگشت و چنین نوشت:



شکل ۲-۱۱ نمایش لگاریتمی فرآیند پلی تروپیک، ثابت  $p v^n$

$$W = - \int_{v_1}^{v_2} C v^{-1} dv = C \ln \frac{v_1}{v_2}$$

برای دمای ثابت

$$pv = C = RT$$

لذا

$$W = p_1 V_1 \ln \frac{v_1}{v_2} = RT \ln \frac{v_1}{v_2} \quad (۲-۴۵)$$

مجدداً، چون دما ثابت است  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1}{p_2}$  پس :

$$W = RT \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (۲-۴۶)$$

### ۱۱-۲ فرآیند شبه ساکن - آدیاباتیک برای گاز ایده آل

همان طور که قبلاً اشاره کردیم، اینک فرآیند شبه ساکن (نیمه ساکن) - آدیاباتیک برای یک گاز ایده آل را مورد بررسی قرار می دهیم. بخاطر بیاورید که عبارت "شبه ساکن یا نیمه ساکن" یعنی یک سری حالات تعادل، و از نقطه نظر عملی، معمولاً به فرآیندهای با سرعت کم و بدون اصطکاک اشاره می شود. بعداً همچنین از عبارت برگشت پذیر برای تشریح چنین فرآیندی استفاده خواهیم کرد. برای فرآیند آدیاباتیک با کار تراکمی  $d'W = -p dv$  برای واحد جرم داریم :

$$d'Q = 0 = du + p dv \quad (۲-۴۷)$$

و برای گاز ایده آل

$$du = c_v dT$$

$$0 = c_v dT + p dv \quad \text{لذا}$$

و

$$c_v dT = -p dv \quad (۲-۴۸)$$

همچنین از تعریف انتالپی و استفاده از معادله (۲-۴۷)

$$dh = c_p dT = du + p dv + v dp$$

اما  $du + p dv = 0$  ، لذا :

$$c_p dT = v dp \quad (2-49)$$

از تقسیم معادله (۲-۴۹) بر معادله (۲-۴۸) نتیجه می گیریم :

$$\frac{c_p}{c_v} = - \frac{v}{p} \frac{dp}{dv}$$

یا

$$\frac{dp}{p} + \frac{c_p}{c_v} \frac{dv}{v} = 0 \quad (2-50)$$

حل معادله (۲-۵۰) عبارت است از :

$$pv^\gamma = \text{const} \quad (2-51)$$

که  $\gamma = c_p/c_v$  نسبت گرماهای ویژه بوده و نمای آیزنتروپیک نامیده می شود. معنی کلمه آیزنتروپیک در فصلهای آینده روشن خواهد شد. در حال حاضر آن را به صورت ساده، مقدار نمای پلی تروپیک برای فرآیند شبه ساکن آدیاباتیک در نظر می گیریم. فرآیند آدیاباتیک در شکلهای ۲-۱۰ و ۲-۱۱ نمایش داده شده است.

ثابت گاز را ممکن است بر حسب نمای آدیاباتیک به صورتهای زیر بیان نمود :

$$R = c_p - c_v = (\gamma - 1) c_v \quad (2-52)$$

$$R = \frac{\gamma - 1}{\gamma} c_p \quad (2-53)$$

کار لازم برای تراکم یک گاز ایده آل در یک سیلندر را به طور شبه ساکن و آدیاباتیک را می توان

با استفاده از معادله (۲-۴۳) یا (۲-۴۴) با  $n = \gamma$  محاسبه نمود.

کار تراکمی در یک سیلندر که در پاراگرافهای قبل توضیح داده شد، کار در یک سیستم بسته است. جرم گاز در داخل سیستم ثابت بوده و محاسبات با معادلات نشان داده شده انجام می شود. در یک سیستم باز هم ممکن است با فرآیند انبساط یا تراکم مواجه باشیم. از هوا یا بخار تحت فشار زیاد ممکن است جهت حرکت توربین و تولید کار مفید استفاده گردد. بالعکس از یک مجموعه کمپرسور رفت و بازگشتی پیستونی یا کمپرسور توربینی برای تراکم هوا از فشار پایین تا فشار بالا می توان استفاده نمود. فرآیند شبه ساکن آدیاباتیک در سیستمهای باز، نظیر سیستمهای بسته (سیلندر - پیستون) است. نوع سیستم (باز یا بسته) در به دست آوردن معادله (۲-۵۱) دخالتی ندارد، بنابراین می توان آن را برای توضیح فرآیند شبه ساکن آدیاباتیک در هر دو نوع سیستم به کار برد.

#### تراکم و انبساط

اگرچه عبارات مورد استفاده ممکن است واضح باشد ولی معنی کلمات تراکم و انبساط را باید روشن نمائیم. در یک فرآیند تراکمی فشار سیستم به وسیله مکانیزم خاصی افزایش می یابد، در حالی که در فرآیند انبساطی فشار سیستم کاهش پیدا می کند. بنابراین این عبارات را برای فرآیندهای جریانی و غیر جریانی و همین طور برای حالات مختلف عکس العمل داخلی بین کار و حرارت به کار خواهیم برد.

### مثال ۱۰ - ۲ کار در یک سیکل

مقدار ۱۸ نیتروژن یک سری فرآیندهای شبه ساکن را در یک مجموعه سیلندر - پیستون متحمل می شود که عبارتند از :

(۱) انبساطی آدیاباتیک که در آن حجم دو برابر می شود.

(۲) فرآیندی فشار - ثابت که در آن حجم به مقدار اولیه اش کاهش می یابد.

(۳) تراکمی حجم - ثابت که به حالت اولیه برمی گردد.

نیتروژن ابتدا در دمای  $150^{\circ}\text{C}$  و فشار ۵ atm می باشد. کار مفید انجام شده بر روی گاز طی این فرآیندها را محاسبه نمایید.

**حس:** نیتروژن را به عنوان سیستم ترمودینامیکی انتخاب می‌کنیم. فرآیندهای مورد نظر در شکل همراه نمایش داده شده است. داریم

$$p_1 = 5 \text{ atm} = 5.066 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_1 = 150^\circ \text{C} = 423 \text{ K}$$

$$m = 1 \text{ g} = 10^{-3} \text{ kg}$$

ثابت گاز برای نیتروژن عبارت است از

$$R = \frac{R_u}{M} = \frac{8314}{28} = 297 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

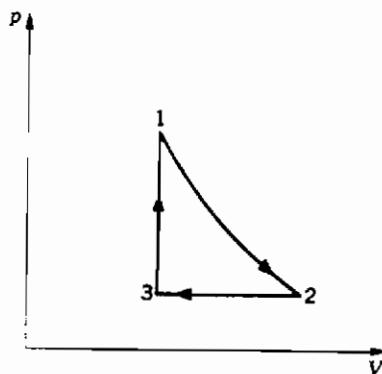
یا مستقیماً از جدول ۲-۲ به دست می‌آید و حجم اولیه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_1 = \frac{mRT_1}{p_1} = \frac{(0.001)(297)(423)}{5.066 \times 10^5} = 2.48 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

همچنین  $V_2 = 2V_1 = 4.96 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ، از معادله (۲-۳۸):

$$p_2 = p_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma = (5.066 \times 10^5) \left( \frac{1}{2} \right)^{1.4} = 1.92 \times 10^5 \text{ Pa}$$

کار انجام شده بر روی گاز در فرآیند ۱-۲ از معادله (۲-۴۳) محاسبه می‌گردد.



شکل مثال ۱۰-۲

$$W_{1-2} = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{\gamma - 1} = \frac{[(1.92)(4.96) - (5.066)(2.48)](10)}{1.4 - 1}$$

$$= -76.05 \text{ J}$$

فشار در فرآیند ۲-۳ ثابت بوده و کار از رابطه زیر به دست می آید:

$$W_{2-3} = - \int_{V_2}^{V_3} p \, dV = - p_2 (V_3 - V_2)$$

$$= - (1.92 \times 10^5)(2.48 - 4.96)(10^{-4}) = 47.62 \text{ J}$$

در فرآیند ۱-۳ کاری انجام نشده است زیرا  $V_3 = V_1$ . بنابراین کار کل در مجموعه فرآیندها عبارت است از:

$$W = W_{1-2} + W_{2-3} + W_{3-1}$$

$$= -76.05 + 47.62 + 0 = -28.43 \text{ J}$$

علامت منفی نشان می دهد که سیکل مورد نظر تولید کار می کند.

محاسبات دیگری را می توان انجام داد که نشان دهنده نکته مهمی می باشد. با توجه به معادله (۱۹-۲) مجموع حرارت های جریان یافته در سیکل باید با مقدار منفی کار افزوده به سیکل برابر باشد. حال این حرارت ها را محاسبه می کنیم. دماهای مورد نظر عبارت است از:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = (423) \left( \frac{1}{2} \right)^{0.4} = 320.6 \text{ K}$$

$$p_2 = p_3 \text{ چون}$$

$$T_3 = T_2 \frac{V_3}{V_2} = (320.6) \left( \frac{1}{2} \right) = 160.3 \text{ K}$$

گرماهای ویژه برای نیتروژن از جدول ۲-۲ عبارت است از

$$c_v = 0.177 \text{ Btu/lbm. } ^\circ\text{F} = 741.1 \text{ J/kg. } ^\circ\text{C}$$

$$c_p = 0.248 \text{ Btu/lbm. } ^\circ\text{F} = 1038.3 \text{ J/kg. } ^\circ\text{C}$$

فرآیند ۱-۲ آدیاباتیک است لذا  $Q_{1-2} = 0$ . حرارت افزوده در فرآیند فشار- ثابت ۲-۳ عبارت است از

$$Q_{2-3} = mc_p (T_3 - T_2) \\ = (0.001 \text{ kg})(1038.3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(160.3 - 320.6) = -166.4 \text{ J}$$

فرآیند ۱-۳ حجم ثابت است و حرارت اضافه شده برابر است با

$$Q_{3-1} = mc_v (T_1 - T_3) \\ = (0.001)(741.1)(423 - 160.3) = 194.8 \text{ J}$$

بنابراین حرارت افزوده شده به سیکل برابر است با

$$Q = Q_{1-2} + Q_{2-3} + Q_{3-1} \\ = 0 - 166.4 + 194.8 = 28.4 \text{ J}$$

و البته این مقدار برابر با کار افزوده شده به سیستم با علامت منفی است.

## مثال ۱۱-۲ تخلیه از یک مخزن

مخزنی به حجم  $5/0 \text{ m}^3$  حاوی هوا در فشار  $p = 7 \text{ MPa}$  و دمای  $250^\circ\text{C}$  است و کاملاً در برابر محیط عایق شده است. شیر مخزن باز شده و هوا تخلیه می‌گردد تا فشار به  $400 \text{ kPa}$  کاهش یابد. جرم هوای خارج شده مخزن را محاسبه کنید. سیستم در شکل مشخص شده است.

**حل:** این مسأله نیاز به فرضیات خاصی دارد. ابتدا تعیین کنیم که جرم هوای خارج شده از مخزن دقیقاً برابر اختلاف جرم ابتدایی  $m_1$  و جرم نهایی در انتهای مرحله تخلیه  $m_2$  می‌باشد بنابراین

$$\Delta m = m_1 - m_2 = \frac{p_1 V_1}{RT_1} - \frac{p_2 V_2}{RT_2} \quad (a)$$

شرایط اولیه  $p_1$ ،  $V_1$  و  $T_1$  معلوم است. بنابراین  $m_1$  به سادگی محاسبه می‌گردد. با فرض این که مخزن صلب باشد، یعنی  $V_2 = V_1$  و  $p_2$  داده شود، نیاز به تعیین  $T_2$  جهت حل مسأله داریم. اگر کسی مرز سیستم را سطح داخلی مخزن در نظر گیرد، سیستم بسته نیست یعنی جرم از



مرز سیستم عبور می‌کند. ما نیاز به تشریح فرآیندی جهت محاسبه  $T_2$  داریم. جرم هوای باقیمانده در مخزن ( $m_2$ ) را که آنقدر منبسط گشته تا مخزن را پُر کند، در نظر بگیرید. با استفاده از  $T_1 = 250 + 273 = 523 \text{ K}$ ، جرم اولیه به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$m_1 = \frac{p_1 V}{RT_1} = \frac{(7 \times 10^6)(0.5)}{(287.1)(523)} = 23.31 \text{ kg} \quad (b)$$

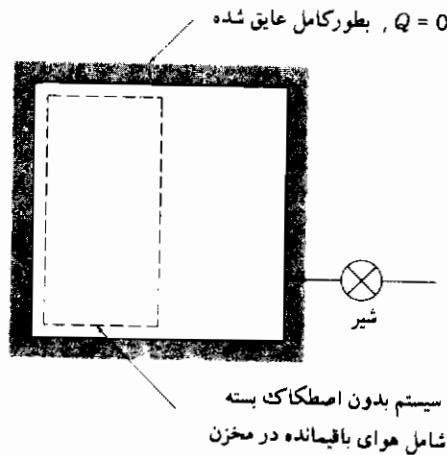
برای محاسبه جرم نهایی باید دمای نهایی داخل مخزن را تعیین کنیم. جرم مذکور یک فرآیند آدیاباتیک را طی می‌کند (زیرا مخزن عایق شده است) و چون اثری از اصطکاک هم وجود ندارد، فرآیند را شبه ساکن هم می‌توان تصور نمود. بنابراین برای محاسبه دمای نهایی می‌توانیم معادله (۲-۳۸) را با  $n = \gamma$  به کار گیریم.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

برای هوا  $\gamma = 1.4$  و

$$T_2 = (523) \left( \frac{0.4}{7.0} \right)^{(1.4-1)/1.4} = 230.7 \text{ K} \quad (c)$$

حال جرم نهایی به صورت زیر محاسبه می‌گردد.



شکل مثال ۲-۱۱

$$m_2 = \frac{p_2 V}{RT_2} = \frac{(4 \times 10^5)(0.5)}{(287.1)(230.7)} = 3.02 \quad (d)$$

و جرم هوای خارج شده برابر است با

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 23.31 - 3.02 = 20.29 \text{ kg}$$

## مثال ۲-۱۲

یک سیلندر کوچک فولادی به حجم  $15 \text{ cm}^3$ ، حاوی هلیوم در فشار  $20 \text{ atm}$  و  $40^\circ\text{C}$  می‌باشد. سیلندر در یک مخزن بزرگ به حجم  $1500 \text{ cm}^3$  که به‌طور کامل تخلیه و عایق شده است، قرار می‌گیرد. با وسایل مناسبی هلیوم تخلیه شده و کل مخزن را پر می‌کند. فشار نهایی را بعد از این که مجموعه به تعادل می‌رسد، محاسبه کنید.

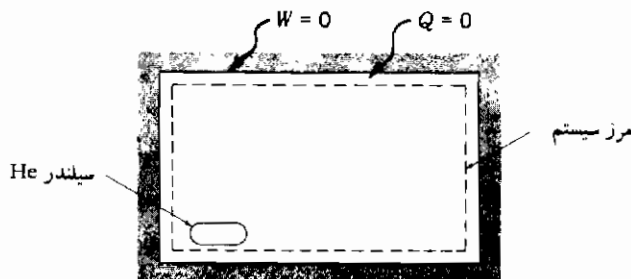
**حل:** سیستم در شکل همراه نشان داده شده است. ما مرز سیستم را سطح داخلی مخزن بزرگ انتخاب می‌کنیم و بنابراین

$$Q = 0 \text{ به‌خاطر این که مخزن عایق است}$$

$$W = 0 \text{ زیرا مرز حرکت نمی‌کند}$$

قانون اول ترمودینامیک به‌صورت زیر در می‌آید:

$$Q + W = 0 = \Delta U = m(u_2 - u_1) \quad (a)$$



شکل مثال ۲-۱۲

اما هلیوم یک گاز ایده آل است، بنابراین انرژی داخلی تنها تابع دما است و در نتیجه

$$T_2 = T_1$$

و نیز

$$mR = \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

سپس

$$P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_2} = (20) \left( \frac{15}{1500} \right) = 0.2 \text{ atm}$$

تذکره: در صورتی که ماده محتوی سیلندر، گاز ایده آل نباشد (نظیر آب پُر فشار)،  $T_2 = T_1$  نیست زیرا انرژی داخلی بستگی به حجم نیز دارد، یعنی  $u = f(T, v)$ .

## ۲-۱۲ خلاصه

این فصل کمک به تعمیم قانون اول ترمودینامیک به عنوان اصل بقای انرژی است. کار به صورت انرژی صرف شده توسط یک نیروی عمل کننده در طی یک جابه جایی تعریف گردید. در ترمودینامیک کار کمیتی است که به مرز سیستم انتقال داده می شود. وجود یک تابع عمومی انرژی داخلی نشان داده شد که فقط به حالت سیستم بستگی دارد و به عنوان یک خاصیت ترمودینامیکی در نظر گرفته شد. حرارت به عنوان انرژی که ممکن است از مرز یک سیستم عبور کند تعریف گردید که قابل بیان به صورت نیرویی عمل کننده در طول یک مسافت نمی باشد. بالاخره هر سه نوع انرژی در اصل بقا شرکت داده شده و یک بیان تحلیلی از قانون اول ارائه گردید. ما وارد یک بحث نسبتاً کامل در مورد گازهای ایده آل و گرماهای ویژه شدیم و مشخص کردیم که:

- ۱- انرژی داخلی و انتالپی برای گازهای ایده آل تنها تابع دما می باشد.
- ۲- تغییر انرژی داخلی و انتالپی برای گازهای کامل می تواند برای محدوده وسیعی از فشارها و دماها محاسبه شود، با  $c_p$  و  $c_v$  به دست آمده از جدول ۲-۲ و روابط زیر:

$$\Delta u = c_v \Delta T$$

$$\Delta h = c_p \Delta T$$

## خود آزمایی (سؤالات مروری)

- ۱- کار چیست ؟
- ۲- کار انبساطی چیست ؟
- ۳- انرژی پتانسیل چیست ؟
- ۴- قانون اول ترمودینامیک چیست ؟
- ۵- مفهوم کلی وابسته به عبارت انرژی داخلی چیست ؟
- ۶- چرا حرارت با کار تفاوت دارد ؟
- ۷- چرا حرارت نمی تواند در یک سیستم نگاهداشته شود ؟
- ۸- چرا گرمای ویژه اصطلاح مناسبی نیست ؟
- ۹- فرآیند سیکلی (چرخه ای) چیست ؟
- ۱۰- انتالپی چیست ؟
- ۱۱- قانون اول ترمودینامیک را چگونه برای یک شخص عامی تشریح می کنید ؟
- ۱۲- چرا کار با توان تفاوت دارد ؟
- ۱۳- انرژی داخلی و انتالپی گاز ایده آل به چه خاصیتی بستگی دارد ؟
- ۱۴- قرارداد علامت برای حرارت و کار را تشریح کنید .
- ۱۵- چرا کار خاصیت یک سیستم نیست ؟
- ۱۶- منظور از سیستم بسته چیست ؟
- ۱۷- گاز ایده آل چیست ؟
- ۱۸- عبارتهای ایزوترمال و آدیاباتیک را تعریف کنید.
- ۱۹- رابطه بین خواص ترمودینامیکی در یک فرآیند آدیاباتیک شبه ساکن برای یک گاز ایده آل چگونه است ؟
- ۲۰- چگونه گرماهای ویژه و ثابت گاز به یکدیگر مربوط می شود ؟
- ۲۱- فرآیند پلی تروپیک چیست ؟
- ۲۲- در جدول ۲-۲ واحدهای گرماهای ویژه بر حسب  $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$  داده شده است. توضیح دهید که چرا مقادیر داده شده به طور مساوی برای واحد  $\text{kJ/kg.K}$  مناسب می باشد.

- ۲۳ - چرا  $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$  واحد مناسبی برای ثابت گاز نمی باشد؟
- ۲۴ - در یک اطاق کاملاً عایق یخچالی وجود دارد. اگر در یخچال باز گذاشته شود، آیا دمای اطاق (الف) اضافه می شود، (ب) کاهش می یابد، یا (ج) ثابت باقی می ماند؟
- ۲۵ - چرا می توان از رابطه  $\Delta U = mc_v \Delta T$  جهت محاسبه تغییر انرژی داخلی برای گاز ایده آل در یک فرآیند فشار ثابت استفاده کرد؟

## مسائل (آحاد انگلیسی)

- ۲-۱ فشار  $34.2 \text{ psia}$  بر روی پیستونی با قطر  $7/5 \text{ cm}$  عمل می کند. کار انجام شده را وقتی که پیستون در طول مسافت  $3 \text{ in}$  حرکت می کند، محاسبه کنید.
- ۲-۲ یک راکت بزرگ می تواند نیروی رانشی برابر  $600,000 \text{ lbf}$  در سرعت  $600 \text{ mph}$  تولید کند. توان راکت را بر حسب اسب بخار و انرژی تلف شده در  $1$  ثانیه را بر حسب واحدهای  $\text{Btu}$  محاسبه کنید.
- ۲-۳ یک سیستم حرارتی کوچک حرارت ورودی  $100,000 \text{ Btu/h}$  را همراه با کار ورودی برابر  $1/5 \text{ hp}$  دریافت می کند. انرژی الکتریکی خروجی سیستم به میزان  $20 \text{ kW}$  می باشد تغییر در انرژی داخلی سیستم را در فاصله زمانی  $2$  دقیقه محاسبه کنید.
- ۲-۴ یک باتری با به کارگیری شدت جریانی برابر  $40$  آمپر در  $12$  ولت برای مدت زمان  $30$  دقیقه شارژ شده است. باتری در طی فرآیند شارژ شدن  $200 \text{ Btu}$  حرارت به محیط از دست می دهد. انرژی داخلی باتری در مدت زمان  $30$  دقیقه چقدر افزایش می یابد؟
- ۲-۵ هوادر پشت پیستون در طی یک فرآیند آدیاباتیک شبه ساکن از  $155 \text{ psia}$  و  $200^\circ\text{F}$  تا فشار  $25 \text{ psia}$  منبسط می شود. حجم اولیه هوا  $0.5 \text{ ft}^3$  است. مقدار کار و تغییر انتالپی برای این فرایند را محاسبه کنید.
- ۲-۶ مجموعه پیستون - سیلندری شامل هوا در  $20 \text{ psia}$  و  $50^\circ\text{F}$  می باشد. یک فنر با شکل خاصی به پیستون متصل است به طوری که فشار با جذر حجم تغییر می کند. حجم اولیه  $0.2 \text{ ft}^3$  می باشد. حرارت به سیلندر داده می شود تا دما به  $250^\circ\text{F}$  افزایش یابد. حرارت داده شده را محاسبه کنید.

- ۲-۷ یک محفظه صلب به حجم  $1 \text{ ft}^3$  حاوی هوا در  $20 \text{ psia}$  و  $70^\circ \text{F}$  است. حرارت به ظرف داده می‌شود تا فشار به  $50 \text{ psia}$  برسد. با فرض این که هوا رفتار گاز ایده آل با گرمای ویژه ثابت داشته باشد، حرارت افزوده شده را محاسبه نمایید.
- ۲-۸ اگر در مثال ۲-۳ عمل هم زدن به مقدار  $1 \text{ hp}$  اعمال گردد، و مخزن مورد نظر حرارتی به شدت  $800 \text{ Btu/h}$  از دست بدهد، افزایش دمای مخزن چقدر است؟
- ۲-۹ نیتروژن در  $2000 \text{ psia}$  و  $100^\circ \text{F}$  در مخزن صلبی به حجم  $3/0 \text{ ft}^3$  قرار دارد. مخزن عایق است. شیری در کنار مخزن باز می‌شود و نیتروژن تا زمانی که فشار مخزن به  $1200 \text{ psia}$  کاهش یابد، خارج می‌گردد. مقدار جرم نیتروژن را که در مخزن خارج می‌گردد محاسبه کنید.
- ۲-۱۰ فرض کنید که مخزن مثال ۲-۳ عایق نبوده و بر طبق معادله زیر حرارت به محیط پس بدهد.  $q = 18 \Delta T \text{ Btu/h}$ ، که  $\Delta T$  اختلاف دمای مخزن و محیط بوده و  $q$  شدت انتقال حرارت است. با فرض این که عمل هم زدن موقعی شروع شود که مخزن و محیط در  $70^\circ \text{F}$  است، دمای تعادل آب را محاسبه کنید. همچنین دمای را که آب بعد از ۱۵ دقیقه به آن خواهد رسید محاسبه نمایید.
- ۲-۱۱ هوا در یک سیلندر از  $200 \text{ psia}$  و  $800^\circ \text{F}$  تا  $30 \text{ psia}$  و  $200^\circ \text{F}$  منبسط می‌شود. با فرض این که فرایند بر طبق رابطه  $pV^n = \text{const.}$  تغییر می‌کند و  $c_v$  هوا  $0.1715$   $\text{Btu/lbm}^\circ \text{F}$  است، مقدار کار و انتقال حرارت را محاسبه کنید.
- ۲-۱۲  $0.1 \text{ lbm}$  هوا در  $25 \text{ psia}$  و  $100^\circ \text{F}$  در یک سیلندر نگهداشته می‌شود. حرارت به هوا داده می‌شود به طوری که در فشار ثابت منبسط شده تا زمانی که حجمش دو برابر گردد. تغییر در انرژی داخلی هوا و مقدار حرارت افزوده شده را محاسبه کنید.
- ۲-۱۳ یک سیلندر کوچک فولادی،  $V = 0.1 \text{ ft}^3$ ، حاوی نیتروژن در  $2000 \text{ psia}$  و  $70^\circ \text{F}$  می‌باشد. سیلندر در داخل یک اتاق خلأ عایق شده به حجم  $10 \text{ ft}^3$  قرار می‌گیرد. با وسایل مناسبی سیلندر کوچک قادر به تخلیه محتویات خود در اتاق است. فشار نهایی نیتروژن را در اتاق موقعی که شرایط تعادل برقرار می‌شود محاسبه کنید.
- ۲-۱۴ یک باتری ۱۲ ولتی دارای ظرفیت  $100 \text{ A.h}$  می‌باشد. انرژی ذخیره شده در باتری بر

حساب واحدهای Btu, J, cal چیست ؟

۲-۱۵ حرارت به سیستم بسته‌ای داده می‌شود که ساخت آن طوری است که فشار را ثابت نگاه می‌دارد. تغییر در انتالپی سیستم را موقعی که Btu ۸۰۰ حرارت افزوده شده و سیستم کاری معادل Btu ۲۰۰ تولید می‌کند، محاسبه کنید.

۲-۱۶ فتری در دست است که برای تراکم کردن آن به مقدار ۱ in احتیاج به نیروی ۱۰۰ lbf می‌باشد. تغییر در انرژی داخلی فتر را موقعی که ۳ in متراکم شده محاسبه کنید. از انتقال حرارت صرف نظر کنید.

۲-۱۷ نیتروژن در یک سیلندر از ۱۰۰ psia و ۵۰۰ °F تا ۳۰ psia و ۱۰۰ °F منبسط می‌شود. با فرض رفتار گاز ایده‌آل ( $pV = mRT$ )، کار انجام شده بر روی سطح پستون را به ازای هر پوند نیتروژن محاسبه کنید. فرض کنید که فشار و حجم توسط رابطه  $pV^n = \text{const.}$  به یکدیگر مربوط می‌شوند که  $n$  نمای مناسبی می‌باشد.

۲-۱۸ یک دستگاه تهویه مطبوع برای خارج کردن Btu/h ۱۲۰۰۰ از اتاقی طراحی شده و جهت این عمل سرمایش، ۱/۲ hp کار الکتریکی باید به واحد مذکور منتقل شود. چقدر حرارت به محیط پس داده می‌شود ؟

۲-۱۹ نرخ سوخت مصرفی اتومبیلی که با سرعت ۶۰ mi/h در جاده مسطحی حرکت می‌کند برابر است با ۱۲ mi/gal. انرژی داخلی سوخت Btu/gal ۱۴۰۰۰۰ و بازده مجموعه موتور و مکانیزم حرکت ۱۳ درصد است. یعنی فقط ۱۳ درصد از انرژی سوخت به صورت کار به جاده منتقل می‌شود و بقیه به صورت حرارت تلف می‌گردد. از نقطه نظر انرژی، نیروی کل مقاوم حرکت اتومبیل را محاسبه کنید. فرض کنید که همان اتومبیل با وزن ۴۴۰۰ lbm با همان سرعت از یک مری بالایی که نسبت به سطح افقی ۵ درجه شیب دارد بالا می‌رود. مصرف سوخت اتومبیل تحت این شرایط چقدر خواهد بود ؟

۲-۲۰ به شخصی با وزن ۲۵۰ lb گفته شده که می‌تواند ورزش را از طریق بالا بردن انرژی مصرفی خود به وسیله ورزش کم کند. او می‌خواهد این کار را با بالا رفتن از یک پله‌کان ۲۰ فوتی (چندین مرتبه در روز) انجام دهد. غذای مصرفی فعلی او مقدار ۴۰۰۰ kcal/day فوتی (چندین مرتبه در روز) انجام دهد. غذای مصرفی فعلی او مقدار ۴۰۰۰ kcal/day انرژی ایجاد می‌کند. شما برای کاهش وزن از طریق ورزش در مقایسه با رژیم غذایی چه

پیشنهادی دارید؟

۲-۲۱ یک سیستم ترمودینامیکی، سیکلی را با سه فرآیند متوالی طی می‌کند که برای آن  $Q_1 = +10 \text{ Btu}$ ،  $Q_2 = +30 \text{ Btu}$  و  $Q_3 = -5 \text{ Btu}$ . برای فرآیند اول  $\Delta E = +20 \text{ Btu}$  و برای فرآیند سوم  $\Delta E = -20 \text{ Btu}$  است. کار در فرآیند دوم و کار خالص خروجی سیکل چقدر است؟

۲-۲۲ مقدار ۴ lbm اکسیژن در یک فرآیند حجم-ثابت از  $100^\circ\text{F}$  تا  $500^\circ\text{F}$  گرم می‌شود. تغییر در انتالپی و مقدار انتقال حرارت را محاسبه کنید.

۲-۲۳ ۵ گرم دی اکسید کربن در فشار ۱۰ psia و  $100^\circ\text{F}$  در ظرفی قرار دارد. برای بالا بردن فشار تا 2 atm چقدر حرارت باید به ظرف داده شود؟

۲-۲۴ حرارت لازم برای بالا بردن دمای ۱ گرم مول از هر کدام از گازهای زیر را از ۲۰۰ تا  $500^\circ\text{F}$  در فشار ثابت ۱۵ psia محاسبه کنید.

(الف) هیدروژن (د) اکسیژن

(ب) هلیوم (ه) آرگون

(ج) نیتروژن (و) هوا

۲-۲۵ بالونی به حجم  $25 \text{ ft}^3$  با هوا در شرایط  $70^\circ\text{F}$  و ۱۴/۶۹۶ psia پُر شده است. پس از قرار گرفتن در معرض تابش خورشیدی، حجم بالون تا  $30 \text{ ft}^3$  افزایش یافته و فشار ثابت می‌ماند. حرارت افزوده شده را محاسبه کنید.

۲-۲۶ فرآیند فشار ثابتی را در نظر بگیرید که در آن هیدروژن در یک فرآیند قوس الکتریکی از  $300^\circ\text{F}$  تا  $4000^\circ\text{F}$  گرم می‌شود. انتقال حرارت به ازای هر پوند جرم را محاسبه کنید. فرض کنید که گرمای ویژه هیدروژن در دمای متوسطی ( $2100^\circ\text{F}$ ) ارزیابی و از آن برای محاسبه انتقال حرارت با در نظر گرفتن گرمای ویژه ثابت، استفاده شود. اگر از این روش استفاده شود میزان خطا چقدر خواهد بود؟

۲-۲۷ بخار آب در فشار ثابت ۱ psia از  $150^\circ\text{F}$  تا  $1000^\circ\text{F}$  گرم می‌شود. با فرض این که بخار در این محدوده از معادله حالت گاز ایده آل پیروی کند، مقدار انتقال حرارت را با استفاده از داده های جدول ۲-۳ محاسبه نمایید.



۲-۲۸ در یک روش کاربرد انرژی خارجی از یک کُلکتور (جمع کننده) خورشیدی به ابعاد  $5 \times 5 \text{ mi}$  در فضا، برای جذب انرژی خورشید در سلولهای ویژه خورشیدی استفاده می‌گردد. این سلولها به طور مستقیم انرژی تابشی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند که بعداً ممکن است با یک سیستم پیچیده میکروویو<sup>۱</sup> به زمین انتقال داده شود. بازده سلولهای خورشیدی در حدود ۱۲ درصد است. یعنی فقط ۱۲ درصد از انرژی خورشیدی وارده به الکتریسته تبدیل شده و ۸۸ درصد بقیه مجدداً به فضا می‌تابد. با استفاده از اطلاعات مسأله ۲-۲۸ توان الکتریکی خروجی دستگاه مذکور را حدس بزنید.

۲-۲۹ یک ظرف صُلبی را به حجم  $1 \text{ ft}^3$  که در فضای آزاد قرار گرفته و سرباز است، از پایین حرارت می‌دهیم تا دمای هوای داخل آن به  $850^\circ \text{F}$  برسد. سپس ظرف را به سرعت مسدود و از منبع حرارت جدا می‌کنیم و صبر می‌کنیم تا دمای اطاق،  $70^\circ \text{F}$  سرد شود. چقدر حرارت در طی فرآیند سرمایش از دست رفته است؟

۲-۳۰ یک گروه طرفدار حفظ منابع انرژی ادعا می‌کند که می‌توان با استفاده از سیستمهای روشنائی مؤثرتر، مقادیر زیادی انرژی الکتریکی را صرفه جویی کرد. یک لامپ نئون در تبدیل انرژی الکتریکی به نور مرئی فقط ۵ درصد مفید است. و ۹۵ درصد بقیه به صورت حرارت در اطاق پراکنده می‌شود. نورهای فلورسنت تقریباً ۲۰ درصد مفید است. در ساختمانهای مدرن این حرارت پخش شده باید به وسیله سیستم تهویه مطبوع خارج گردد که انرژی بیشتری را لازم دارد. در حدود  $1 \text{ kW}$  انرژی الکتریکی برای ایجاد  $10000 \text{ Btu/h}$  سرمایش مورد احتیاج است. اگر ۲۰۰۰ وات نور نئون در یک ساختمان به فلورسنت تبدیل شود، در میزان انرژی مصرفی چقدر کاهش می‌یابد؟

۲-۳۱ گرمای ویژه متوسط برای گازی در محدوده مشخصی از دما چنین تعریف می‌شود:

$$c_p = \frac{\int_{T_1}^{T_2} c_p dT}{T_2 - T_1}$$

این گرمای ویژه متوسط را برای هیدروژن مسأله ۲-۲۶ محاسبه نمایید. چگونه این مقدار با

عدد داده شده در جدول ۲-۲ مقایسه می‌شود؟

- ۲-۳۲ در بیشتر مسائل رفتار هوا در محدوده دمای صفر تا  $1000^{\circ}\text{F}$  به صورت گاز ایده آل با گرماهای ویژه ثابت فرض می‌گردد. با فرض این که رفتار هوا نظیر نیتروژن باشد (۷۸ درصد هوا نیتروژن است)، صحت این فرض را ارزیابی نمایید.

### مسائل (آحاد متریک)

- ۲-۱M فشار  $2/4 \text{ MPa}$  بر روی پیستونی به قطر  $7/5 \text{ cm}$  عمل می‌کند. اگر پیستون در طول مسافت  $8 \text{ cm}$  حرکت کند، کار انجام شده را محاسبه کنید.
- ۲-۲M یک پتانسیل الکتریکی  $110$  ولت بر روی مقاومتی اثر می‌گذارد به طوریکه جریان  $12 \text{ A}$  از آن عبور می‌کند. انرژی تلف شده در  $3$  دقیقه را محاسبه نمایید.
- ۲-۳M یک راکت بزرگ قادر به تولید نیروی رانشی برابر  $2/7 \text{ MN}$  در سرعت  $200 \text{ m/s}$  می‌باشد. توان راکت و انرژی تلف شده را در  $1$  ثانیه برحسب  $\text{kJ}$  محاسبه نمایید.
- ۲-۴M مخزن صلبی به حجم  $2/3 \text{ m}^3$  کاملاً عایق شده است. مخزن شامل هلیوم در  $2 \text{ MPa}$  و  $200^{\circ}\text{C}$  است. شیری در کنار مخزن باز می‌شود و هلیوم خارج می‌گردد تا این که نصف جرم محتویات مخزن خارج گردد. سپس شیر بسته می‌شود. فشار نهایی مخزن را محاسبه کنید.
- ۲-۵M هوادر یک مجموعه پیستون - سیلندر از  $20^{\circ}\text{C}$  و  $200 \text{ kPa}$  تا  $120^{\circ}\text{C}$  و  $300 \text{ kPa}$  متراکم می‌شود. با فرض این که فرآیند پلی تروپیک باشد، مقدار حرارت اضافه شده به ازای هر کیلوگرم هوا را محاسبه کنید.
- ۲-۶M فتری در دسترس است که برای متراکم کردن آن به مقدار  $2/5 \text{ cm}$  احتیاج به نیروی  $445 \text{ N}$  می‌باشد. تغییر در انرژی داخلی فتر را موقعی که  $7/5 \text{ cm}$  متراکم شده، محاسبه کنید. از انتقال حرارت صرف نظر کنید.
- ۲-۷M نیتروژن در یک سیلندر از  $690 \text{ kPa}$  و  $260^{\circ}\text{C}$  تا  $210 \text{ kPa}$  و  $40^{\circ}\text{C}$  منبسط می‌شود. با فرض رفتار گاز ایده آل ( $pV = mRT$ )، کار انجام شده بر روی سطح پیستون را به ازای هر پوند نیتروژن محاسبه کنید. فرض کنید که فشار و حجم توسط رابطه، ثابت  $pV^n =$  به یکدیگر مربوط می‌شوند.  $n$  نمای مناسبی می‌باشد.

۸M-۲ محفظه ضلّبی به حجم ۲۸ لیتر حاوی هوا در  $140 \text{ kPa}$  و  $20^\circ\text{C}$  می‌باشد. حرارت به ظرف افزوده می‌شود تا وقتی که فشار به  $345 \text{ kPa}$  برسد. با فرض این که رفتار هوا به صورت گاز ایده‌آل با گرمای ویژه ثابت باشد و  $c_v = 0.718 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ، حرارت افزوده شده را محاسبه کنید.

۹M-۲ مخزن کروی به حجم  $20 \text{ m}^3$  شامل هلیوم در  $20 \text{ atm}$  و  $100^\circ\text{C}$  می‌باشد. این مخزن به مخزن دومی با همان اندازه که به طور کامل تخلیه شده است، متصل می‌باشد. شیر متصل به مخازن باز شده و زمانی که فشار در مخزن اول به  $10 \text{ atm}$  می‌رسد، بسته می‌شود. هر دو مخزن کاملاً عایق می‌باشد. دمای نهایی را در مخزنی که در ابتدا تخلیه شده است، محاسبه کنید.

۱۰M-۲ یک سیستم حرارتی کوچک حرارت ورودی  $30 \text{ kW}$  را همراه با کار ورودی  $1/1 \text{ kW}$  دریافت می‌کند. انرژی الکتریکی خروجی سیستم به میزان  $20 \text{ kW}$  می‌باشد. تغییر در انرژی داخلی سیستم را در مدت زمان ۲ دقیقه محاسبه کنید.

۱۱M-۲ یک باتری با اعمال شدت جریانی برابر  $40 \text{ A}$  در  $12 \text{ V}$  برای مدت ۳۰ دقیقه شارژ شده است. در حین فرآیند شارژ کردن، باتری  $200 \text{ kJ}$  حرارت به محیط از دست می‌دهد. انرژی داخلی باتری در مدت ۳۰ دقیقه چقدر افزایش می‌یابد؟

۱۲M-۲ حرارت به سیستم بسته‌ای داده می‌شود که ساخت آن طوری است که فشار را ثابت نگاه می‌دارد. تغییر در انتالپی سیستم را وقتی که  $850 \text{ kJ}$  حرارت به آن افزوده شده و سیستم کاری معادل  $200 \text{ kJ}$  تولید می‌کند، محاسبه کنید.

۱۳M-۲ هوا در یک مجموعه سیلندر-پیستون بدون اصطکاک در  $200 \text{ kPa}$  و  $100^\circ\text{C}$  می‌باشد.  $20 \text{ kJ/kg}$  حرارت به هوا داده می‌شود و دما به  $200^\circ\text{C}$  افزایش می‌یابد. اگر فرآیند شبه ساکن و پُلی تروپیک باشد، فشار نهایی هوا را محاسبه کنید.

۱۴M-۲ بخار آب در  $150 \text{ kPa}$  و  $120^\circ\text{C}$  در یک آرایش سیلندر-پیستونی موجود است. حرارت در فشار ثابت اضافه می‌گردد تا حجم دو برابر گردد. حرارت اضافه شده به ازای واحد وزن را محاسبه کنید.

۱۵M-۲ یک مخزن به قطر  $5 \text{ m}$  با هوا در شرایط  $30 \text{ atm}$  و  $40^\circ\text{C}$  پر شده است. مخزن کاملاً

عایق است. هوا از مخزن خارج می‌گردد تا فشار به  $20 \text{ atm}$  کاهش یابد. مقدار جرم هوای خارج شده از مخزن را محاسبه کنید.

۲-۱۶M یک سیلندر فولادی کوچک،  $V = 0.28$  لیتر، حاوی نیتروژن در  $14 \text{ MPa}$  و  $20^\circ \text{C}$  می‌باشد. سیلندر در داخل یک اتاق کاملاً تخلیه و عایق شده‌ای به حجم  $280$  لیتر قرار می‌گیرد. سیلندر با وسایل مناسبی قادر به تخلیه محتویات خود در اتاق است. پس از برقراری تعادل، فشار نهایی نیتروژن را در اتاق محاسبه نمایید.

۲-۱۷M یک دستگاه تهویه مطبوع برای خارج کردن  $13 \text{ MJ/h}$  از اتاقی طراحی شده و جهت این عمل سرمایش  $900 \text{ W}$  کار الکتریکی باید به‌واحد مذکور منتقل شود. چقدر حرارت به محیط پس داده می‌شود؟

۲-۱۸M سوخت مصرفی اتومبیلی که با سرعت  $100 \text{ km/h}$  در جاده مسطحی حرکت می‌کند، برابر  $5 \text{ km/liter}$  است. انرژی داخلی سوخت  $40000 \text{ kJ/liter}$  و بازده مجموعه موتور و مکانیزم حرکت  $13\%$  درصد است. یعنی فقط  $13\%$  درصد انرژی سوخت به‌صورت کار به‌جاده داده شده و بقیه به‌صورت حرارت در خود اتومبیل تلف می‌گردد. از نقطه نظر انرژی، نیروی کل مقاوم حرکت اتومبیل را محاسبه کنید. فرض کنید که همان اتومبیل با وزن  $2000 \text{ kg}$  با همان سرعت از یک سربالایی با شیب  $5^\circ$  درجه بالا رود، مصرف سوخت اتومبیل تحت این شرایط چقدر خواهد بود؟

۲-۱۹M به‌شخصی با وزن  $115 \text{ kg}$  گفته‌شده که می‌تواند وزنش را از طریق بالا بردن انرژی مصرفی خود به‌وسیله ورزش کم کند. او قصد دارد این کار را با بالا رفتن از یک پله‌کان  $6$  متری (چندین مرتبه در روز) انجام دهد. غذای مصرفی فعلی او مقدار  $17 \text{ kJ/day}$  انرژی ایجاد می‌کند. شما برای کاهش وزن او از طریق ورزش در مقایسه با رژیم غذایی چه پیشنهادی دارید؟

۲-۲۰M ظرف صُلبی به‌حجم  $28$  لیتر که در فضای آزاد قرار گرفته و سرباز است، از پایین حرارت داده می‌شود تا دمای هوای داخل آن به  $450^\circ \text{C}$  برسد. سپس ظرف مذکور به‌سرعت مسدود شده و از منبع گرمایشی جدا گردیده و فرصت داده می‌شود که تادمای اتاق،  $20^\circ \text{C}$  سرد شود. چقدر حرارت در طی فرآیند سرمایش از دست رفته است؟

۲-۲۱M یک گروه طرفدار حفظ منابع انرژی ادعا می‌کند که می‌توان با استفاده از سیستمهای روشنایی سودمندتر مقادیر زیادی انرژی الکتریکی را صرفه جویی کرد. یک لامپ نئون در تبدیل انرژی الکتریکی به نور مرئی فقط ۵ درصد مفید بوده و ۹۵ درصد بقیه به صورت حرارت در اطاق پراکنده می‌شود. نورهای فلورسنت تقریباً ۲۰ درصد مفید است. در ساختمانهای مدرن باید این حرارت پخش شده به وسیله سیستم های تهویه مطبوع خارج گردد، که خود انرژی بیشتری لازم دارد. در حدود ۱ kW انرژی الکتریکی برای ایجاد MJ/h ۱۰ سرمایه‌ش مورد احتیاج است. اگر ۲۰۰۰ وات نور نئون در یک ساختمان به فلورسنت تبدیل شود، انرژی مصرفی چقدر کاهش خواهد یافت؟

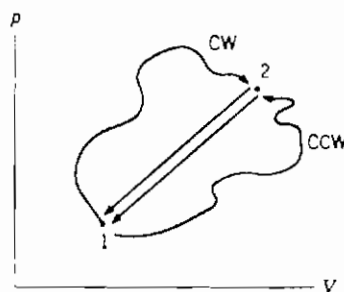
۲-۲۲M یک سیستم ترمودینامیکی سیکلی از سه فرآیند را طی می‌کند که در آن  $Q_1 = + 10 \text{ kJ}$  و برای  $Q_2 = + 30 \text{ kJ}$ ،  $Q_3 = - 5 \text{ kJ}$ . برای اولین فرآیند  $\Delta E = + 20 \text{ kJ}$  و برای سومین فرآیند  $\Delta E = - 20 \text{ kJ}$ . کار در فرآیند دوم و کار خالص خروجی سیکل چقدر است؟

۲-۲۳M در یک روش کاربرد انرژی خارجی از یک کلکور (جمع کننده) خورشیدی به ابعاد  $8 \times 8$  کیلومتر در فضا برای جذب انرژی خورشیدی در سلولهای ویژه خورشیدی استفاده می‌گردد. این سلولها به طور مستقیم انرژی تابشی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند که بعداً ممکن است با یک سیستم پیچیده میکروویو به زمین انتقال داده شود. بازده سلولهای خورشید در حدود ۱۲ درصد است. یعنی فقط ۱۲ درصد از انرژی خورشیدی وارده به الکتریسته تبدیل شده و ۸۸ درصد بقیه مجدداً به فضا می‌تابد. با استفاده از اطلاعات مسأله ۲-۲۸ توان الکتریکی خروجی دستگاه مذکور را حدس بزنید.

۲-۲۴M  $1/10 \text{ kg}$  نیتروژن در یک آرایش سیلندر - پیستون در یک فرآیند پلی تروپیک  $n = 1/26$  متراکم می‌شود. شرایط ابتدایی ۱۰۰ kPa و  $100^\circ \text{C}$  می‌باشد در حالی که فشار نهایی ۹۵۰ kPa است. مقدار حرارت منتقل شده در حین این فرآیند را محاسبه کنید.

۲-۲۵M هوا در یک مجموعه سیلندر - پیستون از  $30^\circ \text{C}$ ، ۱۱۰ kPa تا  $130^\circ \text{C}$ ، ۳۵۰ kPa متراکم می‌شود. با فرض این که فرآیند پلی تروپیک باشد، حرارت اضافه شده به هر کیلوگرم هوا را محاسبه کنید.

۲-۲۶M یک سیستم بسته ترمودینامیکی، فرآیندی را به صورت یک چرخه از نقطه ۱ تا ۲ در جهت عقربه‌های ساعت یا خلاف آن مطابق نمودار  $p - V$  نشان داده شده طی نماید. در فرآیندی در جهت عقربه‌های ساعت (که آن را با CW نشان می‌دهیم)  $(Q_{1,2})_{CW} = -85 \text{ kJ}$  و  $(W_{1,2})_{CW} = -40 \text{ kJ}$  است. وقتی که سیستم از حالت ۲ به حالت ۱ می‌رود، مقدار حرارت در جهت عقربه‌های ساعت و خلاف آن یکسان بوده و برابر است با  $(Q_{2,1})_{CW} = (Q_{2,1})_{CCW} = -55 \text{ kJ}$ . حرکت در جهت خلاف عقربه‌های ساعت را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن مسیر ۱ به ۲ در جهت خلاف عقربه‌های ساعت، مشخص شده که  $(Q_{1,2})_{CCW} = 75 \text{ kJ}$  و  $(W_{1,2})_{CCW}$  را تعیین کنید.



شکل مسأله ۲۶M

۲-۲۷M افزایش دمای مخزن در مثال ۳-۲ را محاسبه کنید، در صورتی که عمل هم‌زدن به مقدار ۱ hp اعمال شود و اتلاف حرارتی مخزن  $850 \text{ kJ/h}$  باشد.

۲-۲۸M فرض کنید که مخزن مثال ۳-۲ عایق نبوده و بر طبق معادله  $q = 18 \Delta T \text{ kJ/h}$  حرارت به محیط پس بدهد، که  $\Delta T$  اختلاف دما بین مخزن و محیط در  $20^\circ\text{C}$  هستند، دمای تعادل آب را محاسبه کنید. سپس دمای آب را بعد از ۱۵ دقیقه محاسبه کنید.

۲-۲۹M هوادر یک سیلندر از  $1/4 \text{ MPa}$  و  $700 \text{ K}$  تا  $200 \text{ kPa}$ ،  $370 \text{ K}$  منبسط می‌شود. با فرض این که فرآیند بر طبق رابطه، ثابت  $pV^n = \text{ثابت}$  تغییر کرده و  $c_v$  برای هوا  $0.718 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$  باشد، کار و انتقال حرارت را محاسبه کنید.

۲-۳۰M ۱۰۰ گرم هوا در ۱۷۰ kPa و ۴۰ °C در یک مجموعه سیلندر - پیستون نگهداشته می شود. حرارت به هوا داده شده به طوری که در فشار ثابت، حجمش تا ۲ برابر افزایش می یابد. تغییر در انرژی داخلی هوا و مقدار حرارت افزوده شده را محاسبه کنید.

۲-۳۱M هلیوم در داخل مخزن عایقی در ۷ MPa و ۷۰ °C می باشد. شیری در کنار مخزن باز می شود و ۴۰ درصد هلیوم خارج می گردد. سپس شیر بسته می شود. حجم کلی مخزن  $4/5 \text{ m}^3$  است. فشار نهایی مخزن را محاسبه کنید.

۲-۳۲M از شکافتن هسته ای یک اتم اورانیوم  $^{235}\text{U}$  حدود ۲۰۰ میلیون الکترون ولت (MeV) انرژی آزاد می شود. با فرض اینکه ۳۰ درصد از این انرژی در یک نیروگاه قابل تبدیل به الکتریسته باشد، برای تولید مداوم ۱۰۰۰ MW چه مقدار  $^{235}\text{U}$  در یک سال مصرف می گردد؟ (به ضمیمه برای ضرایب تبدیل مراجعه کنید).

۲-۳۳M یک بالن هوایی از پلاستیک ارتجاع ناپذیری ساخته شده که قادر به ایجاد یک شکل کروی به قطر ۱۰ m می باشد. بالن در ابتدا خالی است و با هلیوم در محلی که فشار ۱ atm است پر می شود. کار انجام شده بر روی محیط در طی فرآیند پُر شدن چقدر است؟

۲-۳۴M یک بالابرنده هیدرولیکی در یک تعمیرگاه از هوای متراکم استفاده می کند. هوا در ۷ atm ذخیره شده برای بالابردن اتومبیل، به داخل سیلندری تخلیه می گردد که پیستونی به قطر ۳۵ cm را به حرکت در می آورد. معمولاً اتومبیلها تا ارتفاع ۲/۳ m بالا برده می شود. هوای ذخیره توسط یک کمپرسور کوچک هیدرولیکی تهیه می شود که در صورت لزوم به صورت پیوسته کار می کند. با فرض این که مخزن مناسبی برای ذخیره هوا در دسترس باشد، برای بالا بردن اتومبیلی به وزن ۴۰۰۰ lb به تعداد ۵۰ مرتبه در روز، موتوری با قدرت چند اسب بخار لازم است؟

۲-۳۵M اکسیژن به صورت آدیاباتیک و نیمه ساکن در یک مجموعه پیستون - سیلندر متراکم می شود. کار لازم برای تراکم از ۲۰ °C و ۱ atm تا  $p = 500 \text{ kPa}$  را محاسبه کنید. همچنین دمای نهایی را محاسبه نمایید.

۲-۳۶M ماده ای فرآیند شبه ساکن خاصی را در پشت یک پیستون به طریقی طی می کند که فشار بر طبق رابطه  $p = a + bV$  تغییر می کند. عبارتی برای کار انجام شده بین فشارهای  $p_1$  و

- ۲-۳۷M  $p_2$  به دست آورید.
- ۲-۳۸M بالنی به قطر ۱ m حاوی هوا در شرایط ۱۲۰ kPa و ۲۰ °C می باشد. حرارت به آن افزوده می شود تا قطرش به ۱/۴ m افزایش یابد. در طی این فرآیند فشار مستقیماً متناسب با قطر است. حرارت اضافه شده را محاسبه کنید.
- ۲-۳۹M در فنر خاصی نیرو توسط رابطه  $F = kx^2$  با تغییر مکان مربوط است. نیروی ۱۰۰۰ N برای تراکم فنر به مقدار ۱ cm لازم است. کار لازم برای تراکم فنر را به مقدار ۳ cm محاسبه کنید. جواب را بر حسب ژول، ft-lbf و Btu بیان کنید.
- ۲-۴۰M آزمایشی با گاز معینی انجام گردیده و مشخص شده وقتی که گاز در ظرفی با حجم ثابت قرار گرفته، مقدار ۷۰ kJ/kg انرژی جهت بالا بردن دماش به مقدار ۸۳ °C لازم است. برای گاز مذکور  $\gamma = 1/5$  است. مقدار  $c_p$  و  $R$  را برای این گاز محاسبه کنید.
- ۲-۴۱M تولید انرژی هیدرو الکتریکی بر اساس تبدیل انرژی پتانسیل ثقلی آب به انرژی مکانیکی توسط توربینهای بزرگ استوار است. فرض کنید که سدّی در دسترس است و آب از ارتفاع ۱۰۰ متری سقوط می کند. برای ۱۰۰۰۰ kW انرژی چه شدت جریانی از آب لازم است؟
- ۲-۴۲M فنر بزرگی به طریقی طراحی شده که قادر به باز یابی انرژی ذخیره شده اش با نرخ ۳۰۰ W برای مدت ۱۰ دقیقه می باشد. تغییر شکل فنر ۳۰ cm است. برای انجام این عمل ذخیره انرژی، ثابت فنر چه مقدار باید باشد؟
- ۲-۴۳M مخزنی به حجم ۳ m<sup>3</sup> حاوی هلیوم در ۲ MPa و ۱۰۰ °C می باشد و به طور کامل عایق شده است. شیری در کنار مخزن باز می شود و هلیوم تا رسیدن فشار داخل مخزن به ۵۰۰ kPa خارج می گردد. مقدار جرم هلیوم خارج شده از مخزن را محاسبه کنید.
- ۲-۴۴M یک گاز ایده آل انبساطی آدیاباتیک شبه ساکن را از شرایط ۸۰۰ kPa و ۰/۷ لیتر و ۱۰۰ °C به فشار انتهایی ۲۰۰ kPa طی می کند. مقدار کار انجام شده را محاسبه کنید اگر نسبت گرماهای ویژه ۱/۳۹ باشد. همچنین مقادیر گرماهای مخصوص را بر اساس جرم کل محاسبه کنید.
- ۲-۴۵M پیشنهاد شده است که چرخهای طیار را برای ذخیره انرژی در آینده به خدمت گیرند. هر



مرجمی را که احساس می‌کنید مناسب است بررسی کنید و در مورد چنین پیشنهادی اظهار نظر نمایید.

**۲-۴۵M** مخزنی به حجم  $1/0 \text{ m}^3$  حاوی هوا در  $14 \text{ MPa}$  و  $50^\circ \text{C}$  می‌باشد. ظرف مذکور به وسیله شیر به مخزن بزرگی به حجم  $15 \text{ m}^3$  متصل گردیده که کاملاً تخلیه شده است. کل سیستم کاملاً عایق گردیده است. شیر باز می‌شود و گاز در هر دو مخزن به حالت تعادل می‌رسد. فشار نهایی را محاسبه کنید.

**۲-۴۶M** فرض کنید که شیر مسأله ۲-۴۵M فقط به مدتی باز باشد که فشار در مخزن کوچک به  $3 \text{ MPa}$  کاهش یابد و ضمناً فرآیند مذکور خیلی سریع صورت پذیرد. دمای نهایی را در هر مخزن محاسبه کنید.

**۲-۴۷M** سیکل ترمودینامیکی خاصی توسط یک مربع  $5 \times 5 \text{ cm}$  در یک نمودار  $p-v$  نشان داده شده که مقیاس محورهای مختصات در آن به صورت  $1 \text{ cm} = 1 \text{ m}^3$  و  $1 \text{ cm} = 1 \text{ atm}$  می‌باشد. اگر در طی سیکل کار خالصی به سیستم داده شود، انتقال حرارت کلی را در طی سیکل محاسبه کنید.

**۲-۴۸M** یک گرم کن الکتریکی در داخل ظرف صلبی به حجم  $1$  لیتر پُر شده از نیتروژن در  $50^\circ \text{C}$  و  $10 \text{ atm}$  قرار گرفته است. اگر ظرف مذکور کاملاً عایق شده باشد، برای افزایش فشار تا  $15 \text{ atm}$  در مدت زمان  $10$  دقیقه، شدت توان الکتریکی ورودی به گرم‌کن چقدر باید باشد؟

**۲-۴۹M** در یک دستگاه تولید انرژی سری، برای ایجاد دمای احتراق خیلی بالا، هیدروژن را با اکسیژن می‌سوزانند. اکسیژن قبل از احتراق در فشار ثابت  $130 \text{ kPa}$  از  $20^\circ \text{C}$  تا  $1200^\circ \text{C}$  گرم می‌شود. جهت مصرف  $1 \text{ kg}$  اکسیژن چه مقدار حرارت لازم است؟

**۲-۵۰M** اکسیژن در یک مجموعه سیلندر-پیستون از  $40^\circ \text{C}$ ،  $160 \text{ kPa}$  تا  $90^\circ \text{C}$ ،  $600 \text{ kPa}$  تراکم می‌شود. اگر فرآیند به صورت شبه ساکن باشد، کار انجام شده بر روی گاز و انتقال حرارت را محاسبه کنید.

**۲-۵۱M** یک گاز ایده‌آل فرآیند شبه ساکن را در فشار ثابت  $3 \text{ atm}$  در یک مجموعه سیلندر-پیستون طی می‌کند. در طی فرآیند مذکور  $25 \text{ kJ}$  حرارت افزوده شده و حجم از  $1/5$

- تا  $0.6 \text{ m}^3$  کاهش می‌یابد. تغییر انرژی داخلی را برای این فرآیند محاسبه کنید.
- ۲-۵۲M ۵ کیلوگرم نیتروژن به طریقی متراکم می‌شود که در حالی که  $20 \text{ kJ}$  حرارت به آن افزوده می‌گردد، انرژی داخلی آن به مقدار  $160 \text{ kJ}$  بالا می‌رود. کار انجام شده بر روی گاز را محاسبه کنید. تراکم را در یک سیستم بسته در نظر بگیرید.
- ۲-۵۳M یک گرم کن مقاومتی به قدرت  $1 \text{ kW}$  در داخل ظرفی به حجم  $3000$  لیتر پُر شده از هوا در  $100 \text{ kPa}$  و  $20^\circ\text{C}$  قرار می‌گیرد. ظرف عایق شده و گرم کن برای مدت  $10$  دقیقه عمل می‌کند. فشار و دمای هوا را در خاتمه عمل محاسبه کنید.
- ۲-۵۴M بالنی به حجم  $700$  لیتر با هوا در  $20^\circ\text{C}$  و  $100 \text{ kPa}$  پُر شده است. پس از قرار گرفتن در معرض تابش خورشیدی حجم بالن تا  $850$  لیتر افزایش یافته و فشار ثابت می‌ماند. حرارت افزوده شده را محاسبه کنید.
- ۲-۵۵M فرآیند فشار ثابتی را در نظر بگیرید که در آن هیدروژن در یک فرآیند قوس الکتریکی از  $150^\circ\text{C}$  تا  $2200^\circ\text{C}$  گرم می‌شود. انتقال حرارت به ازای هر کیلوگرم جرم را محاسبه کنید. فرض کنید که گرمای ویژه هیدروژن در دمای متوسطی ( $1200^\circ\text{C}$ ) ارزیابی شده و از آن جهت محاسبه انتقال حرارت با در نظر گرفتن گرمای ویژه ثابت، استفاده شود. اگر از این روش استفاده شود میزان خطا چقدر خواهد بود؟
- ۲-۵۶M یک سیستم ترمودینامیکی بسته در حالی که مبادله انرژی با محیط داشته و کار الکتریکی دریافت می‌کند، برای بالا بردن جرم  $4$  کیلوگرم در یک میدان جاذبه ثقل استاندارد طراحی شده است. در طی یک سیکل کامل، سیستم مقدار  $350 \text{ kJ}$  حرارت را در یک بخش از سیکل دریافت نموده و  $150 \text{ kJ}$  را در بخش دیگر سیکل به محیط پس می‌دهد. در طی سیکل کلی  $50 \text{ J}$  انرژی الکتریکی به سیستم منتقل می‌شود. مقدار جابجایی جرم  $4$  کیلوگرمی را محاسبه کنید.
- ۲-۵۷M  $12 \text{ kg}$  اکسیژن در یک فرآیند حجم ثابت از  $40^\circ\text{C}$  تا  $200^\circ\text{C}$  گرم می‌شود. انتقال حرارت و تغییر در انتالپی را محاسبه کنید.
- ۲-۵۸M  $5$  گرم دی‌اکسید کربن در  $70 \text{ kPa}$  و  $40^\circ\text{C}$  در ظرفی قرار دارد. برای افزایش فشار تا حدود  $200 \text{ kPa}$  چه مقدار حرارت باید به آن افزوده شود؟

$M-59$  ۲-۵۹ حرارت لازم جهت افزایش دمای ۱ کیلوگرم مول از هر کدام از گازهای زیر را از دمای ۹۰ تا  $260^{\circ}\text{C}$  در فشار ثابت  $100\text{ kPa}$  محاسبه کنید:

- |               |            |
|---------------|------------|
| (الف) هیدروژن | (د) هلیوم  |
| (ب) نیتروژن   | (ه) اکسیژن |
| (ج) آرگون     | (و) هوا    |

$M-60$  ۲-۶۰ در بیشتر مسائل رفتار هوا در محدوده دمای ۲۵۵ تا  $810\text{ K}$  به صورت گاز ایده آل با گرماهای ویژه ثابت فرض می شود. فرض می کنیم رفتار هوا نظیر نیتروژن باشد (۷۸ درصد هوا نیتروژن است) صحت این فرض را ارزیابی کنید.

$M-61$  ۲-۶۱ مقدار  $3\text{ kg}$  آرگون در فشار ثابت از  $20^{\circ}\text{C}$  تا  $120^{\circ}\text{C}$  گرم می شود. مقدار حرارت لازم و تغییر در انرژی داخلی را محاسبه کنید.

$M-62$  ۲-۶۲ گاز مشخصی فرآیند فشار ثابتی را در یک مجموعه پیستون - سیلندر در  $120\text{ kPa}$  طی می کند. در ضمن این فرآیند با افزایش دمای  $75^{\circ}\text{C}$  مقدار انرژی داخلی  $190\text{ kJ/kg}$  بالا می رود. کار منتقل شده به سطح پیستون در همان زمان برابر  $100\text{ kJ/kg}$  می باشد. مقدار  $c_p$ ،  $c_v$  و  $R$  را برای گاز مذکور محاسبه کنید.

$M-63$  ۲-۶۳  $10/5\text{ kg}$  هوا در فرآیند فشار ثابت از  $15^{\circ}\text{C}$  تا  $100^{\circ}\text{C}$  گرم می شود. تغییر در انرژی داخلی را محاسبه نمایید.

$M-64$  ۲-۶۴ آزمایشی با یک سیستم بسته شامل ماده ای مجهول انجام شده است. ضمن تغییر سیستم از حالت ۱ به حالت ۲، مقدار  $15\text{ kJ}$  حرارت از سیستم دفع شده در حالی که کار خروجی سیستم برابر  $48\text{ kJ}$  است. سپس سیستم در فرآیند دیگری به حالت اولیه اش برمی گردد که در طی آن  $28\text{ kJ}$  حرارت و مقداری کار به سیستم افزوده شده است. مقدار کار در فرآیند دوم را محاسبه کنید.

$M-65$  ۲-۶۵ سیستم بسته ای فرآیندی پلی تروپیک را طی می کند که حرارت افزوده شده به سیستم  $17\text{ kJ}$  و افزایش انرژی داخلی آن  $48\text{ kJ}$  می باشد. حالت اولیه سیستم  $130\text{ kPa}$  و  $0.15\text{ m}^3$  و فشار نهایی  $800\text{ kPa}$  است. حجم نهایی در فرآیند را محاسبه نمایید. اگر سیستم مذکور هوا بود، چه جرمی از آن لازم می باشد؟

$M = 2.66 \text{ kg}$  هوا به طور ایزوترمال (دما ثابت) با یک مکانیزم پیستون - سیلندر در  $0.1 \text{ MPa}$  و  $110^\circ \text{C}$  تا  $450 \text{ kPa}$  تراکم شده است. کار لازم برای تراکم و حرارت افزوده شده را محاسبه کنید.

### مراجع

- 1 Callen, H. B.: "Thermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1960.
- 2 Hatsopoulos, G. N., and J. H. Keenan: "Principles of General Thermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
- 3 Reynolds, W. C.: "Thermodynamics," 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.
- 4 Sears, F. W.: "Thermodynamics," 2d ed., Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1953.
- 5 Van Wylen, G. J., and R. E. Sonntag: "Fundamentals of Classical Thermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
- 6 Sweigert, R. L., and M. W. Beardsley: *Bull. No 2*, Georgia School of Technology, 1938.

## فصل ۳

### خواصّ ماکروسکپی موادّ خالص

#### ۳-۱ مقدمه

خواصّ یک ماده بستگی به ساختمان ملکولی آن دارد. تعداد فازها، ماهیت همگن و یا ناهمگن ماده و انواع انرژی مربوطه به آن همگی در تعداد و انواع خواصی که برای تجزیه و تحلیل لازم است موثر می‌باشند. به عنوان مثال اگر منظور محاسبه مقدار انرژی آزاد شده در اثر شکست یک اتم اورانیم <sup>۲۳۵</sup>U باشد، نیاز به دانستن ساختمان پروتون - نوترون و انرژی اتصال ملکولی <sup>۱</sup> آن می‌باشد. برای تعیین انرژی لازم جهت تولید بخار آب، احتیاج به دانستن انرژی تبخیر آب می‌باشد. برای بررسی ماده‌ای که بر روی آن کار الکتریکی و یا مغناطیسی صورت می‌گیرد، احتیاج به اطلاعاتی راجع به خواصّ الکتریکی و یا مغناطیسی آن ماده می‌باشد.

تعداد خواصّ لازم برای مشخص کردن حالت ماده به روشنی بستگی به ماهیت عکس‌العملهای داخلی انرژی <sup>۲</sup> دارد. البته در یک ماده تنها عکس‌العملهای داخلی حرارت و کار می‌تواند موجود باشد. ولی عکس‌العملهای داخلی کار می‌تواند اشکال مختلف داشته باشد. برای مثال یک گاز یونیزه شده رادر نظر بگیرید. یک طریق انجام کار بر روی گاز تراکم کردن آن است. طریق دیگر این است که آن رادر

---

1- Binding energy

2- Energy interactions

معرض یک پتانسیل الکتریکی قرار دهیم به طوری که کار الکتریکی انجام شده باعث حرکت ذرات باردار بشود. روش دیگر انجام کار عبور دادن گاز از میان یک حوزه مغناطیسی و یا تغییر دادن جهت قطبهای مغناطیسی در گاز می باشد. برای محاسبه کار تراکمی، احتیاج به اطلاعاتی درباره فشار و حجم در دماهای متفاوت می باشد. برای محاسبه کار الکتریکی، احتیاج به اطلاعاتی درباره هدایت الکتریکی به صورت تابعی از فشار و دما (و احتمالاً به صورت تابعی از شدت حوزه الکتریکی) می باشد. برای محاسبه کار مغناطیسی، احتیاج به اطلاعاتی درباره قابلیت هدایت و گشتاور مغناطیسی دو قطبی گاز داریم. تحت این شرایط، تعداد کل خواص مستقل لازم جهت مشخص کردن حالت گاز را با کمی استدلال می توان به دست آورد.

#### خواص متمرکز و گسترده

اماماً تعیین انرژی حرارتی داخلی یک ماده ( $U$ ) مورد نظر است. برای هر نوع کار ممکن (تغییر حجم - الکتریکی - مغناطیسی و غیره) یک خاصیت متمرکز<sup>۲</sup> ویژه (فشار - پتانسیل الکتریکی - پتانسیل مغناطیسی) مربوط به آن وجود دارد که قابلیت واحد جرم و یا واحد حجمی از سیستم را برای انجام آن نوع کار بخصوص بیان می کند. همچنین برای هر نوع کاری خاصیت گسترده<sup>۳</sup> ویژه ای (حجم - قابلیت هدایت و گشتاور مغناطیسی دو قطبی) موجود است که مقدار کل کار انجام شده در آن نوع را تشریح می کند. خاصیت متمرکز معرف نیرو و خاصیت گسترده معرف تغییر مکان در هر نوع کاری است. انرژی داخلی تابعی از عکس العملهای داخلی کار ممکن و عکس العمل داخلی حرارت می باشد. دما خاصیت متمرکزی است که عکس العمل داخلی حرارت را تشریح می کند.<sup>۴</sup>

با توجه به این بحث مختصر، می توان نتیجه گرفت که برای مشخص کردن حالت یک ماده، یک خاصیت متمرکز برای هر نوع کار و یک خاصیت متمرکز جهت تشریح مقدار عکس العملهای

1- Magnetic dipole moment

2- Intensive property

3- Extensive property

۴- در این بررسی از انرژیهای جنبشی و پتانسیل صرف نظر شده است. اینها البته مهمند، اما معمولاً به صورت

جملات جداگانه در تابع کلی انرژی داخلی  $E$  به کار برده می شوند.

داخلی حرارت لازم است. البته این اصل به سیستمهای در حال تعادل که منظور اصلی ماست، محدود می‌شود. در ضمن لازم است که این خواص مستقل از یکدیگر باشد.

### اصل حالت

این بحث مختصر، اصل حالت در فصل اول را به طور ضمنی بیان می‌کند، که می‌توان آن را به صورت زیر بیان کرد:

تعداد خواص مستقل لازم برای مشخص کردن حالت ترمودینامیکی یک سیستم برابر با تعداد انواع کار علاوه یک می‌باشد.

در بارهٔ ملاحظات دیگر هم که به اصل حالت مربوط می‌شود کلاین و کوینگ<sup>۱</sup> [1] و هاتسوپولوس و کینان<sup>۲</sup> [2] بحث کرده‌اند.

برای یک ماده ساده فقط یک نوع کار ممکن است. یک گاز یونیزه نشده، بدون گشتاور مغناطیسی و دوقطبی، یک چنین ماده‌ای است. در این حالت تنها یک نوع کار به صورت تغییر حجم وجود دارد، بنابراین برای مشخص کردن حالت گاز دو خاصیت مستقل لازم است. هر دو خاصیت از فشار، دما یا حجم مخصوص این کار را انجام می‌دهد.

ماده‌ای که همگن بوده و دارای ترکیب شیمیایی یکسانی در تمام فازها باشد، ماده خالص نامیده می‌شود. آب یک ماده خالص است زیرا ترکیب شیمیایی آن در تمام فازهای متفاوت (حتی برای مخلوط آب و بخار) یکسان است. مخلوطی از گازها مثل هوا مانند یک ماده خالص رفتار می‌کند، اما اگر مخلوط را به اندازه‌ای سرد کنیم که چند جزئی از آن به صورت فاز مایع درآید، مخلوط را به علت یکسان نبودن ترکیب شیمیایی آن در تمام فازها، دیگر نمی‌توان به صورت یک ماده خالص در نظر گرفت. ماده خالص به خاطر اهمیت زیادش در خیلی از کاربردهای عملی مورد توجه زیاد است.

منظور از این فصل تشریح خواص ترمودینامیکی چند ماده ساده مشخص می‌باشد. اطلاعات

1- Kline and Koenig

2- Hatsopoulos and Keenan

عددی مخصوص ارائه شده در ضمیمه برای حلّ مسائل فصول بعدی می‌تواند به کار رود. خواصّ به صورت کاملاً تجربی در این مرحله ارائه شده است، یعنی براساس اندازه‌گیریهای حاصل از آزمایش. درباره محاسبه خواصّ ترمودینامیکی براساس ملاحظات میکروسکپی در فصل ۱۳ بحث خواهد شد.

### مطالب مروری

منظور از اصطلاحات زیر چیست؟ انواع کار، خواصّ متمرکز و گسترده، اصل حالت، ماده ساده، ماده خالص.

## ۳-۲ خواصّ مواد خالص

رفتار یک ماده خالص را که دارای عکس‌العملهای داخلی کار از نوع کار تراکمی (تغییر حجم) است در نظر می‌گیریم. در چنین ماده‌ای تنها دو خاصیت مستقل برای تعریف حالت سیستم لازم است. برای نشان دادن رفتار فیزیکی چنین موادی، آب معمولی را که یکی از متداولترین ماده‌ها می‌باشد، در نظر می‌گیریم. این ماده ممکن است در فازهای متفاوت موجود باشد.

- ۱ - یک فاز جامد خالص موسوم به یخ
- ۲ - یک فاز مایع خالص
- ۳ - یک فاز بخار خالص موسوم به بخار آب
- ۴ - یک مخلوط در حال تعادل فازهای مایع و بخار
- ۵ - یک مخلوط در حال تعادل فازهای مایع و جامد
- ۶ - یک مخلوط در حال تعادل فازهای جامد و بخار

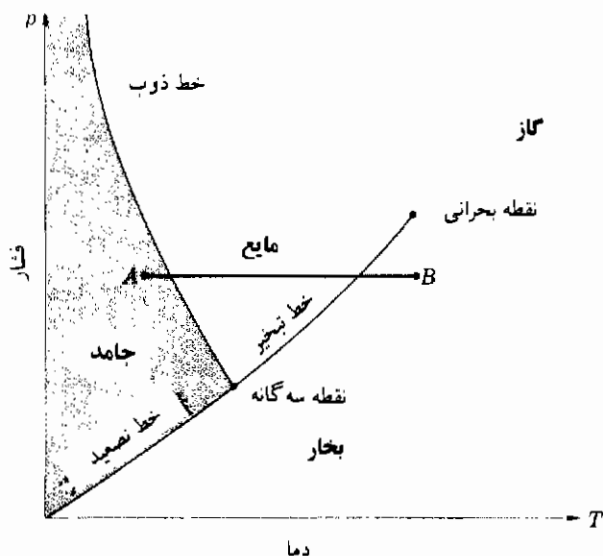
نواحی فازهای مختلف برای آب در نمودار فشار-دما، شکل ۱-۳ نشان داده می‌شود.

### ذوب - تبخیر و تصعید

هنگامی که یک جامد به مایع تبدیل می‌شود، می‌گوییم که فرآیند ذوب<sup>۱</sup> انجام پذیرفته؛



وقتی که یک مایع به بخار تبدیل می شود، فرآیند تبخیر<sup>۱</sup> و بالاخره موقعی که یک جامد مستقیماً به بخار تبدیل شود، فرآیند تصعید<sup>۲</sup> صورت گرفته است. برای تغییر فاز در هر یک از این فرآیندها باید انرژی به ماده داده شود. دمایی که این تغییرات در آن صورت خواهد گرفت، بستگی به فشار اعمال شده بر روی ماده دارد. دی اکسید کربن در فشار معمولی اتمسفر تصعید خواهد شد، یعنی از صورت جامد بدون مایع شدن مستقیماً به بخار تبدیل می شود. دمای تصعید برای  $\text{CO}_2$  در فشار اتمسفر تقریباً برابر با  $-78^\circ\text{C}$  می باشد.



شکل ۳-۱ نمودار فشار - دما برای ماده‌ای که با انجماد منبسط می شود.

همان طوری که به وسیله خط فشار ثابت  $AB$  در شکل ۳-۱ نشان داده شده، آب در فشار اتمسفر می تواند در هر سه فاز وجود داشته باشد. اگر به یخ در فشار ثابت حرارت داده شود دما تا رسیدن به خط ذوب و شروع به آب شدن ازدیاد می یابد. فرآیند آب شدن در دمای ثابت تا زمانی که تمام یخ جامد به مایع تبدیل شود، ادامه می یابد. حرارت بیشتر تا رسیدن به خط تبخیر باعث ازدیاد دمای مایع می گردد. حرارت اضافی بیشتر باعث تغییر مستمر مایع به بخار شده و در فرآیند تبخیر دما ثابت باقی

1- Vaporization

2- Sublimation

می‌ماند. زمانی که تمام مایع به بخار تبدیل شد، حرارت اضافی بار دیگر باعث ازدیاد دما می‌شود. در فشار اتمسفر دمای تبخیر آب  $100^{\circ}\text{C}$  ( $212^{\circ}\text{F}$ ) و دمای ذوب تقریباً برابر با  $0^{\circ}\text{C}$  ( $32^{\circ}\text{F}$ ) می‌باشد. ما از شکل ۳-۱ در می‌یابیم که تغییر فشار باعث تغییر نقطه انجماد و نقطه تبخیر مایع می‌گردد. برای آب، ازدیاد فشار باعث بالا رفتن دمای تبخیر و پایین آمدن دمای انجماد می‌شود. باید توجه داشت که شکل ۳-۱ با مقیاس واقعی ترسیم نشده است. در حالت واقعی خط ذوب تقریباً عمودی است و افزایش فشار زیادی لازم است تا دمای ذوب را به مقدار قابل ملاحظه‌ای پایین بیاورد.

خطوط ذوب، تبخیر و تصعید بترتیب معرف مخلوط جامد - مایع، مخلوط مایع - بخار و مخلوط جامد - بخار است.

نقطه سه‌گانه<sup>۱</sup> حالتی است که مخلوط در حال تعادل سه فاز بتواند برقرار باشد.

نقطه بحرانی<sup>۲</sup> حالتی است که فاز بخار خالص دارای خواص مشابهی با فاز مایع خالص در همان فشار و دما باشد. نمی‌توان تمایزی بین حالت‌های مایع و بخار در فشارها و دماهای فوق بحرانی مشاهده کرد. به عبارت دیگر سطح هلالی<sup>۳</sup> شکل مجزاکننده فازهای مایع و بخار در نقطه بحرانی از بین می‌رود.

### ۳-۳ نواحی اشباع

سه خط در حال تعادل (ذوب - تبخیر و تصعید) در شکل ۳-۱ به نواحی اشباع موسومند. بنابراین می‌توان گفت که خط تبخیر ناحیه اشباع بین مایع و بخار را معرفی می‌کند. بخار حاضر در یک چنین مخلوطی به نام بخار اشباع و مایع حاضر در این مخلوط به نام مایع اشباع موسوم است.

برای نشان دادن خواص دیگر، فرآیند فشار ثابت  $AB$  در شکل ۳-۱ را که بر روی نمودار  $p-v$  شکل ۳-۲ و سطح شکل ۳-۳ نیز ترسیم شده است، در نظر می‌گیریم. در اینجا ما ماهیت نواحی اشباع را خیلی واضح‌تر می‌بینیم. هر ناحیه وضعیتی را معرفی می‌کند که فشار و دما، در حالی که تغییر قابل

1- Triple point

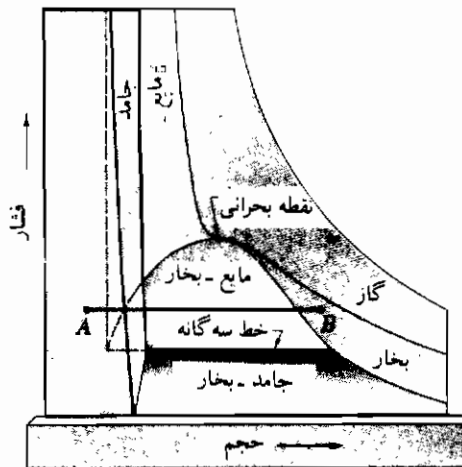
2- Critical point

3- Meniscus

ملاحظه‌ای در حجم مخصوص موجود است، ثابت باقی می‌ماند. در ناحیه اشباع مایع - بخار، ازدیاد حجم مخصوص ( حجم بازای واحد جرم ) در اثر ازدیاد نسبیتی از جرم کل که به صورت بخار موجود است، حاصل می‌شود .

### کیفیت و رطوبت

کیفیت<sup>۱</sup>  $x$  معرف نسبیتی از جرم است که به صورت بخار موجود می‌باشد و رطوبت<sup>۲</sup> معرف نسبیتی از جرم است که به صورت فاز مایع وجود دارد. به طور واضح ،



شکل ۳-۲ نمودار فشار - حجم برای ماده‌ای که با انجماد منبسط می‌شود

$$\text{رطوبت} = 1 - x \quad (۳-۱)$$

واژه مخلوط تر به طور وسیع برای مخلوطهای مایع - بخاری که دارای کیفیت کمتر از ۱۰۰

1- Quality

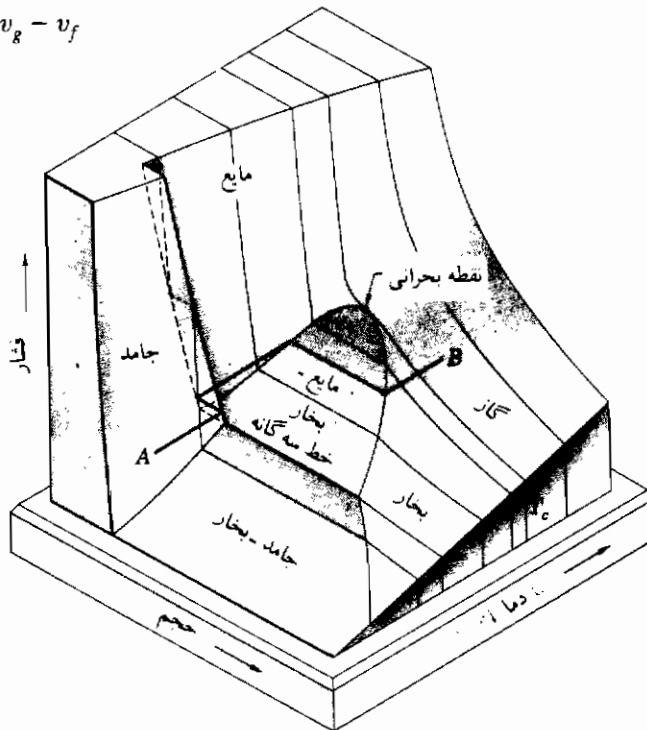
2- Moisture

درصد باشد، به کار می‌رود. برای مشخص کردن خواص اشباع ماده‌ها از حروف  $i$ ،  $f$  و  $g$  به ترتیب برای فازهای جامد، مایع و بخار استفاده می‌شود. بنابراین حجم مخصوص مایع اشباع  $v_f$  و حجم مخصوص بخار اشباع  $v_g$  خواهد بود. حجم مخصوص یک مخلوط در حال تعادل مایع و بخار به وسیله رابطه زیر داده می‌شود.

$$\begin{aligned} v &= \frac{V}{m} = \frac{1}{m} (m_f v_f + m_g v_g) \\ &= \frac{m_f}{m} v_f + x v_g \\ &= (1 - x) v_f + x v_g \end{aligned}$$

با ارائه تعریف :

$$v_{fg} = v_g - v_f \quad (۳-۲)$$



شکل ۳-۳ سطح  $p-v-T$  برای ماده‌ای که با انجماد منبسط می‌شود.

می توان رابطه زیر را به دست آورد

$$v = v_f + x v_{fg} \quad (۳-۳)$$

چندین واژه مهم دیگر به شرح زیر تعریف می شود:

بخاری داغ (مافوق گرم)<sup>۱</sup> نامیده می شود که در دمایی بزرگتر از درجه حرارت اشباع مربوط به آن فشار موجود باشد. مایع مادون سرد<sup>۲</sup> و یا مایع متراکم شده<sup>۳</sup> مایعی است که در دمایی کمتر از درجه حرارت اشباع مربوط به آن فشار باشد و یا فشاری بزرگتر از فشار اشباع مربوط به آن دما داشته باشد. این دو واژه با هم مترادف است.

یک سطح  $p-v-T$  سه بعدی برای ماده ای مانند آب (که با انجماد منبسط می شود) در شکل ۳-۳ نشان داده می شود. یک شکل مشابه برای ماده ای که با انجماد منقبض می شود در شکل ۳-۴ نشان داده می شود.

قبلاً گفته شد که فقط دو خاصیت مستقل برای معرفی حالت یک ماده خالص ساده مورد نیاز است. کدام دو خاصیت را باید به کار برد؟ دما یکی از انتخابهای منطقی است. واضح است که فشار نمی تواند انتخاب دیگر باشد زیرا فشار و دما هنگامی که ماده در نواحی اشباع باشد، مستقل از یکدیگر نیستند، یعنی یک خط دما ثابت در ناحیه اشباع یک خط فشار ثابت نیز می باشد. چون حجم مخصوص در این نواحی مستقل از فشار و دما می باشد بنابراین می تواند به عنوان خاصیت مستقل دیگر انتخاب گردد. در ناحیه تک فاز دما و فشار می توانند به عنوان خواص مستقل انتخاب گردند.

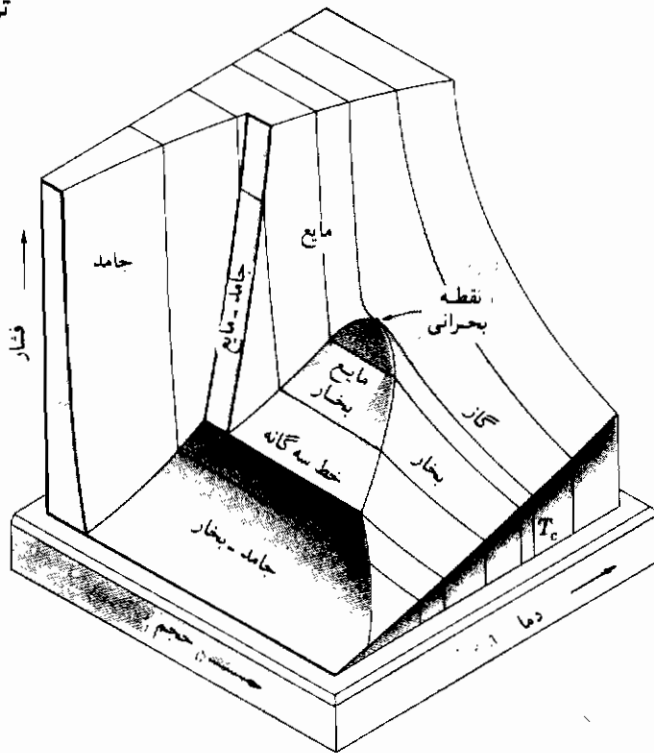
خواص انرژی:

خواص انرژی مواد مورد نظر است. انرژی داخلی مخصوص  $u$  و انتالپی مخصوص  $h$  خواصی است که معمولاً برای مواد خالص جدول بندی شده است. از بحثهای قبلی می توان حدس زد که این خواص را می توان به صورت توابعی از دما و حجم مخصوص بیان کرد.

1- Superheated

2- Subcooled liquid

3- Compressed liquid



شکل ۳-۴ سطح  $p-v-T$  برای ماده‌ای که با انجماد منقبض می‌شود.

$$u = u(T, v)$$

$$h = h(T, v)$$

در ناحیه مخلوط تر، این خواص می‌تواند از طریق مشابه با آنچه برای حجم مخصوص به کار رفت محاسبه شود، یعنی:

$$u = u_f + xu_{fg}$$

$$h = h_f + xh_{fg}$$

که  $h_{fg} = h_g - h_f$  و  $u_{fg} = u_g - u_f$  به ترتیب انرژی داخلی و انتالپی تبخیرند.

خاصیت دیگری که آنتروپی نامیده می‌شود در حل خیلی از مسائل علمی کاربرد دارد، همان‌طوری که در فصل ۵ خواهیم دید و معمولاً همراه با انرژی داخلی و انتالپی در جداول ارائه

می‌شود. در ناحیه تبخیر دو فازی - انتروپی نیز شکل مشخصه زیر را دارد

$$s = s_f + xs_{fg}$$

که  $s_{fg} = s_g - s_f$  آنتروپی تبخیر می‌باشد.

خواص چندین ماده در ضمیمه جدول بندی شده است، که جامع ترین آن مربوط به آب و بخارش می‌باشد. در ناحیه مایع متراکم شده، خواص برای آب در جدول A-۱۱ به فرم تصحیحاتی نسبت به خواص مایع اشباع شده در دمای مایع جدول بندی شده است. به طور کلی این تصحیحات همان طوری که در مثال آب متراکم شده در  $100^\circ\text{F}$  و  $1000 \text{ psia}$  ملاحظه می‌شود، بزرگ نیست. در  $100^\circ\text{F}$  داریم (به جدول A-۷ و A-۱۱ نگاه کنید)

$$v_f = 0.016132 \text{ ft}^3/\text{lbm}$$

$$h_f = 67.97 \text{ Btu}/\text{lbm}$$

$$p_{\text{sat}} = 0.9492 \text{ psia}$$

با مراجعه به جدول A-۱۱ تصحیحات برای این مقادیر را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$(v - v_f) \times 10^5 = -5.2$$

$$h - h_f = +2.64$$

به طوری که خواص برای مایع متراکم شده در  $100^\circ\text{F}$  و  $1000 \text{ psia}$  برابر است با

$$v = 0.016132 - 5.2 \times 10^{-5} = 0.01608 \text{ ft}^3/\text{lbm}$$

$$h = 67.97 + 2.64 = 70.61 \text{ Btu}/\text{lbm}$$

در اکثر حالات استفاده از جدول A-۱۱ برای مایع متراکم شده مناسب نخواهد بود و جدول A-۱۰ یک جدول بندی مستقیم خواص مایع متراکم شده را ارائه می‌دهد. باید توجه شود که کمترین فشار در جدول A-۱۱،  $200 \text{ psia}$  است. کمتر از این مقدار، مقادیر تصحیح آنقدر کوچک می‌باشد که می‌توان معمولاً از آنها صرف نظر کرد و خواص مایع اشباع در دمای مایع را برای خواص مایع متراکم

به کار برد.

در اینجا متوجه می‌شویم که خواص مایعات در درجه اول تابعی از دما است و فشار تأثیر کمی بر آن دارد. همان‌طور که در محاسبات بعدی نشان داده شده است.

### مثال ۳-۱

حجم مخصوص  $v$ ، انتالپی  $h$  و آنترופی  $s$  آب را تحت شرایط زیر تعیین کنید:

(الف)  $7/5 \text{ MPa}$  و  $100^\circ\text{C}$

(ب)  $4 \text{ MPa}$  و  $360^\circ\text{C}$

(ج)  $150 \text{ kPa}$  و  $10\%$  درصد کیفیت

(د)  $300 \text{ kPa}$  و  $10\%$  درصد رطوبت

(ه) مایع اشباع شده در  $100 \text{ kPa}$

(و) بخار اشباع در  $100 \text{ kPa}$

**حل:**

(الف) این شرایط مایع متراکم شده است زیرا  $7/5 \text{ MPa}$  از فشار اشباع مربوط در  $100^\circ\text{C}$  ( $101/4 \text{ kPa}$ ) بزرگتر است. بنابراین با مراجعه به جدول  $A-10$  مقادیر زیر به دست می‌آید:

$$v = 1.0397 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h = 424.62 \text{ kJ/kg}$$

$$s = 1.3011 \text{ kJ/kg.K}$$

(ب)  $360^\circ\text{C}$  از دمای اشباع برای  $4 \text{ MPa}$  ( $250/4^\circ\text{C}$ ) بزرگتر است. بنابراین این ناحیه داغ است و با مراجعه به جدول  $A-9$  چنین به دست می‌آید:

$$v = 0.06788 \text{ m}^3/\text{kg}$$



$$h = 3117.2 \text{ kJ/kg}$$

$$s = 6.6215 \text{ kJ/kg.K}$$

(ج) کیفیت ۱۰ درصد به ما می‌گوید که شرایط ناحیه اشباع در ۱۵۰ kPa است بنابراین با مراجعه به جدول A-۸M (جدول فشار اشباع) به دست می‌آید

$$v_f = 1.0528 \times 10^{-3}$$

$$v_g = 1.159 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_f = 467.11$$

$$h_{fg} = 2226.5 \text{ kJ/kg}$$

$$s_f = 1.4336$$

$$s_g = 7.2233 \text{ kJ/kg.K}$$

کیفیت ۱ / ۰ = x به ما داده شده، بنابراین:

$$\begin{aligned} v &= v_f + xv_{fg} = 1.0528 \times 10^{-3} + (0.1)(1.159 - 1.0528 \times 10^{-3}) \\ &= 0.11685 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$h = h_f + xh_{fg} = 467.11 + (0.1)(2226.5) = 689.76 \text{ kJ/kg}$$

$$s = s_f + xs_{fg} = 1.4336 + (0.1)(7.2233 - 1.4336) = 2.0126 \text{ kJ/kg.K}$$

(د) این مسأله مشابه قسمت (ج) است. فقط توجه داریم که

$$\text{کیفیت} = 1 - \text{رطوبت}$$

$$x = 1 - 0.1 = 0.9$$

بنابراین

سپس با مراجعه به جدول A-۸M در ۳۰۰ kPa مقادیر زیر تعیین می‌گردد

$$v = 0.54533 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h = 2508.9 \text{ kJ/kg}$$

$$s = 6.4599 \text{ kJ/kg.K}$$

(ه، و) این خواص مستقیماً از جدول A-۸M در ۱۰۰ kPa خوانده می‌شود

مایع اشباع	بخار اشباع
$v_f = 1.0432 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$	$v_g = 1.694 \text{ m}^3/\text{kg}$
$h_f = 417.46 \text{ kJ/kg}$	$h_g = 2675.5 \text{ kJ/kg}$
$s_f = 1.3026 \text{ kJ/kg.K}$	$s_g = 7.3594 \text{ kJ/kg.K}$

### ۳-۴ معادلات حالت

معادله حالت عبارتی تحلیلی می‌باشد که خواص مواد را به هم مربوط می‌کند. رابطه اخذ شده در بخش ۱-۴ معادله حالت خیلی ساده‌ای برای گاز ایده آل است.

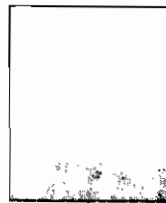
$$pv = RT \quad (۳-۴)$$

متأسفانه تمام معادلات حالت به این سادگی نیست. معادله حالت برای یک فاز جامد - مایع و یا بخار، در عمل براساس قرارداد یک منحنی بر روی نتایج حاصل از آزمایش به دست می‌آید. معمولاً رابطه متفاوتی برای هر فاز و یا ناحیه اشباع به کار می‌رود و هر معادله نسبتاً طولانی و پیچیده است.

خواص ترمودینامیکی که به صورت جدول و یا منحنی ارائه شده، نظیر آنچه در ضمیمه آورده شده است، معمولاً به جای معادله تحلیلی حالت به کار می‌رود. مادر حال حاضر از این اطلاعات استفاده خواهیم کرد و به دست آوردن معادلات حالت را به فصل ۶ موکول می‌کنیم. جداول جامع بیشتری علاوه بر معادلات حالت مناسب برای استفاده کامپیوتر به وسیله رینولدز [5] داده شده است.

### مثال ۳-۲

ظرف صلب سربسته‌ای به حجم  $1 \text{ ft}^3$  حاوی مخلوط مایع و بخار آب در فشار  $12 \text{ psia}$  می‌باشد. جرم کل آب در ظرف برابر با  $30 \text{ lbm}$  می‌باشد. اگر با حرارت دادن کافی فشار به  $1000 \text{ psia}$  رسانده شود، مقدار حرارت اضافه شده و کیفیت مخلوط را محاسبه کنید.



$W = 0$   
زیرا مخزن صلب است

شکل مثال ۳-۲

**حل:** این مسأله احتیاج به کاربرد قانون اول ترمودینامیک به علاوه اطلاعات مربوط به خواص مواد خالص دارد. چون ظرف صلب است، تغییر حجمی در سیستم وجود ندارد و از این رو کاری انجام نمی‌شود. بنابراین قانون اول به صورت زیر در می‌آید:

$$Q = \Delta U = m\Delta u \quad (a)$$

برای محاسبه انرژی داخلی احتیاج به تعیین حالت ترمودینامیکی داریم. چون ما مخلوط مایع و بخار داریم، لذا فشار و دما پارامترهای مستقلی نیستند. حجم مخصوص مخلوط برابر است با:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{30} = 0.0333 \text{ ft}^3/\text{lbm}$$

این حجم بر طبق معادله (۳-۳) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$v = v_f + xv_{fg} \quad (b)$$

برای حالت ابتدایی مشخص شده با زیرنویس ۱،

$$v_{f1} = 0.01665 \quad v_{fg1} = 32.38 \text{ ft}^3/\text{lbm} \quad (12 \text{ psia})$$

که خواص از جدول فشار-اشباع برای بخار آب داده شده در جدول A-۸ به دست می‌آید. با جایگزینی این مقادیر در معادله (b) مقدار کیفیت ابتدایی به دست می‌آید.

$$x_1 = 0.000515$$

بنابراین انرژی داخلی ابتدایی برابر است با

$$\begin{aligned} u_1 &= u_{f1} + x_1 u_{fg1} \\ &= 169.92 + (0.000515)(904.8) \\ &= 170.38 \text{ Btu/lbm} \end{aligned}$$

چون ظرف صلب است مقدار حجم مخصوص در حالت ابتدایی و نهایی ثابت باقی می‌ماند. با اختصاص دادن زیرنویس ۲ برای حالت نهایی،

$$v_{f2} = 0.0216 \quad v_{fg2} = 0.4240 \text{ ft}^3/\text{lbm} \quad (1000 \text{ psia})$$

دوباره کیفیت از معادله (b) محاسبه می‌شود،

$$v_2 = v_1 = 0.0333 \text{ ft}^3/\text{lbm}$$

نتیجه برابر است با

$$x_2 = 0.0292$$

انرژی داخل نهایی سپس به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} u_2 &= u_{f2} + x_2 u_{fg2} \\ &= 538.4 + (0.0292)(571) \\ &= 555.0 \text{ Btu/lbm} \quad (1.29 \times 10^6 \text{ J/kg}) \end{aligned}$$

انتقال حرارت از معادله (a) به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} Q &= m(u_2 - u_1) \\ &= (30)(555.0 - 170.38) = 11500 \text{ Btu} \quad (1.213 \times 10^7 \text{ J}) \end{aligned}$$

### مثال ۳-۳

بخار آب در فشار ۱۰۰ psia و کیفیت ۵۰ درصد در یک سیلندر به حجم ۵/۰ ft<sup>3</sup> قرار

دارد. سیلندر با یک پستون به طریقی درگیر است که فشار را ثابت نگه می‌دارد. محاسبه کنید مقدار حرارتی که باید به بخار اضافه گردد، تا حجم به مقدار  $2 \text{ ft}^3$  برسد.

**حل:** ابتدا قانون اول ترمودینامیک را برای این سیستم می‌نویسیم:

$$Q + W = \Delta U \quad (a)$$

کار انجام شده بر روی گاز جهت فرآیند فشار ثابت برابر است با

$$\begin{aligned} W &= - \int_{V_1}^{V_2} p dV = - p(V_2 - V_1) \\ &= - (100)(144)(2.0 - 0.5) = - 21600 \text{ ft.lbf} \quad (- 29285 \text{ J}) \end{aligned} \quad (b)$$

برای به کار بردن معادله (a) احتیاج به محاسبه تغییر انرژی داخلی بخار آب داریم. این مستلزم تعیین جرم از رابطه زیر می‌باشد.

$$\begin{aligned} m &= \frac{V_1}{v_1} \\ v_1 &= v_{f1} + x_1 v_{g1} \\ &= 0.01774 + (0.5)(4.434 - 0.01774) = 2.226 \text{ ft}^3/\text{lbm} \\ m &= \frac{0.5}{2.226} = 0.225 \text{ lbm} \quad (0.1021 \text{ kg}) \end{aligned}$$

که خواص از جدول فشار اشباع برای بخار آب در فشار ۱۰۰ psia به دست می‌آیند. حجم مخصوص نهایی برابر است با:

$$v_2 = \frac{V_2}{m} = \frac{2.0}{0.225} = 8.889 \text{ ft}^3/\text{lbm}$$

فشار نهایی برابر با فشار ابتدایی یعنی ۱۰۰ psia می‌باشد. با مراجعه به جدول اشباع برای  $v_g$  در ۱۰۰ psia، مقداری برابر با  $4/4.34 \text{ ft}^3/\text{lbm}$  به دست می‌آوریم. از آنجایی که  $v_2$  بزرگتر از  $v_g$  می‌باشد، حالت نهایی باید داغ باشد. بنابراین برای به دست آوردن دمای نهایی در ۱۰۰ psia و  $v = 8/889$  باید به جدول داغ مراجعه کنیم.

$$T_2 = 1038^\circ\text{F}$$

و انرژی داخلی نهایی برابر است با

$$u_2 = 1387.7 \text{ Btu/lbm}$$

مقادیر انرژی داخلی به طریق زیر به دست می آید.

$$\begin{aligned} u_1 &= u_{f1} + x_1 u_{fg1} = 298.3 + (0.5)(1105.8 - 298.3) \\ &= 702.05 \text{ Btu/lbm} \end{aligned}$$

حالا با جایگزینی مقادیر انرژیهای داخلی و کار در معادله (a) مقدار حرارت اضافه شده تعیین می گردد.

$$\begin{aligned} Q - \frac{21600}{778} &= m (u_2 - u_1) = (0.225)(1387.7 - 702.05) \\ Q &= 182 \text{ Btu} \quad (192 \text{ kJ}) \end{aligned}$$

### مثال ۳-۴

مخزنی صُلب که هر یالش ۵۰ cm می باشد، شامل مخلوط تری از بخار آب در  $90^\circ\text{C}$  و کیفیت ۲۰ درصد است. حرارت تا زمانی که فشار به ۵۰۰ kPa برسد اضافه می شود. حالت نهایی و مقدار حرارت اضافه شده را تعیین کنید.

**حل:** برای مخزن صلب تغییر حجمی نیست و بنابراین کاری انجام نمی گیرد. بیان قانون اول به صورت زیر در می آید:

$$Q = \Delta U = m\Delta u = m(u_2 - u_1) \quad (a)$$

از آنجایی که حجم کلی  $V$  و جرم ثابت باقی می ماند، حجم مخصوص هم باید ثابت باقی بماند.

$$v = \frac{V}{m} = v_1 = v_2 \quad (b)$$

در حالت اولیه

$$v = v_f + x v_{fg} \quad (c)$$

با مراجعه به جداول اشباع در  $90^\circ\text{C}$  داریم

$$\begin{aligned} v_{f1} &= 1.036 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} & v_{g1} &= 2.361 \text{ m}^3/\text{kg} \\ u_{f1} &= 376.85 \text{ kJ/kg} & u_{g1} &= 2464.5 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

پس از معادله (c)

$$v_1 = 0.001036 + (0.2)(2.361 - 0.001036) = 0.473 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (d)$$

حال می‌توانیم جرم را از معادله (b) و حجم کلی داده شده محاسبه کنیم.

$$m = \frac{V}{v} = \frac{(0.5)^3}{0.473} = 0.2643 \text{ kg} \quad (e)$$

حالت نهایی به وسیله مراجعه به جداول بخار آب در  $v_2 = 473 \text{ m}^3/\text{kg}$  و  $p = 500 \text{ kPa} = 5 \text{ bar}$  تعیین می‌گردد. در  $500 \text{ kPa}$  در می‌یابیم  $v_g = 374/9 \text{ m}^3/\text{kg}$ . چون دارای حجم مخصوص بزرگتری از این مقدار می‌باشیم، بنابراین حالت نهایی باید داغ باشد. با مراجعه به جدول بخار داغ در  $p = 500 \text{ kPa}$  و میان‌یابی کردن

$$T_2 = 244.3^\circ\text{C} \quad u_2 = 2721.4 \text{ kJ/kg}$$

انرژی داخلی اولیه به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\begin{aligned} u_1 &= u_{f1} + x_1 u_{fg1} \\ &= 376.85 + (0.2)(2494.5 - 376.85) \\ &= 800.38 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

حالا ما مقادیر عددی را در معادله (a) جهت محاسبه انتقال حرارت جایگزین می‌کنیم

$$Q = (0.2643)(2721.4 - 800.38) \\ = 507.7 \text{ kJ} \quad (481.3 \text{ Btu})$$

### مثال ۳-۵

مخزن صُلبی از بخار آب در  $700 \text{ kPa}$  و  $200^\circ\text{C}$  می باشد. اگر مخزن سرد شود، در چه دمایی بخار آب شروع به تقطیر می کند؟ تا چه دمایی باید ظرف خنک شود تا ۵۰ درصد جرم بخار آب تقطیر گردد؟

**حل:** چون مخزن صُلب است، حجم مخصوص در حین فرآیند سرمایش ثابت باقی می ماند. حالت اولیه بخار داغ است، بنابراین از جدول  $A-9M$

$$v_1 = 0.2999 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (4.804 \text{ ft}^3/\text{lbm}) \quad (a)$$

هنگامی که بخار آب شروع به تقطیر می کند، این حجم مخصوص بخار اشباع خواهد بود

$$v_1 = v_2 = v_{g2} = 0.2999 \quad (b)$$

با میان یابی کردن در جدول  $A-7M$ ، داریم

$$T_2 = 161.1^\circ\text{C} \\ p_2 = 636.9 \text{ kPa} \quad (92.4 \text{ psia})$$

سرمایش هنوز تا نقطه ۳ در جایی که  $x_3 = 0.5$  ادامه دارد، یعنی:

$$v_3 = v_1 = 0.2999 = v_{f3} + (0.5) v_{fg3} \quad (c)$$

اکثر حجم مربوط به قسمت بخار آب می باشد بنابراین با تقریب خیلی نزدیک

$$v_3 \sim 0.5v_{g3}$$



یا

$$\nu_{g3} \sim 0.5998$$

دوباره با مراجعه به جدول A-۷M به وسیله میان یابی نتیجه می گیریم که :

$$T_3 = 134.3\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$p_3 = 309.3\text{ kPa} \quad (44.2\text{ psia})$$

### مثال ۳-۶

یک کپسول کوچک به حجم  $0.3\text{ in}^3$ ، محتوی آب مایع در  $1000\text{ psia}$  و  $100^{\circ}\text{F}$  است. کپسول در داخل ظرفی بزرگ به حجم  $1\text{ ft}^3$  جای دارد. سپس ظرف بزرگ تخلیه شده و کپسول به وسیله مکانیزمی می شکند، به طوری که آب شروع به تبخیر کرده و ظرف بزرگ را اشغال می کند. با فرض این که مخزن بزرگ با محیط خود در تبادل حرارت باشد و به دمای تعادل نهایی  $100^{\circ}\text{F}$  برسد، کیفیت نهایی مخلوط آب و بخار را محاسبه کنید. همچنین حرارت مبادله شده با محیط را تعیین کنید.

**حل :** برای این مسأله مرز سیستم را سطح داخلی ظرف بزرگ انتخاب می کنیم. این سطح ساکن است و بنابراین کاری بر روی مرز سیستم انجام نمی شود. از قانون اول داریم :

$$Q + W = \Delta U \quad (a)$$

چون  $W = 0$  است، پس

$$Q = \Delta U = m(u_2 - u_1) \quad (b)$$

و  $V_1 = 0.3\text{ in}^3 = 1/735 \times 10^{-4}\text{ ft}^3$ ، بابه کاربردن جداول مایع متراکم شده برای آب نتیجه می گیریم :

$$\nu_1 = 0.016082\text{ ft}^3/\text{lbm}$$

$$u_1 = 67.70 \text{ Btu/lbm}$$

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{1.735 \times 10^{-4}}{1.608 \times 10^{-2}} = 0.0108 \text{ lbm}$$

جرم آب برابر است با

بنابراین حجم مخصوص نهایی برابر است با

$$v_2 = \frac{V_2}{m} = \frac{1}{0.0108} = 92.5 \text{ ft}^3/\text{lbm} \quad (5.774 \text{ m}^3/\text{kg})$$

حالت نهایی با مراجعه به جداول بخار آب با مقادیر معلوم  $T_2$  ( $100^\circ\text{F}$ ) و  $v_2$  تعیین می‌شود. در  $100^\circ\text{F}$ ،  $v_g = 25.0 \text{ ft}^3/\text{lbm}$ ، بنابراین چون  $v_2 > v_g$ ، مخلوط بخار و آب به دست می‌آید. بدین ترتیب

$$v_2 = v_{f2} + x_2 v_{fg2}$$

با به کار بردن مقادیر خواص از جدول اشباع (جدول A-7)،

$$92.5 = 0.01613 + x_2 (350.0 - 0.01613)$$

و

$$x_2 = 0.264$$

حالا انرژی داخلی نهایی از همین جدول به دست می‌آید. چون انرژی داخلی مستقیماً جدول بندی نشده است، از رابطه زیر استفاده خواهیم کرد.

$$u_2 = u_{f2} + x_2 u_{fg2} = 68.04 + (0.264)(1043.5 - 68.04) = 326 \text{ Btu/lbm}$$

حالا انتقال حرارت از معادله (b) محاسبه می‌شود.

$$Q = (0.0108)(326 - 67.6) \\ = 2.79 \text{ Btu} \quad , \quad (2943 \text{ J})$$

علامت مثبت انتقال حرارت نشان می‌دهد که حرارتی معادل  $2.79 \text{ Btu}$  باید به ظرف بزرگ داده شود تا دمای بخار در حین فرآیند انبساط - تبخیر در  $100^\circ\text{F}$  نگاهداشته شود.

### ۳-۵ خواص برای ناحیه اشباع جامد - بخار

خواص برای ناحیه اشباع جامد - بخار برای آب می تواند به صورت جدول نیز ارائه گردد. اما بخار در این ناحیه در چنان فشار کمی است که تقریباً مانند گاز ایده آل رفتار می کند و خواص آن می تواند به فرم ساده تحلیلی ارائه شود. از این رو معادلات مربوطه به شکل مناسبی در جدول ۳-۱ جمع آوری شده است. این معادلات برای ناحیه اشباع از  $40^{\circ}\text{C}$  تا  $0^{\circ}\text{C}$  ( $40^{\circ}\text{F}$  تا  $32^{\circ}\text{F}$ ) با دقت تقریباً یک درصد به کار می رود. در جدول ۳-۱ معادلاتی برای خاصیتی به نام آنترופی داده شده است. این خاصیت تا فصل ۵ تعریف نخواهد شد، اما ما برای تکمیل و رجوع بعدی آن را در اینجا آورده ایم.

اگر چه این معادلات مشخصاً مربوط به ناحیه اشباع جامد - بخار است، اما برای شرایط دیگر نیز می توان آنها را به کار برد. چون حالت جامد خیلی کم تراکم پذیر است. انرژیهای داخلی و انتالپیهای داده شده به وسیله معادله (۳-۶) می تواند برای فشارهای تا چندین اتمسفر مورد استفاده قرار گیرد. و چون حجم مخصوص حالت جامد خیلی در مقابل فشار حساس نیست، معادله (۳-۹) می تواند برای فشارهای بالاتر نیز به کار رود.

### مثال ۳-۷

با استفاده از معادلات داده شده برای ناحیه اشباع جامد - بخار و جداول بخار آب، انرژی لازم برای ذوب یک کیلو یخ  $0^{\circ}\text{C}$  را در یک فرآیند فشار ثابت تخمین بزنید.

**حل:** در  $32^{\circ}\text{F} = 0^{\circ}\text{C}$ ، آب می تواند در کلیه سه فاز (جامد - مایع و بخار) موجود باشد. از جداول بخار آب در  $32^{\circ}\text{F}$

$$h_f = 0.00 \text{ Btu/lbm}$$

و از معادله (۳-۶)

$$h_i = -158.9 + (0.467)(32) = -143.96 \text{ Btu/lbm} \quad (a)$$

برای یک فرآیند فشار ثابت داریم

جدول ۳-۱ خواص اشباع جامد - بخار برای آب

شماره معادله	محدوده دما	معادله	خاصیت
۲-۵a	۰°C تا -۴۰°C	$P_g = 35.18 \exp(18.42 - \frac{6144}{T}) \text{ kPa}$	فشار اشباع
۲-۵b	۲۲°F تا -۴۰°F	$P_g = 5.103 \exp(18.42 - \frac{11059}{T}) \text{ psia}$	
۲-۶a	۰°C تا -۴۰°C	$h_i = u_i = -334.6 + 1.96 T \text{ kJ/kg}$	انتالپی و انرژی داخلی جامد اشباع
۲-۶b	۲۲°F تا -۴۰°F	$h_i = u_i = -158.9 + 0.467 T \text{ Btu/lbm}$	
۲-۷a	۰°C تا -۴۰°C	$u_g = 2374.9 + 1.403 T \text{ kJ/kg}$	انرژی داخلی بخار اشباع
۲-۷b	۲۲°F تا -۴۰°F	$u_g = 1010.3 + 0.335 T \text{ Btu/lbm}$	
۲-۸a	۰°C تا -۴۰°C	$h_g = 2501 + 1.863 T \text{ kJ/kg}$	انتالپی بخار اشباع
۲-۸b	۲۲°F تا -۴۰°F	$h_g = 1061.0 + 0.445 T \text{ Btu/lbm}$	
۲-۹a	۰°C تا -۴۰°C	$v_i = 1.091 \times 10^{-3} + 2.5 \times 10^{-6} T \text{ m}^3/\text{kg}$	حجم مخصوص جامد اشباع
۲-۹b	۲۲°F تا -۴۰°F	$v_i = 0.01743 + 1.39 \times 10^{-6} T \text{ ft}^3/\text{lbm}$	
۲-۱۰a	۰°C تا -۴۰°C	$s_g = 1.863 \ln T + \frac{2833.6}{T} - 11.66 \text{ kJ/kg.K}$	آنترپی بخار اشباع
۲-۱۰b	۲۲°F تا -۴۰°F	$s_g = 0.445 \ln T + \frac{1218.2}{T} - 3.046 \text{ Btu/lbm.}^\circ\text{R}$	
۲-۱۱a	۰°C تا -۴۰°C	$s_i = -1.223 + 7.747 \times 10^{-3} T \text{ kJ/kg.K}$	آنترپی جامد اشباع
۲-۱۱b	۲۲°F تا -۴۰°F	$s_i = -0.325 + 0.001028 T \text{ Btu/lbm.}^\circ\text{R}$	

$$dQ_p = dh_p$$

$$Q_p = \Delta h_p = h_f - h_i = 0 - (-143.96) \quad (b)$$

$$= 143.96 \text{ Btu/lbm}$$

$$= 317.09 \text{ Btu/kg}$$

$$= 334.5 \text{ kJ/kg}$$

### ۳-۶ گرمای ویژه (حرارت‌های مخصوص)

در فصل دوم گرمای ویژه در حجم ثابت و فشار ثابت چنین تعریف شد:

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (3-12)$$

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (3-13)$$

بنابراین موقعی که جداول انتالپی و انرژی داخلی در دسترس باشد، می‌توان بسادگی با انجام دیفرانسیلهای مشخص شده، مقادیر گرمای ویژه را به دست آورد. مثال زیرین چنین محاسبه‌ای را نشان می‌دهد.

### مثال ۳-۸

با استفاده از اطلاعات جداول بخار ناحیه داغ، گرمای ویژه در فشار ثابت را برای بخار آب در ۴۰۰ psia و ۶۰۰°F محاسبه کنید.

**حل:** با یک تقریب عددی رابطه مشتق جزئی را برای  $c_p$  به کار خواهیم برد. از جداول بخار داغ در ۴۰۰ psia نتیجه می‌گیریم

$$h = 1245.2 \text{ Btu/lbm} \quad \text{در } 500^\circ\text{F}$$

$$h = 1362.5 \text{ Btu/lbm} \quad \text{در } 700^\circ\text{F}$$

سپس به‌طور تقریبی می‌توان نوشت:

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \approx \left( \frac{\Delta h}{\Delta T} \right)_p = \frac{h_{700} - h_{500}}{700 - 500}$$

$$= \frac{1362.5 - 1245.2}{700 - 500} = 0.587 \text{ Btu/lbm}^\circ\text{F}$$

در این محاسبه فرض می‌کنیم که مقدار گرمای ویژه مربوط به مقدار متوسط  $500^\circ\text{F}$  و  $700^\circ\text{F}$  یا مقدار آن در  $600^\circ\text{F}$  است.

### ۳-۷ ضریب انبساط

دو خاصیت دیگر مواد تراکم‌پذیر ساده مهم است. ضریب انبساط حجمی<sup>۱</sup> " $\beta$ " بر طبق تعریف برابر با تغییر حجم نسبت به دما در فشار ثابت و به ازای واحد حجم می‌باشد.

$$\beta = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (3-14)$$

قابلیت تراکم‌پذیری دما ثابت<sup>۲</sup> " $k$ " بر طبق تعریف تغییر حجم نسبت به فشار در دمای ثابت و بازای واحد حجم می‌باشد.

$$k = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \quad (3-15)$$

این دو خاصیت خیلی مهم است زیرا می‌توان آنها را به آسانی از راه آزمایش تعیین کرد. برای یک گاز ایده‌آل، روابط خیلی ساده‌ای به طریق زیر می‌توان به دست آورد. چون

$$v = \frac{RT}{p}$$

پس

$$\beta = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{v} \frac{R}{p} = \frac{1}{T} \quad (3-16)$$

$$k = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = -\frac{1}{v} \left( -\frac{RT}{p^2} \right) = \frac{1}{p} \quad (3-17)$$

1- Volume coefficient of expansion

2- Isothermal compressibility

قابلیت تراکم پذیری دما ثابت کاملاً مفید است، اگر در محاسبات کار لازم در تراکم مایعات و جامدات به کار رود. کار در واحد جرم به صورت زیر بیان می شود:

$$w = - \int p dv \quad (3-18)$$

برای یک فرآیند دما ثابت (ایزوترمال) تغییر حجم برحسب  $k$  بوسیله رابطه زیر بیان می شود

$$dv_T = - kv dp_T$$

با جایگزین کردن این رابطه در معادله (۳-۱۸) به دست می آید

$$w_T = \int_{p_1}^{p_2} pkv dp_T \quad (3-19)$$

برای خیلی از مایعات و جامدات،  $k$  تقریباً برای حدود تغییرات وسیع فشار، ثابت است. اگر حجم مخصوص به منظور محاسبه انتگرال معادله (۳-۱۹) ثابت در نظر گرفته شود، داریم

$$w_T = \frac{kv}{2} (p_2^2 - p_1^2) \quad (3-20)$$

بنابراین معادله (۳-۲۰) می تواند برای تخمین کار لازم در تراکم مایعات و جامدات جهت ازدیاد فشارها هنگامی که دما ثابت باقی می ماند، به کار رود.

مقادیر واقعی بعضی از ضرایب انبساط در جدول ۳-۲ خلاصه شده است.

### مثال ۳-۹

۷۵ کیلوگرم آب در یک محفظه بسته از ۱۴۰ kPa تا ۵ MPa / ۷ متر اکم می گردد، در حالی که دما در ۴۰°C ثابت باقی می ماند. کار دما ثابت را در این فرآیند محاسبه کنید.

**حل:** معادله (۳-۱۰) برای این مسأله به کار میرود. برای تخمین مقدار  $k$  از جدول مایع متراکم شده و تقریب سازی استفاده می کنیم.

$$k = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \approx -\frac{1}{v} \left( \frac{\Delta v}{\Delta p} \right)_T \quad (a)$$

از جدول دمای اشباع (جدول A-۷M،  $40^\circ\text{C}$ )

$$v_f = 1.0078 \text{ cm}^3/\text{g} = 1.0078 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$$

از جدول مایع متراکم می‌توانیم مقدار حجم مخصوص در  $40^\circ\text{C}$  و  $7500 \text{ kPa}$  را به دست آوریم

$$v = 1.0045 \text{ cm}^3/\text{g}$$

پس با استفاده از تقریب‌سازی معادله (a)

$$k \approx -\frac{1}{1.0078} \left( \frac{1.0045 - 1.0078}{7500 \text{ kPa} - 140 \text{ kPa}} \right)_{40^\circ\text{C}} \left( \frac{1}{1000} \right)$$

$$= 4.45 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N} \quad (\text{Pa}^{-1})$$

حالا کار دما ثابت را به ازای هر کیلوگرم از معادله (۳-۲۰) محاسبه می‌کنیم

$$w_T = \frac{kv}{2} (p_2^2 - p_1^2)$$

$$= \frac{(4.45 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}) (1.0078 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg})}{2}$$

$$\times [(7.5 \times 10^6)^2 - (140 \times 10^3)^2] \text{ N}^2/\text{m}^4 = 12.61 \text{ J/kg}$$

$$W_T = mw_T = (75)(12.61)$$

$$= 945.7 \text{ J}$$

### مثال ۱۰-۳

در  $300 \text{ K}$  برای مس،  $\bar{v} = 7.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g.mol}$  و  $k = 0.776 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dyn}$

با  $M = 63/54$  می‌باشد. کار لازم را جهت تراکم یک مکعب با ضلع  $2 \text{ cm}$  از  $1 \text{ atm}$  تا فشار  $1000 \text{ atm}$  محاسبه کنید، در حالی که دما در  $300 \text{ K}$  ثابت باقی بماند.



جدول ۳-۲ ضریب انبساط حجمی برای مواد مختلف در ۲۵°C

ماده	$\beta$	$\beta$
	$^{\circ}\text{F}^{-1} \times 10^{-6}$	$^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$
<b>جامدها</b>		
آلمینیم	۳۹ / ۹	۷۱ / ۸
مس	۲۷ / ۶	۴۹ / ۷
طلا	۲۳ / ۷	۴۲ / ۷
آهن	۱۹ / ۵	۳۵ / ۱
منیزیم	۴۲ / ۰	۷۵ / ۶
نیکل	۲۱ / ۶	۳۸ / ۹
نقره	۲۳ / ۰	۵۹ / ۴
فولاد ورق <i>AISI ۳۰۴</i>	۲۹ / ۷	۵۳ / ۵
تنگستن	۷ / ۵	۱۳ / ۵
شیشه پیرکس	۵ / ۴	۹ / ۷
یخ	۸۴ / ۹	۱۵۲ / ۸
چوب، بلوط	۸ / ۱	۱۴ / ۶
بتن	۲۴ / ۰	۴۳ / ۲
<b>مایعات</b>		
اسید استیک	۶۰۰	۱۰۸۰
الکل اتیل	۶۱۰	۱۰۹۸
بنزن	۷۷۰	۱۳۸۶
گلیسرین	۲۸۰	۵۰۴
اسید هیدروکلریک	۲۷۰	۴۸۶
نفت خام (تقریبی)	۴۵۰	۸۱۰
آب	۱۱۵	۲۰۷

**حل :** دوباره معادله (۳-۲۰) را به کار می‌بریم. بر اساس یک مول

$$W_T = \frac{kv}{2} (p_2^2 - p_1^2)$$

$$\bar{v} = 7.062 \text{ cm}^3/\text{g.mol} = 7.062 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg.mol}$$

$$k = 0.776 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dyn} = 0.776 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$$

$$W_T = \frac{(0.776 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N})(7.062 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg.mol})}{2} \\ \times (1000^2 - 1^2)(1.0132 \times 10^5 \text{ N/m}^2)^2 \\ = 281.3 \text{ J/kg.mol}$$

تعداد مول‌ها برابر است با

$$\eta = \frac{V}{\bar{v}} = \frac{2.0^3 \times 10^{-6}}{7.062 \times 10^{-3}} = 1.133 \times 10^{-3} \text{ kg.mol}$$

بنابراین کار کل برابر است با

$$W_T = (1.133 \times 10^{-3} \text{ kg.mol})(281.3 \text{ J/kg.mol}) \\ = 0.319 \text{ J}$$

### خودآزمایی (سؤالات مروری)

- ۱- ماده خالص چیست؟
- ۲- تفاوت خواص متمرکز با گسترده چیست؟
- ۳- تفاوت ماده خالص با ماده ساده چیست؟
- ۴- پدیده فیزیکی تبخیر در فشار ثابت را تشریح کنید.
- ۵- پدیده ذوب شدن چگونه به پاتیناژ باز<sup>۱</sup> برای انجام مانورهایش کمک می‌کند؟
- ۶- این واقعیت را توضیح دهید: اگر یخ خشک ( $\text{CO}_2$  جامد) بر روی میز در دما و فشار اطاق گذاشته شود،  $\text{CO}_2$  مایع دیده نمی‌شود.
- ۷- چرا تصور می‌کنید که غذا در دیگک زودپز که (در آن فشار در حالت جوشیدن آب بالا

- می‌رود) زودتر پخته می‌شود؟
- ۸- معنی ناحیه اشباع چیست؟
- ۹- رطوبت و کیفیت چه فرقی دارند؟ این اصطلاحات با واژه‌های مایع اشباع و بخار اشباع چه ارتباطی دارند؟
- ۱۰- کیفیت بخار داغ چقدر است؟
- ۱۱- چرا اصطلاحات مایع مادون‌سرد و مایع متراکم شده مترادفند؟
- ۱۲- گاز ایده‌آل چیست؟
- ۱۳- آیا گاز ایده‌آل دارای گرماهای ویژه ثابتی است؟
- ۱۴- آیا مخلوط‌تر بخار آب یک گاز ایده‌آل است؟ چرا؟
- ۱۵- مقصود از اصطلاح بخار داغ چیست؟
- ۱۶- در نقطه بحرانی چه اتفاقی می‌افتد؟
- ۱۷- اصل حالت چیست؟
- ۱۸- ماده ساده تراکم‌پذیر چیست؟
- ۱۹- چند خاصیت لازم است که حالت یک سیستم را مشخص نماید؟
- ۲۰- گرمای ویژه مخلوط‌تر بخار آب چقدر است؟ چرا؟
- ۲۱- خواص مایعات در درجه اول تابع چه متغیری است؟

### مسائل (آحاد انگلیسی)

- ۳-۱ بخار آب اشباع در  $100 \text{ psia}$  در مخزن صُلبی به حجم  $2 \text{ ft}^3$  قرار دارد. محاسبه کنید مقدار بخار آبی را که تقطیر خواهد شد اگر مخزن تا فشار  $20 \text{ psia}$  خنک شود.
- ۳-۲ مخزنی به حجم  $10 \text{ ft}^3$  شامل آمونیاک در  $220 \text{ psia}$  و  $200^\circ \text{F}$  می‌باشد. آمونیاک به آرامی از مخزنی تخلیه می‌شود تا شرایط داخل مخزن به  $80 \text{ psia}$  و  $100^\circ \text{F}$  برسد. مقدار وزن آمونیاک خارج شده از مخزن را محاسبه کنید.
- ۳-۳ ظرفی به حجم  $3 \text{ ft}^3$  با بخار آب در فشار  $30 \text{ psia}$  و کیفیت ۹۰ درصد پر می‌شود. مقدار حرارت لازمی را که باید از ظرف گرفته شود تا فشار به  $20 \text{ psia}$  تنزل نماید، محاسبه کنید.

- ۳-۴ ۱۰ lbm بخار آب محتوی ظرف سربسته‌ای را در فشار ۲۵ psia و کیفیت ۹۰ درصد تشکیل می‌دهد. محاسبه کنید چه مقدار حرارت باید اضافه گردد تا فقط یک بخار اشباع تهیه شود. فشار در انتهای فرآیند حرارت دادن چه مقدار خواهد بود؟
- ۳-۵ محاسبه کنید درصد خطایی را که از فرض این که جرم مخصوص آب در  $100^{\circ}\text{F}$  و ۱۵۰۰ psia برابر  $62/4 \text{ lbm/ft}^3$  باشد حاصل خواهد شد.
- ۳-۶ حجم مخصوص فریون-۱۲ را در فشار ۱۰ psia و کیفیت ۵۰ درصد محاسبه کنید.
- ۳-۷ فرض کنید که حرارت به  $5 \text{ lbm} / 0$  فریون مسأله ۳-۶ درحین یک فرآیند فشار ثابت اضافه می‌شود. حرارت تازمانی که دما به  $140^{\circ}\text{F}$  برسد ادامه می‌یابد. محاسبه کنید حرارت لازم و کار تولید شده را با فرض اینکه فریون محتوی مجموعه مناسب سیلندر - پستون را تشکیل دهد.
- ۳-۸ درصد ازدیاد حجم مکعب مسی را که از  $100^{\circ}\text{F}$  تا  $1000^{\circ}\text{F}$  حرارت داده می‌شود محاسبه کنید.
- ۳-۹ در جدول ۳-۲ مقدار  $\beta$  برای آب  $10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{F}^{-1}$  داده شده است. صحت این مقدار را با محاسبه مستقیم از اطلاعات جداول بخار آب در دمای تقریبی  $100^{\circ}\text{F}$  تعیین کنید.
- ۳-۱۰ بخار آب در طی یک فرآیند فشار ثابت در مجموعه سیلندر - پستونی از شرایط  $60 \text{ psia}$  و  $400^{\circ}\text{F}$  تا حالت نهایی که نصف بخار تقطیر می‌گردد متراکم می‌شود. مقدار انتقال حرارت به‌ازای هر  $1 \text{ lbm}$  بخار آب را برای این فرآیند محاسبه کنید.
- ۳-۱۱ یک لایه برفک به ضخامت  $1 \text{ cm}$  در قسمت فریزر یخچال پس از مدتی تشکیل می‌شود. به خاطر طبیعت خلل و فرجی آن چگالی کلی آن فقط ۳۰ درصد چگالی یخ جامد می‌باشد. لایه سطحی معادل  $5 \text{ m}^2 / 0$  را اشغال می‌کند. چه مقدار آب داغ  $140^{\circ}\text{F}$  باید به برفک اضافه شود تا آب  $32^{\circ}\text{F}$  تشکیل گردد؟ فرض کنید که فرآیند ذوب شدن در ظرف عایق صورت گیرد.
- ۳-۱۲  $1 \text{ lbm}$  بخار آب در فشار ثابت  $696/14 \text{ psia}$  حرارت داده می‌شود تا از دمای  $220^{\circ}\text{F}$  به  $350^{\circ}\text{F}$  برسد. مقدار حرارت لازم را محاسبه کنید.
- ۳-۱۳ انرژی لازم را جهت تبخیر  $1 \text{ lbm}$  آب در فشار معمولی اتمسفر ( $696/14 \text{ psia}$ ) محاسبه

- کنید. این مقدار را با انرژی تبخیر آمونیاک یا فریون ۱۲ در همان فشار مقایسه کنید.
- ۳-۱۴ جرم آب محتوی ظرفی به حجم  $2\text{ft}^3$  را تحت شرایط زیر محاسبه کنید.
- الف -  $100^\circ\text{F}$  ،  $14/696\text{ psia}$
- ب -  $100^\circ\text{F}$  ،  $100\text{ psia}$
- ج -  $50^\circ\text{F}$  ،  $1\text{ psia}$
- د -  $30$  ،  $20\text{ psia}$  درصد کیفیت
- ه -  $1000^\circ\text{F}$  ،  $1000\text{ psia}$
- و - در حالت بحرانی
- ۳-۱۵ جهت تبخیر  $1\text{ lbm}$  فریون ۱۲ در یک فرآیند فشار ثابت در دمای اطاق  $70^\circ\text{F}$  چقدر انرژی لازم است؟ این مقدار را با مقدار حرارت مورد نیاز جهت تبخیر آب یا آمونیاک تحت همان شرایط مقایسه کنید.
- ۳-۱۶ بخار آب در سیلندر - پستونی در  $20\text{ psia}$  و  $300^\circ\text{F}$  قرار دارد. حرارت از سیلندر طی یک فرآیند فشار ثابت انتقال یافته تا حجم به نصف تقلیل یابد. مقدار حرارت خارج شده به ازای هر پوند بخار آب را محاسبه کنید.
- ۳-۱۷ بخار آب اشباع در  $1\text{ atm}$  در یک سیلندر - پستون قرار دارد و پستون به وسیله یک فنر طوری نگهداشته می شود که فشار در سیلندر متناسب با حجم سیلندر باشد. چه مقدار حرارت باید به بخار داده شود تا فشار به  $20\text{ psia}$  برسد؟
- ۳-۱۸ با استفاده از جداول بخار داغ، مقدار تراکم پذیری دما ثابت را برای بخار آب تحت شرایط زیر محاسبه کنید:
- الف -  $1\text{ psia}$  و  $300^\circ\text{F}$
- ب -  $500\text{ psia}$  و  $500^\circ\text{F}$
- این مقادیر را با مقادیر به دست آمده با فرض این که بخار آب از معادله حالت گاز ایده آل تبعیت کند مقایسه کنید. در رابطه با این مقایسه اظهار نظر نمایید.
- ۳-۱۹ سؤال ۳-۱۸ را برای ضریب انبساط حجمی تکرار کنید.
- ۳-۲۰ کار لازم را جهت تراکم  $1\text{ g}$  آب از  $50\text{ psia}$  و  $100^\circ\text{F}$  تا  $1500\text{ psia}$  در یک فرآیند

- دما ثابت محاسبه کنید.
- ۳-۲۱ یک فرد معمولاً  $85 \text{ kcal/h}$  انرژی مصرف می‌کند و در حین کارهای پرتحرک این مصرف به  $150 \text{ kcal/h}$  می‌رسد. در محیط گرم بدن عرق می‌کند و سطح پوست به وسیله تبخیر خنک می‌شود. با فرض این که عرق در فشار ثابت تبخیر شود و دمای پوست در  $80^\circ\text{F}$  ثابت باقی بماند، مقدار تبخیر را به ازای هر ساعت جهت جبران اختلاف در نرخهای مصرف انرژی مشخص شده در بالا محاسبه کنید. (جواب -  $112 \text{ g}$ )
- ۳-۲۲ مخزنی به حجم  $2/5 \text{ ft}^3$  شامل مایع آب و بخار در حالت تعادل در  $100^\circ\text{F}$  می‌باشد. مخزن بسته (آب بندی) می‌شود. چه مقدار حرارت باید اضافه شود تا تنها بخار اشباع در  $1 \text{ atm}$  ایجاد نماید؟ فرض کنید که نسبت اولیه بخار و مایع طوری است که بخار اشباع در  $1 \text{ atm}$  طی فرآیند حرارت دادن قابل دسترسی است.
- ۳-۲۳ بخار آب در  $180 \text{ psia}$  و  $800^\circ\text{F}$  محتویات جعبه صُلبی را به حجم  $20 \text{ ft}^3$  تشکیل می‌دهد. چه مقدار حرارت باید از ظرف گرفته شود تا  $10$  درصد بخار در ظرف تقطیر گردد؟
- ۳-۲۴ نشان دهید که تقریباً  $80 \text{ cal}$  برای ذوب  $1 \text{ g}$  یخ  $32^\circ\text{F}$  لازم است.
- ۳-۲۵ بخار آب در  $14/7 \text{ psia}$  و  $300^\circ\text{F}$  به صورت دما ثابت متراکم می‌شود تا نصف بخار تبدیل به مایع شود. در این فرآیند تراکمی چه مقدار کار به ازای هر  $1 \text{ lbm}$  باید بر روی بخار آب انجام پذیرد؟
- ۳-۲۶ بخار آب در  $14/7 \text{ psia}$  و  $300^\circ\text{F}$  در یک ظرف صُلب قرار دارد. در چه دمایی بخار آب شروع به تقطیر می‌کند، اگر ظرف به آرامی خنک شود؟ چه مقدار حرارت به ازای واحد جرمی باید در این فرآیند سرمایش خارج شود؟
- ۳-۲۷ در یک روز گرم در جنوب، تابش خورشید بر روی زمین در حدود  $300 \text{ Btu/h.ft}^2$  می‌باشد و حدود  $75$  درصد این انرژی بوسیله فضای سبز جذب می‌شود. با فرض این که تمام انرژی جذب شده صرف تبخیر آب در فشار ثابت و در دمای متوسط  $100^\circ\text{F}$  بشود، مقدار آب لازم را برای تأمین آب از دست رفته به وسیله تبخیر در هر هفته برای یک قطعه  $160 \times 100 \text{ ft}$  زمین محاسبه کنید. برای این محاسبات فرض کنید که تابش خورشید در طول  $9$  ساعت انجام گیرد. جواب را به گالن در هفته ارائه کنید.

## مسائل (آحاد متریک)

- ۳-۱M ۱ kg بخار آب در طی یک فرآیند فشار ثابت ۱۰۰ kPa از دمای ۱۰۰ به ۲۰۰ °C حرارت می‌یابد. مقدار حرارت مورد نیاز را محاسبه کنید.
- ۳-۲M انرژی لازم را جهت تبخیر ۱ kg آب در فشار ۱۰۰ kPa محاسبه کنید. این مقدار را با مقدار انرژی تبخیر آمونیاک یا فریون ۱۲ در همان فشار مقایسه کنید.
- ۳-۳M جرم آب محتوی ظرفی به حجم ۶۰ لیتر را تحت شرایط زیر محاسبه کنید
- الف ( ۴۰ °C ، ۱۰۰ kPa
- ب ( ۴۰ °C ، ۷۰۰ kPa
- ج ( ۲۴۰ °C ، ۶ kPa
- د ( ۳۰ ، ۱۵۰ kPa درصد کیفیت
- ه ( ۵۲۰ °C ، ۸۰۰۰ kPa
- و ( در حالت بحرانی
- ۳-۴M بخار آب در ۱۰۰ kPa و ۲۰۰ °C محتویات ظرف صلبی را تشکیل می‌دهد. حجم ظرف  $\frac{2}{3} m^3$  است. چه مقدار حرارت باید از ظرف گرفته شود تا نصف بخار تقطیر گردد؟
- ۳-۵M یک پستون - سیلندر شامل بخار آب در ۲۰۰ kPa و ۷۵ درصد کیفیت می‌باشد. جرم بخار آب ۵۰۰ g است. حرارت به سیلندر اضافه می‌گردد در حالی که دمای بخار آب ثابت باقی می‌ماند. چه مقدار حرارت باید اضافه گردد تا بخار آب به حالت بخار اشباع درآید؟
- ۳-۶M ظرفی به حجم ۸۵ لیتر به وسیله بخار آب در ۲۰۰ kPa و کیفیت ۹۰ درصد پر شده است. محاسبه کنید مقدار حرارتی را که باید از ظرف گرفت تا فشار به ۱۵۰ kPa کاهش یابد.
- ۳-۷M ۵ kg بخار آب در ظرف سربسته‌ای در فشار ۱۵۰ kPa و کیفیت ۹۰ درصد وجود دارد. محاسبه کنید چه مقدار حرارت باید اضافه گردد تا فقط یک بخار اشباع تهیه شود. فشار در انتهای فرآیند حرارت دادن چقدر خواهد بود؟
- ۳-۸M محاسبه کنید درصد خطایی را که از فرض این که جرم مخصوص آب در ۴۰ °C و ۱۰ MPa برابر با  $999/6 \text{ kg/m}^3$  باشد نتیجه خواهد شد.
- ۳-۹M فرض کنید که حرارت به ۵ kg / ۰ فریون مسأله ۳-۶ درحین یک فرآیند فشار ثابت اضافه

می‌شود. حرارت تازمانی که دما به  $60^{\circ}\text{C}$  برسد ادامه می‌یابد. محاسبه کنید حرارت لازم و کار تولید شده را با فرض اینکه فریون در سیلندر - پیستونی قرار دارد.

۳-۱۰M بخار آب در فشار  $20\text{ kPa}$  و کیفیت  $80\%$  در سیلندر - پیستونی بدون اصطکاک قرار دارد. طی یک فرآیند فشار ثابت تراکم می‌گردد تا حجم به نصف کاهش یابد. مقدار انتقال حرارت به ازای واحد جرم را محاسبه کنید.

۳-۱۱M بخار آب در جعبه صُلبی در  $100\text{ kPa}$  و  $200^{\circ}\text{C}$  موجود است. حجم جعبه  $1/3\text{ m}^3$  است. چه مقدار حرارت باید از جعبه گرفته شود تا نصف بخار آب تقطیر گردد؟

۳-۱۲M بخار آب در  $300\text{ kPa}$  و  $160^{\circ}\text{C}$  در سیلندر - پیستونی جای دارد. یک نیروی ثابت بازدارنده بر روی پیستون عمل کرده و سیلندر خنک می‌شود تا نصف بخار آب تقطیر گردد. چه مقدار سرمایش به ازاء واحد جرم آب باید تهیه گردد؟

۳-۱۳M یک مخزن صلب به حجم  $1/2\text{ m}^3$  شامل  $10\%$  در صد حجم آب مایع در  $100\text{ kPa}$  است. بقیه حجم بخار در  $100\text{ kPa}$  می‌باشد. چه مقدار حرارت باید به مخزن داده شود تا تمام آب تبخیر گردد؟

۳-۱۴M بخار آب در فشار ثابت  $7\text{ kPa}$  از  $65^{\circ}\text{C}$  تا  $550^{\circ}\text{C}$  حرارت داده می‌شود. فرض کنید که بخار آب در این ناحیه از رابطه حالت گاز ایده آل تبعیت کند. مقدار حرارت منتقل شده را با استفاده از اطلاعات جدول ۲-۳ محاسبه کنید. این محاسبه را با استفاده از خواص داده شده در جداول بخار آب مقایسه کنید. در مورد مطابقت و یا عدم مطابقت این دو محاسبه اظهار نظر نمایید.

۳-۱۵M درصد ازدیاد حجم یک قطعه مسی را که از  $40^{\circ}\text{C}$  تا  $540^{\circ}\text{C}$  حرارت داده می‌شود، محاسبه کنید.

۳-۱۶M با استفاده از جداول بخار داغ مقدار تراکم پذیری دما ثابت را برای بخار آب تحت شرایط زیر تعیین کنید:

الف)  $7\text{ kPa}$  و  $160^{\circ}\text{C}$

ب)  $3\text{ MPa}$  و  $240^{\circ}\text{C}$

۳-۱۷M کار لازم را جهت تراکم  $1\text{ kg}$  آب از  $350\text{ kPa}$  و  $40^{\circ}\text{C}$  به  $10\text{ MPa}$  در یک فرآیند



دما ثابت محاسبه کنید.

۳-۱۸M با استفاده از آحاد SI، منحنی فشار اشباع را بر حسب  $h$  برای آب در محدوده دمای ۰ و  $250^{\circ}\text{C}$  رسم کنید.

۳-۱۹M با استفاده از جداول مربوط برای آب و بخار آب جاهای خالی در جدول زیر را پر کنید.

دما ( $^{\circ}\text{C}$ )	۲۸۰		۴۸۰		
فشار (Pa)		۷۰۰k		۸M	۳۵۰k
جرم (kg)	۱	۲	۱/۳	۳/۵	۳
حجم مخصوص ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )	۰/۳۸۵۲				
حجم ( $\text{m}^3$ )					
کیفیت (%)					۶۰
رطوبت (%)				۲۰	
انتالپی ( $\text{kJ/kg}$ )	۲۷۷۹/۶				
انرژی داخلی ( $\text{kJ/kg}$ )			۳۰۰۵/۴		

۳-۲۰M مقدار  $c_p$  را برای بخار آب در  $500^{\circ}\text{C}$  و  $240^{\circ}\text{C}$  با به کار بردن جداول بخار آب محاسبه کنید.

۳-۲۱M یک فرد معمولاً  $350 \text{ kJ/h}$  انرژی مصرف می‌کند و در حین کارهای پرتحرک این مصرف به مقدار  $630 \text{ kJ/h}$  می‌رسد. در محیط گرم بدن عرق خواهد کرد و سطح پوست به وسیله تبخیر خنک می‌شود. با فرض اینکه عرق در فشار ثابت تبخیر شود و دمای پوست در  $25^{\circ}\text{C}$  ثابت باقی بماند، مقدار تبخیر را به ازای هر ساعت جهت جبران اختلاف در نرخهای مصرف انرژی مشخص شده در بالا محاسبه کنید (جواب  $112 \text{ g}$ ).

۳-۲۲M آب در یک سیلندر - پستون در فشار  $200 \text{ kPa}$  و  $40^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. سیلندر دارای قطر  $15 \text{ cm}$  و ارتفاع  $10 \text{ cm}$  می‌باشد. چقدر کار جهت تراکم آب تا فشار  $15 \text{ MPa}$  در یک فرآیند دما ثابت لازم است؟

۳-۲۳M برای تبخیر  $1 \text{ kg}$  فریون ۱۲ در یک فرآیند فشار ثابت در دمای اطاق  $20^{\circ}\text{C}$ ، چقدر

انرژی لازم است؟ این مقدار را با مقدار حرارت مورد نیاز جهت تبخیر آب یا آمونیاک تحت همان شرایط مقایسه کنید.

۳-۲۴M بخار آب اشباع در  $100 \text{ kPa}$  در یک سیلندر - پستون قرار دارد و پستون به وسیله یک فنر طوری نگهداشته می شود که فشار در سیلندر متناسب با حجم سیلندر باشد. چقدر حرارت باید به بخار آب داده شود تا فشار به  $150 \text{ kPa}$  افزایش یابد؟

۳-۲۵M آب مایع در یک سیلندر در فشار  $7/5 \text{ MPa}$  و  $40^\circ \text{C}$  قرار دارد. سیلندر با قطر  $3 \text{ cm}$  محتوی  $15 \text{ g}$  آب است. پستون توسط نیروی ثابت بازدارنده ای طوری نگهداشته شده که فشار را در  $7/5 \text{ MPa}$  ثابت نگه می دارد. چقدر حرارت باید به سیلندر داده شود تا پستون به مقدار  $3/5 \text{ cm}$  حرکت کند؟

۳-۲۶M ثابت کنید که تقریباً  $335 \text{ J}$  جهت ذوب  $1 \text{ g}$  یخ  $0^\circ \text{C}$  لازم است.

۳-۲۷M بخار آب در  $100 \text{ kPa}$  و  $150^\circ \text{C}$  به صورت دما ثابت متراکم می شود تا نصف بخار تبدیل به مایع گردد. در طی این فرآیند تراکمی چه مقدار کار به ازای هر کیلوگرم باید بر روی بخار آب انجام پذیرد؟

۳-۲۸M بخار آب در  $100 \text{ kPa}$  و  $150^\circ \text{C}$  در یک ظرف صلب قرار دارد. اگر ظرف سرد شود در چه دمایی بخار آب شروع به تقطیر می کند؟ چقدر حرارت به ازای واحد جرم باید در این فرآیند سرمایش خارج شود؟

۱۳-۲۹M در حالت معینی، بخار آب دارای دمای  $240^\circ \text{F}$  و آنتروپی  $1/419 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ \text{F}$  است. مقدار انتالپی و حجم مخصوص در این شرایط را تعیین کنید.

۳-۳۰M مخزن صلبی به حجم کلی  $1 \text{ m}^3$  به طور کاملی عایق شده است و به وسیله یک صفحه مجزاکننده آدیاباتیکی به دو محفظه مساوی تقسیم شده است. یک محفظه شامل بخار آب در  $100 \text{ kPa}$  و  $200^\circ \text{C}$  و محفظه دیگر شامل بخار آب در  $1/5 \text{ MPa}$  و  $320^\circ \text{C}$  است. صفحه مجزاکننده برداشته می شود و سیستم اجازه می یابد تا به تعادل برسد. فشار و دمای حالت جدید را تعیین کنید.

۳-۳۱M در یک روز گرم در جنوب، تابش خورشید بر روی زمین در حدود  $1 \text{ kW/m}^2$  می باشد و

حدود ۷۵ درصد این انرژی به وسیله فضای سز جذب می شود. با فرض این که تمام انرژی جذب شده صرف تبخیر آب در فشار ثابت و در دمای متوسط  $40^{\circ}\text{C}$  بشود، مقدار آب لازم را جهت تأمین آب از دست رفته بوسیله تبخیر در هر هفته برای یک قطعه  $30 \times 50 \text{ m}$  زمین را محاسبه کنید. برای این محاسبات فرض کنید که تابش خورشید در طول ۹ ساعت انجام گیرد. جواب را به لیتر در هفته ارائه کنید.

۳-۳۲M انتالپی بخار آب در  $10 \text{ MPa}$  و  $600^{\circ}\text{C}$  را با استفاده از مقادیر داده شده در جدول برای  $u$  و  $h$  محاسبه کنید و آن را با مقادیر داده شده برای  $h$  مقایسه نمایید.

۳-۳۳M آب در یک سیلندر - پیستون در فشار  $2 \text{ atm}$  و  $100^{\circ}\text{F}$  می باشد. سیلندر دارای قطر  $15 \text{ cm}$  و ارتفاع  $10 \text{ cm}$  است. چه مقدار کار جهت تراکم آب تا فشار  $150 \text{ atm}$  طی یک فرآیند دما ثابت لازم است؟

۳-۳۴M یک ترمومتر از شیشه پیرکس و الکل اتیلیک ساخته شده است. قسمت "حباب" آن دارای حجم  $4/0 \text{ cm}^3$  است و طول ترمومتر  $20 \text{ cm}$  است. با فرض این که حباب تنها به عنوان قسمت حساس دما استفاده شود، سطح مقطع ترمومتر چقدر باید باشد تا در طول  $20 \text{ cm}$ ، دارای حدود تغییرات  $10^{\circ}\text{C}$  تا  $40^{\circ}\text{C}$  باشد؟

## مراجع

- 1 Kline, S. J., and F. O. Koenig: The State Principle, *JAppl.Mech.*, vol. 24, p. 29, 1957.
- 2 Hatsopoulos, G. N., and J. H. Keenan: "Principles of General Thermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
- 3 Keenan, J. H., and F. G. Keyes: "Thermodynamic Properties of Steam," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1936.
- 4 Van Wylen, G. J.: "Thermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1959.
- 5 Reynolds, W. C.: "Thermodynamics Properties in SI," Mech. Engr. Dept., Stanford University, Stanford, Calif. 1978.



# فصل ۴

## تحلیل انرژی در سیستمهای باز

### ۴-۱ مقدمه

در دو فصل پیشین صورت تحلیلی قانون اول ترمودینامیک و روشهای محاسبه خاصیت‌های ترمودینامیکی ماده ساده بیان گردید. در این فصل این اطلاعات را برای گروه گسترده‌تری از مسائل بویژه برای سیستمهای باز که جرم از مرز آنها عبور می‌کند، به کار خواهیم برد. بنابراین قادر خواهیم بود به نحو مناسبتری از روش تحلیل انرژی بهره گیریم. بهتر است که طرحی برای اجرای بررسی انرژی در سیستمهای ترمودینامیکی تنظیم کنیم. هدف اصلی در این طرح جواب دادن به سؤالات زیر است.

- ۱ - سیستم ترمودینامیکی که باید بررسی شود چیست و چگونه مشخص می‌شود؟
- ۲ - ماده ترمودینامیکی مورد بررسی چیست؟ آیا خواص مورد نیاز این ماده به سادگی در دسترس است؟
- ۳ - چه سیستمی برای تجزیه و تحلیل باید به کار گرفت - باز یا بسته؟
- ۴ - فرآیند ترمودینامیکی مورد نظر چگونه تشریح می‌شود؟
- ۵ - آیا شرایط حالت دائم را باید در نظر گرفت یا سیستم با زمان تغییر می‌کند؟

همین که جوابی روشن برای هریک از سؤالات فوق تهیه شد، حل مسأله معمولاً از طریق

تحلیل ریاضی به دست می آید، اگر چه در اجرای مؤثر این تجزیه و تحلیل تجربه هم ممکن است لازم شود. سؤالات الزاماً به ترتیب بالا مطرح نمی شود و جواب یک سؤال ممکن است به جواب سؤال دیگر مربوط باشد.

همان طوری که تجربه ما در فصول قبل بوده است، در می یابیم که سؤالات بالا می تواند به وسیله الگوریتم مشخص زیر ارائه گردد.

- ۱ - سیستم را رسم کنید و مقادیر جرم و انرژی ورودی و خروجی را مشخص نمایید. مرز سیستم را مشخص کنید.
- ۲ - اطلاعاتی را که برای تحلیل سیستم در اختیار می باشد، بنویسید.
- ۳ - موازنه انرژی مناسب را مطابق با روش علامت گذاری طرحواره سیستم بنویسید.
- ۴ - روابط تشریح فرآیند قابل اجرا را بنویسید.
- ۵ - خواصی را که برای استفاده در موازنه انرژی لازم است، به دست آورید.
- ۶ - اطلاعات را جهت تعیین نتیجه مطلوب ترکیب کنید.

## ۴-۲ موازنه انرژی و قراردادهای علامت

در فصل دوم روابط عمومی انرژی را برای سیستمهای بسته بسط دادیم، یعنی سیستمهایی که انتقال جرم در مرزشان موجود نیست. ما این قرارداد علامت را می پذیریم که، انرژی اضافه شده به سیستم (به صورت کار یا حرارت) مثبت است و انرژی که سیستم به چیزهای دیگری می دهد منفی می باشد. توجه اصلی همیشه به این حقیقت است که انرژی از بین نمی رود یا

$$\begin{array}{lcl} \text{انرژی که در سیستم} & + & \text{انرژی که از سیستم} \\ \text{انباشته می شود} & & \text{خارج می شود} \\ \text{سیستم می رود} & = & \text{انرژی که به داخل} \end{array}$$

پس بررسی انرژی اساساً یک روش حسابداری است و معادلات فصل دوم روابط تحلیلی سنجش است برای خواندن (انطباق) دفترها با یکدیگر.

## ۴-۳ سیستم بسته

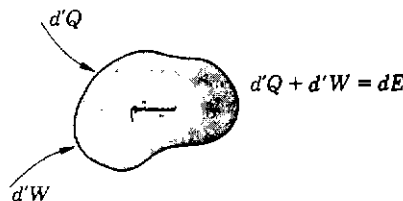
بحث کلی قانون اول ترمودینامیک که در فصل دوم ارائه شد، مربوط به سیستمهای ترمودینامیکی بسته است. در مرز این سیستمها انتقال جرم وجود ندارد. تنها نکته ضروری این است که همه انواع کار و انرژی داخلی باید در موازنه انرژی در نظر گرفته شود.

$$d'Q + d'W = dE \quad (۴-۱)$$

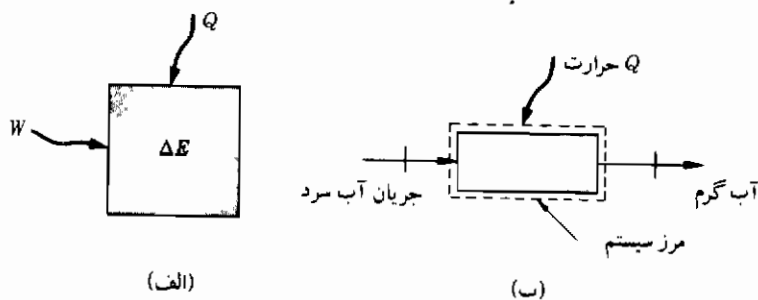
که کمیتهای انرژی به صورت دیفرانسیلی نوشته شده تا بتوان برای هر نوع فرآیندی به کار برد. موازنه انرژی برای سیستم بسته در شکل ۴-۱ نشان داده شده و سیستمهای بسته و باز در شکل ۴-۲ مشخص شده است.

## ۴-۴ سیستم باز

دیده‌ایم که انتقال جرم در مرز سیستم بسته صورت نمی‌گیرد، فقط انرژی می‌تواند درحین تغییر از یک حالت سیستم به حالت دیگر آن داخل و خارج شود. حالا یک سیستم باز را که جرم می‌تواند وارد و خارج حجمی در فضا بشود، در نظر می‌گیریم. در ابتدا ممکن است به نظر رسد که با آن مفهومی که از سیستم ترمودینامیکی داشته‌ایم سازگار نباشد، چه تاکنون جرمی را از محیطش جدا کرده و بررسی می‌کردیم. این ناسازگاری ظاهری برطرف شدنی است، زیرا بررسی سیستم باز را مستقیماً بر اساس روش بررسی سیستم بسته انجام خواهیم داد. در هر حال خواننده باید بداند که ما درباره فنون بررسی بحث می‌کنیم که می‌تواند برای کاربرد اصل بقای انرژی در وضعیتهای گوناگون



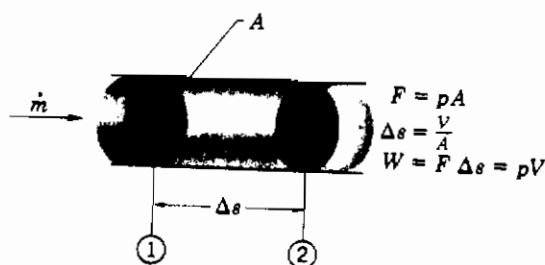
شکل ۴-۱ موازنه انرژی برای یک سیستم بسته



شکل ۲-۲ (الف) مخزن بسته سیستم بسته‌ای است بدون انتقال جرم در مرز آن .  
(ب) جریان آب از میان گرمکن به صورت سیستم باز در نظر گرفته می‌شود .

استفاده شود.

ابتدا ببینیم دبی جرمی جریان در یک کانال مطابق شکل ۳-۴ چگونه محاسبه می‌گردد. حجم سیال با سرعت  $A \frac{ds}{dt}$  در کانال جابه‌جایی شود، که  $A$  سطح مقطع کانال و  $ds$  جابه‌جایی آن است. جمله  $Ads$  حجم جابه‌جا شده است. میزان دبی حجمی جریان با  $\dot{V}$  مشخص می‌گردد. حجم واحد جرم  $v$  است و بنابراین میزان جرمی جریان در کانال  $\dot{m}$  برابر است با



شکل ۳-۴ جریان جرمی و کار جریانی در یک کانال

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v} = \frac{1}{v} \frac{Ads}{dt}$$

اما  $\frac{ds}{dt} = \bar{V}$  سرعت جریان کانال، بنابراین



$$\dot{m} = \frac{A \bar{V}}{v} \quad (۴-۲)$$

چگالی سیال را به صورت عکس حجم مخصوص  $\rho = \frac{1}{v}$  تعریف می‌کنیم، بنابراین

$$\dot{m} = \rho A \bar{V} \quad (۴-۳)$$

در اینجا علامت  $\bar{V}$  به کار گرفته شده تا بین علامت سرعت و حجم کل تمایز گذاشته شود.

#### ۴-۵ حجم کنترل (حجم مشخص - حجم معیار)

برای مطالعه سیستمهای باز مفهوم حجم کنترل را همان طوری که در شکل ۴-۴ نشان داده شده است، معرفی می‌کنیم. این حجم ناحیه‌ای در فضا است که برای عبور جرم و انرژی از مرزهای آن در نظر گرفته می‌شود. ابتدا اصل بقای انرژی را در نظر بگیرید که به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$(۴-۴) \quad \text{ازدیاد جرم در} + \text{جرم خروجی} = \text{جرم ورودی} \\ \text{داخل حجم کنترل} \quad \text{از حجم کنترل} \quad \text{به حجم کنترل}$$

آنچه وارد حجم کنترل می‌شود یا در آن باقی می‌ماند و یا از آن خارج می‌شود. مطابق شکل ۴-۴a اصل بقای جرم را می‌توان به صورت زیر نوشت:

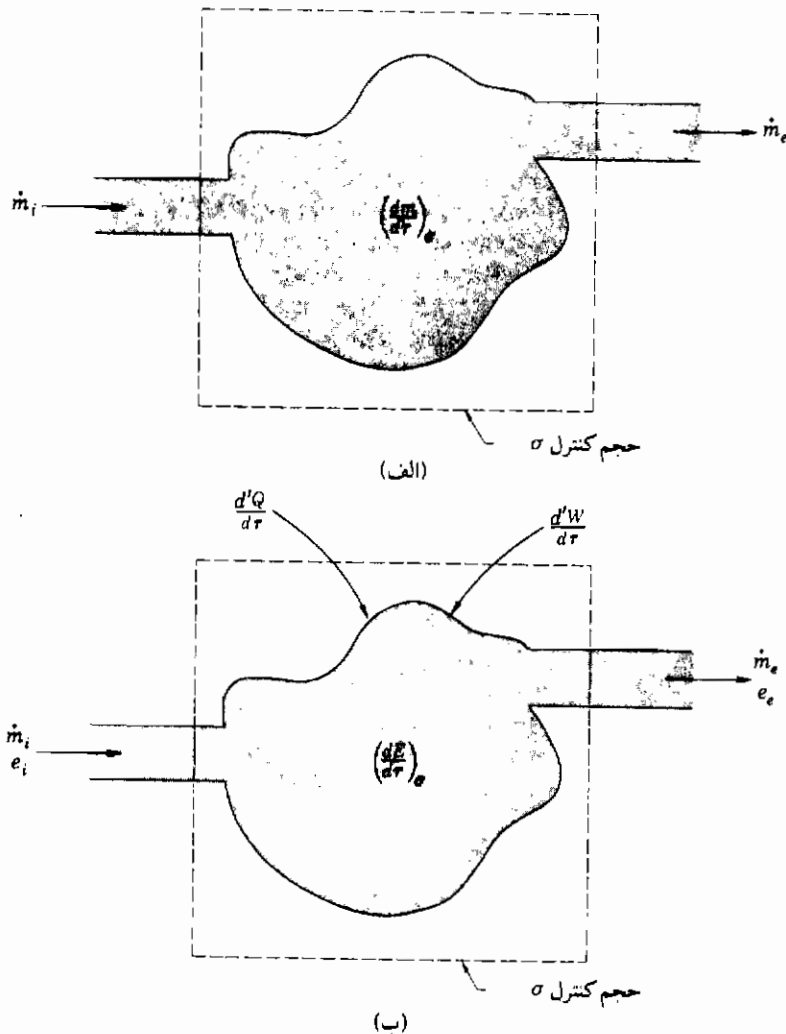
$$\dot{m}_i = \left( \frac{dm}{dt} \right)_\sigma + \dot{m}_e \quad (۴-۵)$$

که  $\dot{m}_i$  جریان جرم به داخل حجم کنترل در واحد زمان، و  $\dot{m}_e$  جریان جرم خروجی از حجم کنترل در واحد زمان می‌باشد، و زیرنویس  $\sigma$  جرم انباشته شده در داخل حجم کنترل به ازای واحد زمان را مشخص می‌کند.

اگر چند جریان ورودی و یا خروجی باشد، باید با جمع کردن این گونه جریانها موازنه جرمی را برقرار نمود:

$$\sum_i \dot{m}_i = \left( \frac{dm}{dt} \right)_\sigma + \sum_e \dot{m}_e \quad (۴-۶)$$

به عنوان مقدمه‌ای بر تجزیه و تحلیل انرژی یک حجم کنترل، بینیم بطور کمی چه اتفاقی



شکل ۴-۴ موازنه‌های سیستم باز (الف) موازنه جرم (ب) موازنه انرژی

برای یک جرم معلوم که از میان حجم کنترل عبور می‌کند، یعنی رفتار یک سیستم ترمودینامیکی بسته را در فرآیندی که باعث عبور آن از حجم کنترل می‌شود بررسی کنیم. سیستم ترمودینامیکی بسته ممکن است از فشار محیط، انتقال حرارت در مرزهایش و عمل نیروهای متفاوت مولد کار تأثیر پذیرد. انرژی داخلی سیستم بسته می‌تواند در اثر جابه‌جایی فیزیکی از یک حالت به حالت دیگر و شاید با تغییر

سرعت آن تغییر کند. صرف نظر از تاثیرهای گفته شده، مطمئناً می‌توانیم آنها را با اصل بقای انرژی بررسی کنیم. به علاوه جرم کل داخل و یا خارج شده از حجم کنترل می‌تواند به صورت گروهی از المانهای جرمی  $dm$ ، یعنی یک گروه از سیستمهای ترمودینامیکی بسته کوچک در نظر گرفته شود. بنابراین می‌توان گفت که جریان جرم به داخل و خارج از حجم کنترل، انرژی داخلی را از مرزهای حجم کنترل عبور می‌دهد. پس اصل بقای انرژی برای این نوع سیستم برابر است با:

$$\begin{aligned} \text{افزایش انرژی داخلی در حجم} \\ \text{کنترل} + \text{انتقال انرژی داخلی} \\ \text{به خارج از حجم کنترل} \end{aligned} = \begin{aligned} \text{انتقال انرژی داخلی به داخل حجم} \\ \text{کنترل} + \text{حرارت داده شده به حجم} \\ \text{کنترل} + \text{کار انجام شده بر روی تمام} \\ \text{المانهایی که از داخل حجم کنترل} \\ \text{عبور می‌کند.} \end{aligned} \quad (۴-۷)$$

مطابق شکل ۴-۴b به صورت تحلیلی می‌توان نوشت

$$\dot{E}_i + \frac{d'Q}{d\tau} + \frac{d'W}{d\tau} = \left( \frac{dE}{d\tau} \right)_o + \dot{E}_e \quad (۴-۸)$$

$\dot{E}_e$  و  $\dot{E}_i$  به ترتیب معرف انتقال انرژی در واحد زمان در ورود و خروج است و زیرنویس  $\sigma$  دوباره مشخص کننده تغییر در مرزهای حجم کنترل می‌باشد. انتقال انرژی داخلی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{E}_i = \dot{m}_i e_i \quad (۴-۹)$$

$$\dot{E}_e = \dot{m}_e e_e \quad (۴-۱۰)$$

کار جریان

معادله (۴-۸) را می‌توان برای تجزیه و تحلیل سیستمهای باز به کار برد، اما جمله کار معمولاً به صورت ساده تری برای تجزیه و تحلیل ارائه می‌شود. به عنوان یک گام میانی برای رسیدن به چنین رابطه‌ای، یک حجم کنترل ساده را مطابق با شکل ۴-۳ در نظر بگیرید. توجه داشته باشید که، برای ورود

جرم به داخل حجم کنترلی باید نیرویی آن را به داخل براند. این نیرو و وسیله فشار سیستم تأمین می‌گردد. جرمی به سطح مقطع  $A$  و به طول  $\Delta s$  را تصور کنید. برای راندن این مقدار جرم به داخل و یا خارج از حجم کنترل باید نیروی  $pA$  را در تمام طول  $\Delta s$  اعمال کرد. بدون توجه به مقدار جرم،  $\Delta s$  به وسیله رابطه زیر داده می‌شود:

$$\Delta s = \frac{V}{A}$$

بنابراین مقدار کار جهت راندن جرم به داخل و یا خارج برابر است با

$$W = \int F ds = F \Delta s = pA \frac{V}{A} = pV \quad (4-11)$$

کار خالص انجام شده بر روی سیستم هنگامی که از حالت ۱ به حالت ۲ در شکل ۴-۳ حرکت می‌کند، باستانی کار خارجی، برابر است با:

$$W_{net} = p_1 V_1 - p_2 V_2$$

که جمله  $p_1 V_1$  کار انجام شده بر روی سیال می‌باشد تا آنرا به داخل حجم کنترل براند و  $p_2 V_2$  کار لازم جهت خارج کردن سیال از حجم کنترل می‌باشد. تفاوت این دو جمله برابر با کار خالص اضافه شده است. جمله کاری که با  $pV$  مشخص می‌شود موسوم به کار جریان<sup>۱</sup> است و معمولاً آن را به صورت جداگانه‌ای از کار تحویل داده شده به چیزهای خارج از حجم کنترل در نظر می‌گیرند. پس معادله انرژی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{m}_i(e_i + p_i v_i) + \frac{d'Q}{d\tau} + \frac{d'W_{ext}}{d\tau} = \left(\frac{dE}{d\tau}\right)_\sigma + \dot{m}_e(e_e + p_e v_e) \quad (4-12)$$

$W_{ext}$  کاری است که توسط نیروهای خارجی<sup>۲</sup> به حجم کنترل داده می‌شود. این کمیت بعضی وقتها کار محوری<sup>۳</sup> نامیده می‌شود زیرا از نظر علمی غالباً به وسیله مکانیزم محور تأمین می‌شود.

1- Flow work

2- External forces

3- Shaft work

## حالت دالم جریان دالم

معادله ۴-۱۲ معرف موازنه انرژی کلی برای یک سیستم باز می‌باشد. اگر سیستم باز در شرایط حالت دالم عمل کند، تغییرات نسبت به زمان در داخل حجم کنترل وجود ندارد، لذا  $\left(\frac{dE}{d\tau}\right)_\sigma = 0$  و  $\left(\frac{dm}{d\tau}\right)_\sigma = 0$ . حالت جریان دالم آن چنان شرایطی است که شدت جریانهای  $\dot{m}_i$  و  $\dot{m}_e$  نسبت به زمان تغییری نکند. برای حالت خاص جریان دالم و حالت دالم هیچ گونه انباشتگی جرم یا انرژی در داخل حجم کنترل وجود ندارد و  $\dot{m}_i = \dot{m}_e$  و معادله ۴-۱۲ به صورت زیر خلاصه می‌شود.

$$\frac{d'Q}{d\tau} + \frac{d'W_{ext}}{d\tau} = \dot{m}[(e_e + p_e v_e) - (e_i + p_i v_i)] \quad (4-13)$$

باز هم باید توجه داشت که انرژی داخلی  $e$  از انرژی حرارتی  $u$  و انرژی پتانسیل ثقل، انرژی جنبشی و غیره تشکیل می‌شود. معمولاً برای راحتی، خاصیت انتالپی  $h$  همان طوری که در بخش ۸-۲ تعریف شد، معرفی می‌شود.

$$h = u + pv \quad (4-14)$$

انتالپی یک خاصیت می‌باشد زیرا از خواص ترمودینامیکی دیگر تشکیل می‌شود. باید توجه داشت که در موقع کاربرد سیستم باز، انتالپی دارای معنی فیزیکی و اهمیت خاص است، اما این معنی در موقع کاربرد سیستم بسته دیگر معتبر نیست زیرا جمله  $pv$  معرف کار جریان در یک سیستم بسته نمی‌باشد.

با معرفی انتالپی، معادله انرژی عمومی می‌تواند برای یک سیستم باز چنین نوشته شود:

$$\begin{aligned} \dot{m}_i (h_i + KE_i + ChE_i + \dots) + \frac{d'Q}{d\tau} + \frac{d'W_{ext}}{d\tau} \\ = \left(\frac{dE}{d\tau}\right)_\sigma + \dot{m}_e (h_e + KE_e + ChE_e + \dots) \end{aligned} \quad (4-15)$$

اگر بیش از یک جریان ورودی و خروجی موجود باشد، باید یک مجموعه ساده از تمام جریانهایی که انرژی به حجم کنترل تحویل داده و یا خارج می‌کنند ترتیب داد. و خواهیم داشت:

$$\sum_i \dot{m}_i (h_i + KE_i + ChE_i + \dots) + \frac{d'Q}{d\tau} + \frac{d'W_{ext}}{d\tau} = \left(\frac{dE}{d\tau}\right)_\sigma + \sum_e \dot{m}_e (h_e + KE_e + ChE_e + \dots) \quad (۳-۱۶)$$

معادلات بالا برای حالت کلی سیستم باز، برای خواننده‌ای که اولین بار با ترمودینامیک مواجه می‌شود، به شکل پیچیده و پر دردسری خودنمایی می‌کند. اگر چه در بیشتر مسائل عملی این معادلات به مقدار قابل ملاحظه‌ای ساده خواهد شد و در می‌یابیم که روش تحلیل انرژی کاملاً ساده است. برای مثال در بحث سیستم‌های گاز کامل و یا آب - بخار آب نیازی نیست که انرژی شیمیایی را در نظر بگیریم و بنابراین می‌توان این جمله را در بیشتر حالات کنار گذاشت.

#### اهمیت انرژی جنبشی

در اولین نگاه، به نظر می‌رسد که انرژی جنبشی کمیت خیلی مهمی در سیستم‌های جریانی (باز) باشد. سیال در حال حرکت است بنابراین انرژی جنبشی آن باید قابل توجه باشد. در مورد مقدار زیادی از مسائل عملی چنین نیست زیرا انرژی‌های جنبشی خیلی کوچکند. برای نشان دادن درستی این امر اجازه دهید سرعت لازم جهت تولید تنها ۱ Btu/lbm یا ۱ kJ/kg انرژی جنبشی را محاسبه کنیم:

$$1 \text{ Btu/lbm} = 778 \text{ ft.lbf/lbm} = \frac{1}{2g_c} \bar{V}^2$$

با  $g_c = 32/2 \frac{\text{lbm.ft}}{\text{lbf.s}^2}$  به دست می‌آوریم

$$\bar{V} = 224 \text{ ft/s}$$

در سیستم آحاد SI، برای ۱ kJ/kg KE =

$$1000 \text{ J/kg} = \frac{1}{2} \bar{V}^2$$

و

$$\bar{V} = 44.7 \text{ m/s}$$

این سرعتها خیلی بالاتر از آنچه در بیشتر مسائل عملی با آن سروکار داریم می‌باشد. یک استثناء قابل

توجه، جریان در موتور جت یا توربین گازی است. اما برای جریان آب، هوا یا بخار آب در لوله‌ها، فریون در لوله‌های تهویه مطبوع و خیلی مثالهای دیگر، سرعت جریان به اندازه کافی کوچک است که بتوان از انرژیهای جنبشی در مقابل انتالیهی یا انرژیهای داخلی جریانها صرف نظر کرد.

#### ۴-۶ خلاصه حالات خاص سیستم باز

برای کمک به خواننده در کاربرد و تحلیل سیستم باز معادلات عمومی ساده شده برای تعدادی حالات خاص در جدول ۴-۱ ارائه شده است. منظور از این جدول القای فلسفه کتاب آشپزی در خواننده نیست، بلکه نشان دادن ساده شدن روابط برای تعدادی از مسائل عملی است.

جدول ۴-۱ حالات خاص برای سیستمهای باز

معادله انرژی	$\frac{d'W_{ext}}{d\tau}$	$\frac{d'Q}{d\tau}$	ChE	KE	جریانهای ورودی چندگانه	حالت دائم	جریان دائم
$\frac{d'W_{ext}}{d\tau} = \dot{m}(h_e - h_i)$	-	۰	۰	۰	خیر	آری	آری
$\frac{d'Q}{d\tau} = \dot{m}(h_e - h_i)$	۰	-	۰	۰	خیر	آری	آری
$\dot{m}h_i + \frac{d'Q}{d\tau} + \frac{d'W_{ext}}{d\tau}$ $= \dot{m}h_e + \left(\frac{dU}{d\tau}\right)_\sigma$	-	-	۰	۰	خیر	خیر	آری
$\sum \dot{m}h_i = \sum \dot{m}h_e$	۰	۰	۰	۰	آری	آری	آری
$\frac{d'Q}{d\tau} = \sum \dot{m}h_e - \sum \dot{m}h_i$	۰	-	۰	۰	آری	آری	آری
$\dot{m}h_i = \dot{m}h_e + \left(\frac{dU}{d\tau}\right)_\sigma$	۰	۰	۰	۰	خیر	خیر	خیر

به اختصار، می‌توان گفت که تجزیه و تحلیل سیستمهای باز با موازنه انرژی سروکار دارد و از خیلی نظرها شبیه به بررسی سیستمهای بسته می‌باشد. تفاوت در تجزیه و تحلیل سیستمهای بسته و باز این است که جمله کار در بررسی سیستم باز به دو بخش تقسیم می‌شود، یک بخش معرف کار انجام شده خارجی بر روی حجم کنترل و بخش دیگر معرف کار لازم برای وارد و یا خارج کردن جرم از حجم کنترل می‌باشد. برای راحتی در جمع کردن انرژی حرارتی داخلی و کار جریان در موارد خاص خاصیت انتالپی معرفی می‌شود. مثالهای زیرین، کاربرد اصل بقای انرژی را برای بررسی سیستمهای باز نشان می‌دهد.

### مثال ۴-۱ توربین بخار جریان دائم

یک ۱ lbm/s بخار آب در ۵۰۰ psia و ۷۰۰ °F با سرعتی معادل ۸۰۰ ft/s وارد یک توربین جریان دائم می‌شود. بخار آب، توربین را در ۵ psia و ۲۰۰ °F با سرعت ۱۰۰ ft/s ترک می‌کند. توربین طوری عایق شده که می‌توان فرآیند را یک تحول آدیاباتیک فرض کرد. اسب بخار خروجی توربین را محاسبه کنید.

**حل:** این مسأله جریان دائم - حالت دائم است بنابراین  $\dot{m}_i = \dot{m}_e$  و  $\left(\frac{dE}{dt}\right)_c = 0$ . با حذف جمله انرژی شیمیایی از معادله ۴-۱۵ و مشاهده این که  $\frac{d'Q}{dt} = 0$  داریم

$$\frac{d'W_{ext}}{dt} = \dot{m}(h_e - h_i) + \frac{\dot{m}}{2g_c}(V_e^2 - V_i^2)$$

از جداول بخار داغ داریم

$$h_i = 1357.0 \text{ Btu/lbm}$$

$$\text{در } 700^\circ\text{F و } 500 \text{ psia}$$

$$h_e = 1148.8 \text{ Btu/lbm}$$

$$\text{در } 200^\circ\text{F و } 5 \text{ psia}$$

پس

$$\frac{d'W_{ext}}{dt} = (1)(1148.8 - 1357.0) + \frac{1}{(2)(32.2)(778)}(100^2 - 800^2)$$

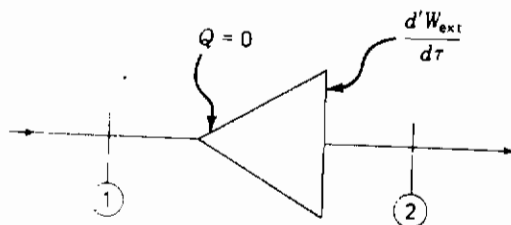


$$\begin{aligned}\frac{d'W_{ext}}{d\tau} &= -221 \text{ Btu/s} \\ &= -7.96 \times 10^5 \text{ Btu/h}\end{aligned}$$

چون  $1 \text{ hp} = 2545 \text{ Btu/h}$ ، قدرت خروجی بر حسب اسب بخار برابر است با

$$\text{hp} = \frac{7.96 \times 10^5}{2545} = 313 \quad (233.4 \text{ kW})$$

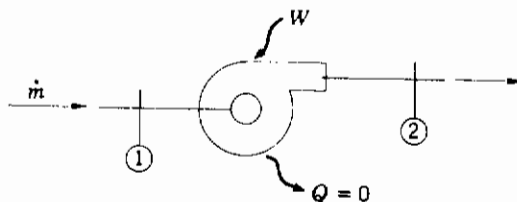
علامت منفی مشخص می‌کند که کار به اجسام خارجی توسط حجم کنترل داده می‌شود.



شکل مثال ۴-۱

## مثال ۴-۲ کارپمپ آدیاباتیکی

آب بادی  $80 \text{ lbm/min}$  به صورت آدیاباتیکی در یک فرآیند جریان دائم از  $100^\circ\text{F}$  و  $100 \text{ psia}$  تا  $1000 \text{ psia}$  متراکم می‌شود. با فرض این که آب تراکم‌ناپذیر باشد، اسب بخار لازم را محاسبه کنید.



شکل مثال ۴-۲

**حل:** طرحواره این فرآیند مطابق شکل ضمیمه نشان داده می‌شود. از آنجایی که احتمالاً سرعت‌های جریان کوچک هستند از انرژی جنبشی جریان آب صرف نظر می‌کنیم و معادله ۴-۱۵ را برای جریان دائم و حالت دائم به صورت زیر می‌نویسیم:

$$\dot{m}h_1 + W = \dot{m}h_2$$

یا

$$W = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (a)$$

$W$  نرخ انجام کار بر روی پمپ می‌باشد. از فصل دوم برای یک ماده ساده تراکم پذیر داریم:

$$d'Q = du + pdv \quad (b)$$

همچنین،

$$dh = du + pdv + vdp \quad (c)$$

برای یک فرآیند آدیاباتیک  $d'Q = 0$ ، بنابراین معادله (c) به صورت زیر درمی‌آید:

$$dh_{ad} = vdp \quad (d)$$

با انتگرال گرفتن از معادله (d) داریم:

$$(h_2 - h_1)_{ad} = \int_{p_1}^{p_2} v dp$$

اگر سیال تراکم ناپذیر باشد،  $v \approx \text{const.}$  و

$$(h_2 - h_1)_{ad} = v(p_2 - p_1) \quad (e)$$

پس کار از معادله (a) محاسبه می‌شود.

$$W = \dot{m}v(p_2 - p_1) \quad (f)$$

مقدار حجم مخصوص برای مایع اشباع در  $100^{\circ}\text{F}$  در نظر گرفته می شود:

$$\nu = 0.01613 \text{ ft}^3/\text{lbm}$$

و کار برابر می شود با

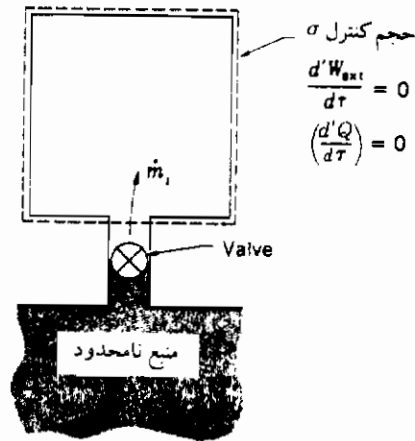
$$\begin{aligned} W &= (80)(0.01613)(1000 - 100)(144) \\ &= 167000 \text{ ft.lbf/min} \\ &= 5.06 \text{ hp} \quad (3775 \text{ W}) \end{aligned}$$

فرض تراکم ناپذیر بودن می تواند به وسیله مراجعه به جداول مایع متراکم شده کنترل شود، در آنجا معلوم می شود که تغییر در حجم مخصوص در اثر ازدیاد فشار فقط حدود  $0.3\%$  درصد می باشد. توجه داشته باشید که در نوشتن معادله  $(a)$  علامت قراردادی به کار رفته است. چون ما به دنبال مقدار کار داده شده به پمپ می باشیم، پس از ترسیم شکل مقدار کار اضافه شده را با علامت مثبت در نظر می گیریم. طرف راست معادله معرف اختلاف بین انرژی خارج و وارد شده به پمپ است و بنابراین باید معادل انرژی کار اضافه شده باشد.

### مثال ۴-۳ پر شدن یک مخزن

یک مخزن خالی با شیر مناسبی به یک منبع نامحدود از بخار آب در  $100 \text{ psia}$  و  $500^{\circ}\text{F}$ ، همان طوری که در شکل ضمیمه نشان داده شده است، متصل است. شیر باز می شود و بخار آب به داخل مخزن جریان می یابد تا فشار به  $100 \text{ psia}$  برسد. محاسبه کنید دمای بخار آب در مخزن را در لحظه ای که فشار به  $100 \text{ psia}$  می رسد. فرض کنید مخزن عایق شده و هیچ گونه کار محوری به مخزن داده نمی شود.

**حل:** این فرآیند جریان غیر دائم و حالت غیر دائم می باشد، از آنجایی که شدت جریان به داخل مخزن و مقدار جرم بخار در مخزن هر دو با زمان تغییر می کند. ما حجم کنترل را مطابق با آنچه در شکل



شکل مثال ۳-۴

بوسیله خط چین نشان داده شده است انتخاب می‌کنیم. با صرف نظر کردن از انرژی‌های جنبشی معادله ۴-۱۵ را می‌توان به صورت انتگرال زیر نوشت:

$$\int \dot{m}_i h_i d\tau = \int \left( \frac{dE}{d\tau} \right)_\sigma d\tau = m_2 u_2 - m_1 u_1 \quad (a)$$

$m_1$  و  $m_2$  مقادیر جرم اولیه و جرم انتهایی در مخزن است. از بیان مسأله  $m_1 = 0$  است. اما جرم نهایی در مخزن برابر است با

$$m_2 = \int \dot{m}_i d\tau$$

بنابراین معادله (a) به صورت زیر درمی‌آید:

$$h_i = u_2 \quad (b)$$

از جداول بخار داغ داریم

$$h_i = 1279.1 \text{ Btu/lbm} \quad (2975 \text{ kJ/kg})$$

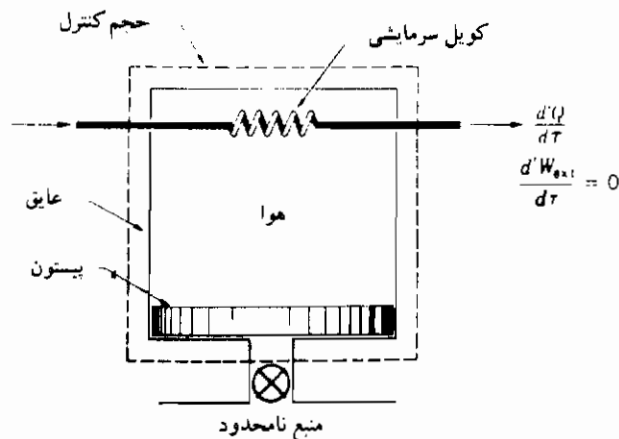
دمای نهایی مربوط به  $u_2 = 1279/1 \text{ Btu/lbm}$  از جدول A-۹ پیدا می‌شود. نتیجه برابر است با:

$$T_2 = 767^\circ\text{F} \quad (408.6^\circ\text{C})$$

#### مثال ۴-۴

مخزن مثال ۴-۳، طوری بازسازی می‌شود که پیستونی در کف آن توسط هوایی با فشار  $20 \text{ psia}$  نگاه داشته می‌شود. پیستون از جنسی غیرهادی ساخته شده و خود مخزن نیز عایق است. یک کویل برودتی کوچک در داخل سیلندر طوری قرار می‌گیرد که دمای هوا را در  $100^\circ\text{F}$  ثابت نگه‌دارد. حجم کلی مخزن  $3 \text{ ft}^3$  می‌باشد. مخزن دوباره به یک منبع نامحدود بخار آب در  $100 \text{ psia}$  و  $500^\circ\text{F}$  متصل می‌شود و شیر تا زمانی که فشار مخزن به مقدار  $100 \text{ psia}$  برسد باز می‌ماند. دمای نهایی بخار آب را در این شرایط محاسبه کنید.

**حل:** حجم کنترل برای این مسئله مطابق شکل ضمیمه با خط چین مشخص می‌شود. توجه کنید که هوا، بخار آب و پیستون داخل سیلندر به عنوان سیستم ترمودینامیکی انتخاب می‌شود. اگر چه مخزن عایق است، حرارت به وسیله عمل کویل برودتی به خارج هدایت می‌شود. مقدار حرارت خارج شده بوسیله تعیین انتقال حرارت از هوا هنگامی که به صورت دما ثابت از  $20 \text{ psia}$  تا  $100 \text{ psia}$  متراکم



شکل مثال ۴-۴

شود، محاسبه می‌گردد. جرم هوا برابر است با:

$$m_a = \frac{pV}{RT} = \frac{(20)(144)(3)}{(53.35)(560)} = 0.289 \text{ lbm} \quad (131 \text{ g})$$

و کار انجام شده بر روی آن برابر است با:

$$W_a = \int -pdV = \int_{V_1}^{V_2} mRT \frac{dV}{V} = -mRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

چون دما ثابت می‌ماند،  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$  بنابراین مقدار کار برابر است با

$$\begin{aligned} W_a &= -mRT \ln \frac{p_1}{p_2} \\ &= - (0.289)(53.35)(560) \ln \frac{20}{100} \\ &= -13850 \text{ ft.lbf} = 17.8 \text{ Btu} \quad (18.89 \text{ kJ}) \end{aligned}$$

برای هوا به عنوان سیستم بسته می‌توانیم قانون اول را به صورت زیر بنویسیم

$$Q_a + W_a = \Delta U_a$$

اما چون  $T_a = \text{const.}$  و  $\Delta U_a = 0$

$$Q_a = -W_a = -17.8 \text{ Btu} \quad (-18.89 \text{ kJ})$$

اصطلاح "پستون غیر هادی حرارت" به معنی این است که پستون به عنوان یک مانع عایق بین بخار آب داغ و هوای خنک عمل کرده و بخار آب به تنهایی از یک فرآیند آدیاباتیک می‌گذرد. بنابراین انتقال حرارت از هوا با کل حرارت از دست داده شده توسط حجم کنترل برابر می‌باشد. حالا معادله ۴-۱۵ را می‌توانیم به صورت انتگرال بنویسیم

$$\int \dot{m}_i h_i d\tau + Q = \int \left( \frac{dE}{d\tau} \right)_o d\tau = m_{2s} u_{2s} - m_{1s} u_{1s} \quad (a)$$

چون تغییر انرژی داخلی هوا در حجم کنترل وجود ندارد. مطابق مثال ۴-۴ دریافتیم که

$$\int m_i d\tau = m_{2s}$$

پس نهایتاً چون  $m_{1s} = 0$

$$m_{2s}(h_i - u_{2s}) = -Q \quad (b)$$

حجم نهایی بخار برابر است با

$$V_{2s} = 3 - V_{a2} = 3.0 - \frac{3}{5} = 2.4 \text{ ft}^3 \quad (67.96 \text{ liters})$$

و جرم بخار آب برابر است با

$$m_{2s} = \frac{V_{2s}}{v_{2s}}$$

بنابراین معادله (b) با  $h_i = 1279.1 \text{ Btu/lbm}$  و  $Q = -17/8 \text{ Btu}$  به صورت زیر در می آید

$$\frac{2.4}{v_{2s}} (1279.1 - u_{2s}) = 17.8 \quad (c)$$

معادله (c) باید به وسیله تکرار سعی و خطا و با استفاده از جداول بخار داغ حل شود. نتیجه برابر است با:

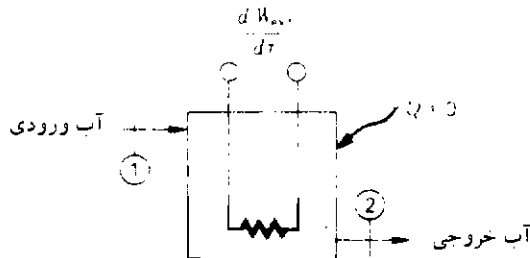
$$T_{2s} = 536^\circ\text{F} \quad (280^\circ\text{C})$$

دمای بخار آب کمتر از مقدار آن برای مثال ۳-۴ می باشد، زیرا قسمتی از انرژی ورودی صرف کار تراکمی بر روی هوا می شود. این کار تراکمی بعداً از حجم کنترل با فرآیند سرمایش خارج می شود.

#### مثال ۴-۵ سرمایش گذرا به یک مخزن آب

آب در  $80^\circ\text{F}$  با دبی  $10 \text{ lbm/min}$  وارد مخزنی می شود. مخزن شامل  $300 \text{ lbm}$  آب است و از طریق یک کانال خروجی آب با دبی  $10 \text{ lbm/min}$  از ظرف تخلیه می گردد. آب در مخزن به خوبی مخلوط می گردد. اگر مخزن عایق باشد و به طور ناگهانی یک گرمکن الکتریکی در مخزن قرار گیرد که تولید حرارت با شدت ثابت  $20000 \text{ Btu/h}$  نماید، زمان لازم جهت رسیدن دمای خروجی به

۱۰۰ °F را محاسبه کنید. دمای خروجی هنگامی که به شرایط دائم می‌رسد چقدر است؟ از وزن مخزن صرف نظر کنید



شکل مثال ۴-۵

حل: این نمونه‌ای از یک مسأله جریان دائم ولی حالت غیر دائم است. مطابق طرحواره و بیان مسأله

$$T_1 = \text{const.} = 80^\circ\text{F} \quad (26.67^\circ\text{C})$$

$$T_2 = 80^\circ\text{F} \quad \tau = 0 \text{ در}$$

$$T_\sigma = 80^\circ\text{F} \quad t = 0 \text{ در} \quad (\sigma \text{ مربوط به آب داخل مخزن می‌باشد})$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = 10 \text{ lbm/min} = 600 \text{ lbm/h} = \text{const.}$$

$$m_\sigma = 300 \text{ lbm} = \text{const.}$$

$$Q = 0 \quad (\text{مخزن عایق می‌باشد})$$

$$\frac{d'W_{ex}}{d\tau} = 20000 \text{ Btu/h} \quad (\text{شروع در } \tau = 0)$$

(کار الکتریکی عبوری از مرز حجم کنترل)

انرژی داخل مخزن برابر است با

$$E_\sigma = m_\sigma e_\sigma = m_\sigma u_\sigma \text{ Btu/lbm} \quad (\text{انرژی جنبشی ناچیز است}) \quad (a)$$

چون در هر لحظه آب در مخزن بختوی مخلوط می‌شود، همیشه  $T_\sigma = T_2$  می‌باشد. برای آب مایع در این محدوده دما  $\Delta h$  و  $\Delta u$  بخوبی با رابطه‌های زیر تقریب‌سازی می‌گردد.

$$\Delta h \approx (1.0)\Delta T \text{ Btu/lbm} \quad (b)$$

$$\Delta u \approx (1.0)\Delta T \text{ Btu/lbm} \quad (c)$$



با مراجعه به جدول A-۷ در ۸۰ و ۱۰۰ °F

$$h_f = 48.09 \text{ (در } 80^\circ\text{F)}$$

$$h_f = 68.05 \text{ (در } 100^\circ\text{F)}$$

$$\Delta h = 68.05 - 48.09 = 19.96 \approx (1.0)(100 - 80) \quad (d)$$

محاسبه مشابهی برای  $\Delta u$  به کار می‌رود. چون این مسأله حالت غیردائم است، ما نیاز به محاسبه  $\left(\frac{du}{d\tau}\right)_\sigma$  داریم و می‌توانیم بنویسیم

$$\left(\frac{dE}{d\tau}\right)_\sigma = \frac{d(m_\sigma u_\sigma)}{d\tau} = m_\sigma(1.0) \frac{dT_\sigma}{d\tau} \quad (e)$$

موازنه کلی انرژی به وسیله رابطه زیر داده می‌شود

$$\dot{m}_1(1.0)T_1 + 20000 = \dot{m}_2(1.0)T_2 + m_\sigma(1.0) \frac{dT_\sigma}{d\tau} \quad \text{Btu/h} \quad (f)$$

$\tau$  بر حسب ساعت است زیر انرژی ورودی به ازای ساعت می‌باشد. با توجه به این که  $T_2 = T_\sigma$  و با جایگزین کردن مقادیر عددی مختلف، معادله دیفرانسیل درجه یک خواهیم داشت.

$$300 \frac{dT_2}{d\tau} + 600T_2 = 68000 \quad (g)$$

حلّ این معادله چنین است :

$$T_2 - 113.33 = C_1 e^{-2\tau} \quad (h)$$

و مقدار ثابت  $C_1$  از شرط اولیه تعیین می‌گردد.

$$T_2 = 80^\circ\text{F} \quad (\tau = 0 \text{ در}) \quad (i)$$

$$C_1 = -33.33$$

بنابراین

$$T_2 - 113.33 = -33.33e^{-2\tau} \quad (j)$$

$\tau$  بر حسب ساعت می باشد. معادله  $z$  می تواند برای زمان حل گردد هنگامی که  $T_2$  مقدار  $100^\circ\text{F}$  را به دست آورد.

$$\tau = 0.458 \text{ h} \quad T_2 = 100^\circ\text{F} \text{ هنگامی که}$$

هنگامی که به شرایط حالت دائم می رسد،  $T_2$  دیگر با زمان تغییر نمی کند. بنابر این  $\frac{dT_2}{d\tau} = 0$  در معادله (g) می دهد.

$$600T_2 = 68000 \quad (\text{حالت دائم})$$

$$T_2 = 113.33^\circ\text{F} \text{ در حالت دائمی}$$

نتیجه مشابهی را می توان با به کار بردن معادله (j) در زمانهای خیلی زیاد  $\tau \rightarrow \infty$  به دست آورد.

### مثال ۶-۴ گرمکن آب تغذیه بسته

یک گرمکن آب تغذیه بسته برای نیروگاه بخاری مطابق شکل همراه، کار می کند. آب مایع تحت فشار  $10 \text{ MPa}$  و  $30^\circ\text{C}$  وارد یک دسته لوله های گرم کننده می شود. بخار آب در  $1/5 \text{ MPa}$  و  $95\%$  درصد کیفیت بر روی لوله ها پاشیده می شود و تقطیر می یابد. در نتیجه مایع اشباع از مقطع ۴ دستگاه خارج شود. فرض می کنیم که آب پر فشار تا دمای اشباع بخار تقطیر شده گرم می شود. می خواهیم جرم بخار مورد لزوم را به ازای واحد جرم مایع ورودی محاسبه کنیم. فرض می شود که گرمکن کاملاً عایق (آدیاباتیک) است.

حل: از بیان مسأله داریم

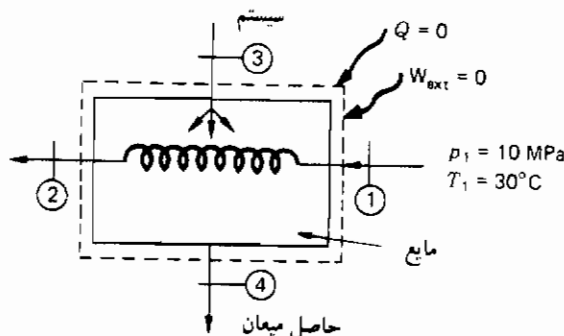
$$m_1 = m_2 = 1.0$$

$$m_3 = m_4 = m_s$$

$$p_1 = p_2 = 10 \text{ MPa} \quad (a)$$

$$p_3 = p_4 = 1.5 \text{ MPa} \quad x_3 = 0.95$$

$$T_3 = T_4 = T_2 = T_{sat} \quad 1.5 \text{ MPa در } = 198.3^\circ\text{C}$$



شکل مثال ۴-۶

این فرآیند، جریان دائم - حالت دائم است و کار روی حجم کنترل انجام نمی‌شود. با فرض این‌که انرژیهای جنبشی ناچیز باشد، موازنه انرژی برای گرمکن تغذیه به صورت زیر درمی‌آید؛

$$m_1 h_1 + m_3 h_3 = m_4 h_4 \quad (b)$$

یا

$$h_2 - h_1 = m_s(h_3 - h_4) \quad (c)$$

این معادله بیان می‌کند که انرژی داده شده به وسیله بخار آب تقطیر شده به وسیله آب تحت فشار جذب می‌گردد. حالا ما مقادیر انتالپی را از جدول بخار آب تعیین می‌کنیم.

$$h_1 = 134.86 \text{ kJ/kg} \quad (\text{مایع متراکم شده در } 10 \text{ MPa و } 30^\circ\text{C})$$

$$h_2 = 848.54 \text{ kJ/kg} \quad (\text{مایع متراکم شده در } 10 \text{ MPa و } 198.3^\circ\text{C})$$

$$h_3 = h_f + x_3 h_{fg} = 844.89 + (0.95)(1947.3)$$

$$= 2694.8 \text{ kJ/kg} \quad (\text{از جدول فشار اشباع در } 1.5 \text{ MPa})$$

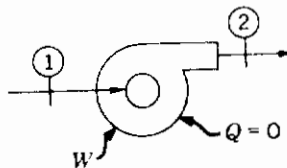
$$h_4 = h_f(1.5 \text{ MPa}) = 844.89 \text{ kJ/kg}$$

با جایگزینی این مقادیر در معادله (c) به دست می‌آید.

$$m_s = 0.3858 \text{ kg بخار/kg آب}$$

### مثال ۴-۷ کمپرسور هوای آدیاباتیکی

هوا به یک کمپرسور در  $1 \text{ atm}$  و  $20^\circ \text{C}$  وارد می‌شود و از لوله‌ای با قطر داخلی  $1 \text{ cm}$  تخلیه می‌گردد. سرعت متوسط هوا در لوله نزدیک به نقطه تخلیه برابر با  $7 \text{ m/s}$  است و فشار تخلیه  $3.5 \text{ atm}$  می‌باشد. با فرض این که تراکم به صورت نیمه ساکن و آدیاباتیکی صورت پذیرد، مقدار کار داده شده به کمپرسور را محاسبه کنید. فرض کنید که سرعت ورودی هوا ناچیز باشد.



شکل مثال ۴-۷

**حل:** طرحواره فرآیند در شکل ضمیمه نشان داده می‌شود. واحدهای SI را برای حل این مسأله به کار می‌بریم. خواص داده شده به قرار زیر است.

$$p_1 = 1 \text{ atm} = 1.0132 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_2 = 3.5 \text{ atm} = 3.546 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_1 = 20^\circ \text{C} = 293 \text{ K}$$

$$V_2 = 7 \text{ m/s}$$

$$V_1 \approx 0$$

$$\gamma = 1.4 \text{ برای هوا}$$

$$d_2 = 1.0 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$$

به‌خاطر فرض فرآیند نیمه ساکن آدیاباتیکی

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} = (293)(3.5)^{0.286} = 419 \text{ K}$$

در مقطع ۲، می‌توانیم شدت جریان جرمی را از معادله (۴-۳) محاسبه کنیم، اما ابتدا به چگالی هوا در آن نقطه احتیاج داریم

$$\rho_2 = \frac{1}{v_2} = \frac{P_2}{RT_2}$$

ثابت گازها برای هوا برابر است با

$$R = \frac{\Re}{M} = \frac{8315}{28.97} = 287 \text{ J/kg.K}$$

بنابراین

$$\rho_2 = \frac{3.546 \times 10^5}{(287)(419)} = 2.949 \text{ kg/m}^3$$

در نتیجه شدت جریان برابر است با

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \rho_2 A_2 V_2 \\ &= \frac{(2.949)\pi(0.01)^2(7)}{4} = 1.621 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \end{aligned} \quad (a)$$

برای جریان دائم و جریان حرارت صفر، معادله انرژی برابر است با

$$\dot{m} \left( h_1 + \frac{V_1^2}{2g_c} \right) + \frac{d'W_{ex}}{d\tau} = \dot{m} \left( h_2 + \frac{V_2^2}{2g_c} \right) \quad (b)$$

برای هوا مقدار  $c_p$  برابر است با

$$c_p = 0.024 \text{ Btu/lbm.}^\circ\text{F} = 1005 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$$

انرژی جنبشی در محل ۱ طبق بیان مسأله برابر صفر است در حالی که در محل ۲ برابر است با

$$KE_2 = \frac{V_2^2}{2g_c} = \frac{(7 \text{ m/s})^2}{(2)(1.0 \text{ kg.m/N.s}^2)} = 24.5 \text{ J/kg}$$

با در نظر گرفتن هوا به عنوان گاز ایده آل، اختلاف انتالپی برابر است با

$$\begin{aligned} h_2 - h_1 &= c_p(T_2 - T_1) = (1005 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(419 - 293) \\ &= 1.266 \times 10^5 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

از این محاسبات می‌بینیم که می‌توان از انرژی جنبشی در محل ۲ نسبت به اختلاف انتالپی صرف نظر کرد. حالا با جایگزین مقادیر عددی در معادله (b) به دست می‌آوریم:

$$\begin{aligned} \frac{d'W_{ext}}{d\tau} &= (1.621 \times 10^{-3} \text{ kg/s})(1.266 \times 10^5 + 24.5) \text{ J/kg} \\ &= 205.1 \text{ J/s} = 205.1 \text{ W} \end{aligned}$$

### مثال ۸-۴ توربین هلیوم

هلیوم به صورت شبه ساکن و آدیاباتیک در یک توربین از ۴۰۰ kPa و  $260^\circ\text{C}$  تا ۱۰۰ kPa منبسط می‌شود. توربین عایق است و سرعت ورودی ناچیز و سرعت خروجی ۲۰۰ m/s است. مقدار کار خروجی توربین را به ازای واحد جرم جریان هلیوم محاسبه کنید.

**حل:** طرحواره فهرست علایم مسأله را مشخص کرده است. برای فرآیند جریان دائم آدیاباتیک با فرض جریان داشتن جرم واحد، معادله انرژی به صورت زیر در می‌آید.

$$h_1 + \frac{1}{2g_c} V_1^2 + W = h_2 + \frac{1}{2g_c} V_2^2 \quad (a)$$

هلیوم را می‌توان به صورت یک گاز ایده آل در نظر گرفت، به طوری که

$$h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1) \quad (b)$$

دمای نهایی را می‌توان از معادله (۲-۳۹) با  $n = \gamma$  برای فرآیند آدیاباتیک شبه ساکن به دست آورد.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\gamma - 1/\gamma} \quad (c)$$

با

$$T_1 = 260 + 273 = 533 \text{ K}$$

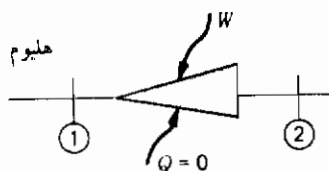
از جدول ۲-۲ برای هلیوم،

$$c_p = 5.234 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \quad \gamma = 1.66$$

$$T_2 = (260 + 273) \left( \frac{100}{400} \right)^{(1.66-1)/1.66} = 307 \text{ K}$$

با جایگزینی مقادیر در معادله (a)، با  $V_1 = 0$  داریم:

$$W = (5234)(307 - 533) + \frac{1}{(2)(1)} (200)^2 = -1.163 \text{ MJ/kg}$$



شکل مثال ۴-۸

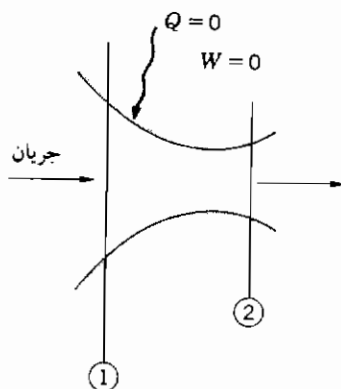
در نوشتن معادله (a) جمله کار را به صورت کمیت مثبت وارد به حجم کنترل در نظر گرفتیم زیرا طرف چپ معادله به همراه انتالپی و انرژی جنبشی وارد به توربین ظاهر شد. بنابراین علامت منفی در جواب مشخص کننده این است که کاری خالص از توربین خارج شده است.

#### مثال ۴-۹ انبساط شیبوره آدیاباتیک

هوا در یک شیبوره به طور شبه ساکن و آدیاباتیک از ۲۰۰ psia و ۳۰۰ °F تا ۱۰۰ psia منبسط می گردد. سرعت ورودی به شیبوره ناچیز است و فرآیند در جریان دائم صورت می گیرد. سرعت خروجی از شیبوره را محاسبه کنید.

**حاصل:** دوباره از معادله انرژی جریان دائم استفاده می کنیم. برای واحد جریان جرم موقعی که انتقال حرارت و کار موجود نیست، داریم:

$$h_1 + \frac{1}{2g_c} V_1^2 = h_2 + \frac{1}{2g_c} V_2^2 \quad (a)$$



شکل مثال ۹-۴

زیرنویسهای ۱ و ۲ همان طوری که در شکل همراه نشان داده شده است، نمایانگر شرایط ورودی و خروجی می باشد. چون  $V_1 \approx 0$  و انتالپی برای گاز ایده آل فقط تابعی از دما می باشد، معادله (a) را می توان برای سرعت خروجی حل کرد.

$$V_2 = [2g_c(h_1 - h_2)]^{1/2} = [2g_c c_p (T_1 - T_2)]^{1/2} \quad (b)$$

با  $n = \gamma$  برای فرآیند آدیاباتیک شبه ساکن بدست می آید

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (c)$$

بنابراین، دمای نهایی برابر است با

$$\begin{aligned} T_2 &= (300 + 460) \left(\frac{100}{200}\right)^{(1.4-1)/1.4} \\ &= 625^\circ\text{R} = 165^\circ\text{F} \quad (73.9^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

اکنون سرعت نهایی از معادله (b) محاسبه می شود.



$$V_2 = [(2)(32.2)(778)(0.24)(300 - 165)]^{1/2}$$

$$= 1272 \text{ ft/s} \quad (387.7 \text{ m/s})$$

### مثال ۴-۱۰ تبخیرکننده فریون

"کویل سرمایش" برای یک سیستم تهویه مطبوع، در حقیقت یک تبخیرکننده فریون است که مطابق شکل همراه کار می‌کند. مایع اشباع فریون، در  $80^\circ\text{F}$  وارد یک سری لوله شده و تا فشار پایین‌تری منبسط می‌شود تا دمای پایین‌تر  $50^\circ\text{F}$  حاصل شود. فین‌هایی بر روی لوله‌ها متصل می‌باشد و هوا در  $80^\circ\text{F}$  از روی آنها عبور می‌کند. در نتیجه انرژی به وسیله هوا داده می‌شود و باعث تبخیر فریون می‌گردد. فرض می‌کنیم که فریون لوله‌ها را در حالت بخار اشباع ترک کند. اگر دمای خروجی هوا  $60^\circ\text{F}$  باشد و  $60,000 \text{ Btu/h}$  انرژی از هوا گرفته شود، و دبی جرمی فریون لازم و دبی جرمی هوایی را که باید خنک شود، محاسبه کنید. خارج کویل سرمایش، کاملاً عایق است.

**حل:** فرض می‌شود که فرآیند جریان دائم، حالت دائم با  $Q = 0$  و  $W_{ext} = 0$  باشد. از بیان مسأله داریم

$$T_{a1} = 80^\circ\text{F}$$

$$T_{a1} = 60^\circ\text{F}$$

$$T_{F1} = 80^\circ\text{F} \text{ (مایع اشباع)}$$

$$T_{F1} = 50^\circ\text{F} \text{ (بخار اشباع)}$$

حجم کنترل به وسیله خط چین مشخص می‌شود و موازنه انرژی برابر است با:

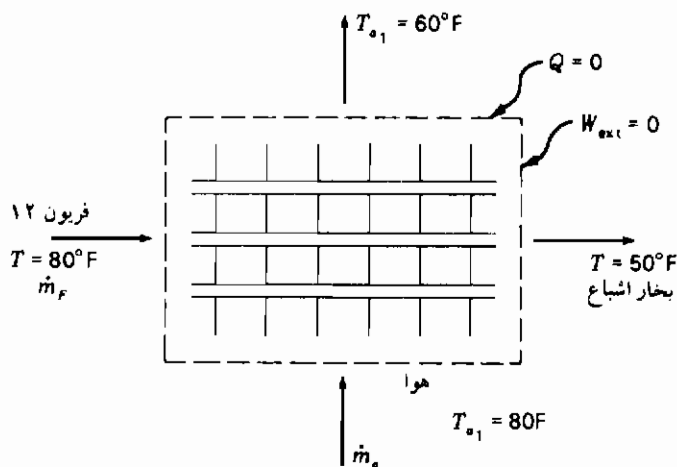
$$\dot{m}_F h_{F1} + \dot{m}_a h_{a1} = \dot{m}_F h_{F2} + \dot{m}_a h_{a2} \quad (a)$$

یا

$$\dot{m}_F (h_{F2} - h_{F1}) = \dot{m}_a (h_{a1} - h_{a2}) \quad (b)$$

این معادله را می‌توان به صورت زیر نیز بیان کرد:

60000 Btu/h = انرژی از دست داده شده بوسیله هوا = انرژی گرفته شده به وسیله فریون



شکل مثال ۱۰-۴

یا

$$\dot{m}_F (h_{F2} - h_{F1}) = 60000 \text{ Btu/h}$$

از جدول اشباع فریون

$$h_{F2} = h_g (50^\circ\text{F در}) = 82.433 \text{ Btu/lbm}$$

$$h_{F1} = h_f (80^\circ\text{F در}) = 26.365 \text{ Btu/lbm}$$

بنابراین:

$$\dot{m}_F = \frac{60000 \text{ Btu/h}}{82.433 - 26.365} = 1070 \text{ lbm/h} \quad (0.135 \text{ kg/s})$$

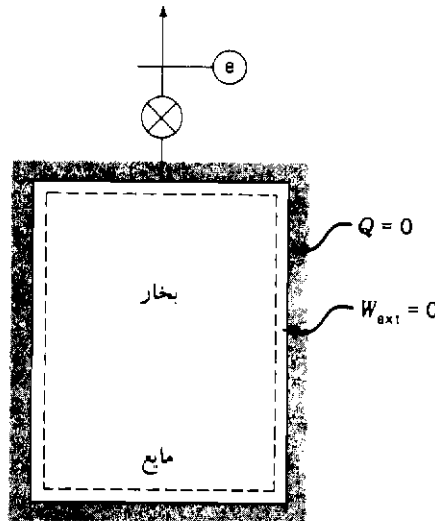
به این ترتیب

$$60000 \text{ Btu/h} = \dot{m}_a c_{pa} (T_{a1} - T_{a2})$$

$$\dot{m}_a = \frac{60000}{(0.24)(80 - 60)} = 12500 \text{ lbm/h} \quad (1.58 \text{ kg/s})$$

## مثال ۴-۱۱ تخلیه بخار آب از یک مخزن

مخزن صلبی به حجم  $3/0 \text{ m}^3$  حاوی آب  $120^\circ\text{C}$  در حالت اشباع، با ۲ درصد حجم آن به وسیله مایع اشغال شده است. مخزن کاملاً عایق است. یک شیر در بالای مخزن باز شده تا بخار خارج شود. زمانی که فشار به یک اتمسفر و دما به  $100^\circ\text{C}$  کاهش یابد، شیر بسته می شود. جرم خارج شده از مخزن را محاسبه کند.



شکل مثال ۴-۱۱

**حل :** حجم کنترل به صورت خط چین در شکل همراه نشان داده شده است. داریم :

$$\begin{aligned}
 T_1 &= 120^\circ\text{C} & V &= 0.2 \text{ m}^3 \\
 T_2 &= 100^\circ\text{C} & V_{f1} &= (0.2)(0.2) = 0.04 \text{ m}^3 \\
 & & V_{g1} &= (0.8)(0.2) = 0.16 \text{ m}^3 \\
 Q &= 0 & & \text{( زیرا مخزن عایق است )} \\
 W_{ext} &= 0 & & \text{( زیرا محور خارجی موجود نیست )}
 \end{aligned}$$

تنها بخار می تواند خارج شود بنابراین فرض این است که بخار اشباع خارج شود اما دما تغییر

می‌کند. قانون اول به صورت زیر بدون جریان ورودی نوشته می‌شود.

$$0 = \dot{m}_e h_e + \left( \frac{dU}{dt} \right)_c \quad (a)$$

در  $T = ۱۲۰^\circ\text{C}$ ،

$$h_e = h_g = 2706.3 \text{ kJ/kg}$$

در  $T = ۱۰۰^\circ\text{C}$ ،

$$h_e = h_g = 2676.1 \text{ kJ/kg}$$

در این محدوده باریک می‌توانیم با تقریب خوبی فرض کنیم که بخار با انتالپی متوسط این دو مخزن را ترک می‌کند.

$$\bar{h}_e = \frac{2706.3 + 2676.1}{2} = 2691.2 \text{ kJ/kg}$$

جرم خارج شده از مخزن برابر است با

$$m = m_1 - m_2 \quad (b)$$

جایگزینی  $\bar{h}_e$  در معادله (a) و انتگرال‌گیری داریم:

$$\int \dot{m}_e \bar{h}_e d\tau + \int dU = 0$$

یا

$$\bar{h}_e(m_1 - m_2) + m_2 u_2 - m_1 u_1 = 0 \quad (c)$$

حالا اجازه دهید این روابط را بررسی نماییم و ببینیم چه چیزی معلوم است و یا به سادگی می‌تواند تعیین شود. جرم ابتدایی برابر است با

$$m_1 = m_{f1} = m_{g1} = \frac{V_{f1}}{v_{f1}} = \frac{V_{g1}}{v_{g1}} \quad (d)$$

کیفیت ابتدایی برابر است با

$$x_1 = \frac{m_{g1}}{m_1} \quad (e)$$

و انرژی داخلی ابتدایی برابر است

$$u_1 = u_{f1} + x_1 u_{fg1} \quad (f)$$

در حالت نهایی

$$m_2 = \frac{V}{v_2} = \frac{V}{v_{f2} + x_2 v_{fg2}} \quad (g)$$

و

$$u_2 = u_{f2} + x_2 u_{fg2} \quad (h)$$

اگر تمام روابط و خواص بخار آب را وارد معادله (c) نمایم، خواهیم دید که تنها یک مجهول،  $x_2$ ، کیفیت نهایی وجود دارد. ابتدا خواص بخار آب را به دست می آوریم:

در  $120^\circ\text{C}$

$$v_{f1} = 0.0010603 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_{g1} = 0.8919 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_{f1} = 503.5 \text{ kJ/kg}$$

$$u_{g1} = 2529.3 \text{ kJ/kg}$$

در  $100^\circ\text{C}$

$$v_{f2} = 0.0010435 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_{g2} = 1.673 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_{f2} = 418.94 \text{ kJ/kg}$$

$$u_{g2} = 2506.5 \text{ kJ/kg}$$

با جایگزینی در معادله (d)

$$m_1 = \frac{0.04}{0.0010603} + \frac{0.16}{0.8919} = 37.725 + 0.179 = 37.905 \text{ kg}$$

و

$$x_1 = \frac{0.179}{37.905} = 0.00472$$

سپس از معادله (f) داریم:

$$u_1 = 503.5 + (0.00472)(2529.3 - 503.5) = 513.07 \text{ kJ/kg}$$

با جایگزینی تمام کمیات معلوم در معادله (c) داریم:

$$m_1(\bar{h}_e - u_1) + m_2(u_2 - \bar{h}_e) = 0$$

یا

$$37.905(2691.2 - 503.02) + \left[ \frac{0.2}{0.0010435 + x_2(1.673 - 0.0010435)} \right] \\ \times [418.94 + x_2(2506.5 - 418) - 2691.2] = 0$$

که می‌تواند برای یافتن  $x_2$  حل شود

$$x_2 = 0.00266$$

و جرم نهایی برابر است با:

$$m_2 = \frac{0.2}{0.0010435 + (0.00266)(1.672)} = 36.425 \text{ kg}$$

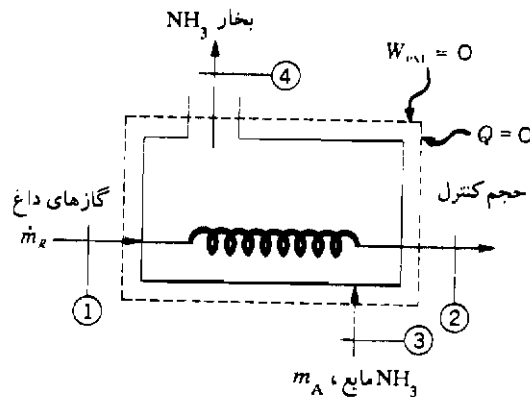
و بنابراین جرم خارج شده برابر است با:

$$m = m_1 - m_2 = 37.905 - 36.425 = 1.48 \text{ kg}$$

### مثال ۱۲-۴ گرمکن آمونیاک

گازهای حاصل احتراق در  $400^\circ\text{F}$  برای تولید آمونیاک داغ در  $260^\circ\text{F}$  و  $140^\circ\text{F}$  ازآمونیاک مایع در همان فشار و  $80^\circ\text{F}$ ، مورد استفاده قرار می‌گیرد. ظرفیت دستگاه مبدل حرارت

۵۰ lbm/min آمونیاک و دمای خروجی گازهای احتراق  $120^\circ\text{F}$  می باشد. سرعت آمونیاک در هنگام ترک دستگاه از  $20\text{ ft/s}$  تجاوز نمی کند و گرمای ویژه گازها را می توان  $0.26\text{ Btu/lbm}\cdot^\circ\text{F}$  در نظر گرفت. جریان جرمی گازهای احتراق مورد لزوم و قطر لوله خروجی برای بخار آمونیاک را محاسبه کنید.



شکل مثال ۴-۱۲

**حل:** طرحواره این دستگاه مبدل حرارت در شکل ضمیمه نشان داده می شود. اگر فرض کنیم که کل دستگاه انتقال حرارت عایق باشد، پس  $Q = 0$  است. هیچ سخنی از کار نیست بنابراین  $W_{ext} = 0$  است. با صرف نظر کردن از انرژیهای جنبشی برای سرعتهای پایین، موازنه انرژی را به صورت زیر می نویسیم.

$$\text{انرژی خارجی شده از مبدل حرارتی} = \text{انرژی داخلی شده به مبدل حرارتی}$$

یا

$$\dot{m}_g h_1 + \dot{m}_A h_3 = \dot{m}_g h_2 + \dot{m}_A h_4 \quad (a)$$

خواص آمونیاک مطابق زیر به دست می آید:

$$h_3 = 132.0\text{ Btu/lbm} \quad (\text{جدول ۱۲-A، مایع اشباع در } 80^\circ\text{F})$$

$$h_4 = 655.6 \text{ Btu/lbm} \quad (\text{جدول ۱۴-A, } 260 \text{ psia, } 140^\circ\text{F})$$

اگر رفتار گاز ایده آل را برای گازهای حاصل احتراق فرض کنیم

$$\begin{aligned} h_1 - h_2 &= c_p(T_1 - T_2) \\ &= (0.26 \text{ Btu/lbm}\cdot^\circ\text{F})(400 - 120) \\ &= 72.8 \text{ Btu/lbm} \quad (169.3 \text{ kJ/kg}) \end{aligned}$$

مقدار  $\dot{m}_A$ ، ۵۰ lbm/min داده شده است، بنابراین با جایگزینی مقادیر عددی در معادله (a) به دست می آوریم:

$$\dot{m}_g(h_1 - h_2) = \dot{m}_A(h_4 - h_3) \quad (b)$$

$$\dot{m}_g = \frac{(50)(655.6 - 132.0)}{72.8} = 359.6 \text{ lbm/min} \quad (163.1 \text{ kg/min})$$

حجم مخصوص آمونیاک داغ در خروج از مبدل برابر است با:

$$v_4 = 1.257 \text{ ft}^3/\text{lbm} \quad (\text{جدول ۱۴-A, } 260 \text{ psia, } 140^\circ\text{F})$$

حالا می توان از معادله (۴-۲) استفاده کرد تا سطح مقطع لازم را برای جریان این بخار محاسبه کنیم. داریم  $V_4 = 20 \text{ ft/s}$  بنابراین

$$\dot{m}_A = \frac{A_4 V_4}{v_4} \quad (c)$$

و

$$\begin{aligned} A_4 &= \frac{(50 \text{ lbm/min})(1.257 \text{ ft}^3/\text{lbm})}{(20 \text{ ft/s})(60 \text{ s/min})} \\ &= 0.05238 \text{ ft}^2 \quad (48.66 \text{ cm}^2) \end{aligned}$$

با فرض یک لوله مدور در خروج

$$A_4 = \frac{\pi d_4^2}{4}$$



و

$$d_4 = 0.258 \text{ ft} = 3.10 \text{ in} \quad (7.87 \text{ cm})$$

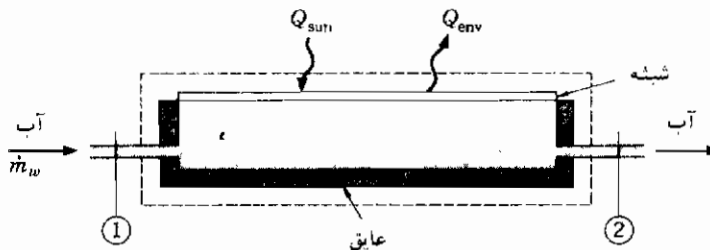
## مثال ۴-۱۳ آب گرمکن خورشیدی

یک آب گرم کن ساده خورشیدی با جمع کردن انرژی خورشید در دستگاهی که مطابق شکل با شیشه پوشانده شده است، جهت گرمایش آب از  $30^\circ\text{C}$  تا  $90^\circ\text{C}$  طرح شده است. تابش خورشید با طول موج کوتاه از شیشه گذشته در داخل محبوس می گردد. قسمت زیرین دستگاه عایق است، اما انرژی می تواند از شیشه بالایی به خارج تابش کند که مقدار آن برای این دماها در حدود  $200 \text{ W/m}^2$  می باشد. تابش خورشید در یک روز آفتابی حدود  $1000 \text{ W/m}^2$  می باشد. مساحت سطح لازم جهت گرمایش آب را حساب نموده آن را بر حسب  $\text{m}^2/\text{s/liter}$  بیان کنید. چند فوت مربع لازم است تا جریان آب داغی برابر با  $10 \text{ gal/min}$  تولید شود؟

**حل:** حجم کنترل برای این مسأله در شکل به وسیله خط چین نشان داده شده و موازنه انرژی به صورت زیر در می آید:

$$\dot{m}_2 h_1 + Q_{sun} = \dot{m}_w h_2 + Q_{env} \quad (a)$$

که  $Q_{sun} = 1000 \text{ W/m}^2$  و  $Q_{env} = 200 \text{ W/m}^2$  قسمت زیرین دستگاه عایق است، بنابراین



شکل مثال ۴-۱۳

انرژیهای دیگر انتقال نمی‌یابد. می‌توانیم انتالپیهای آب را از جداول اشباع مایع در  $30^{\circ}\text{C}$  و  $90^{\circ}\text{C}$  به دست آوریم. اما راه آسان‌تر این است که بدانیم در این حدود تغییرات مقدار  $c_p$  برای مایع تقریباً مقدار ثابت  $1 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}$  می‌باشد، بنابراین با تقریب خوب داریم

$$\begin{aligned} h_2 - h_1 &= c_p(T_2 - T_1) = (1.0 \text{ kcal}^{\circ}\text{C})(90 - 30) \\ &= 60 \text{ kcal/kg} = 2.51 \times 10^5 \text{ J/kg} \end{aligned} \quad (b)$$

در دمای متوسط  $140^{\circ}\text{F} = 60^{\circ}\text{C}$  حجم مخصوص مایع اشباع از جدول A-VM مقدار  $1.0172 \text{ cm}^3/\text{g}$  به دست می‌آید یا

$$\nu = 1.0172 \text{ liters/kg} \quad (c)$$

حالا می‌توانیم شدت جریان آب را از معادله (a) محاسبه کنیم:

$$\dot{m}_w (h_2 - h_1) = Q_{\text{sun}} - Q_{\text{env}} \quad (d)$$

$$\dot{m}_w = \frac{(1000 - 200) \text{ W/m}^2}{2.51 \times 10^5 \text{ J/kg}} = 3.187 \times 10^{-3} \text{ kg/s.m}^2$$

با تبدیل به لیتر از رابطه (c)، به صورت زیر درمی‌آید:

$$\dot{m}_w = 3.235 \times 10^{-3} \text{ liter/s.m}^2$$

عکس این مقدار کمیتی است که ما در جستجویش هستیم، یا

$$\text{سطح لازم} = 309.1 \text{ m}^2.\text{s/liter} \quad (e)$$

برای تهیه جریان آب داغ به مقدار  $10 \text{ gal/min}$  ( $1 \text{ gal} = 231 \text{ in}^3$ )، خواهیم داشت

$$\dot{m}_w = 2310 \text{ in}^3/\text{min} = 37.85 \text{ liters/min} = 0.6309 \text{ liter/s}$$

با به کار بردن رابطه (e)، مقدار مساحت برابر است با:

$$A = (309.1 \text{ m}^2 \cdot \text{s/liter})(0.6309 \text{ liter/s}) = 195 \text{ m}^2 \\ = 2099 \text{ ft}^2$$

## مثال ۴-۱۴ انبساط آزاد

هوا در  $750 \text{ kPa}$  و  $200^\circ \text{C}$  در یک سیلندر - پیستون همانند شکل همراه وجود دارد. سیلندر کاملاً عایق است. موانعی بر روی سیلندر، پیستون را در موقعیت خود نگاه می‌دارد. سیستم به وسیله هوای محیط در  $20^\circ \text{C}$  احاطه شده و پیستون هادی حرارت نیست. موانع برداشته می‌شود پیستون به طور ناگهانی تا موقعیت جدید که  $v_2 = 1/5 v_1$  است، منبسط می‌گردد. سیلندر - پیستون بدون اصطکاک است. دما و فشار نهایی هوا را محاسبه کنید.

**حل:** هوا را به عنوان سیستم در نظر گرفته و قانون اول را به صورت زیر می‌نویسیم:

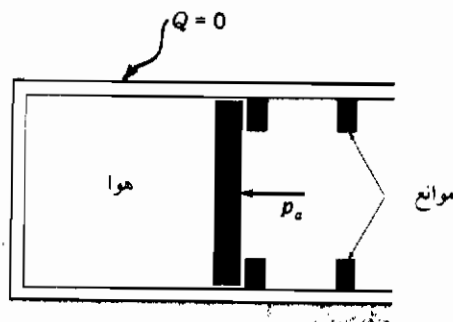
$$Q + W = \Delta U$$

چون سیلندر عایق است  $Q = 0$ ، داریم

$$W = \Delta U$$

یا برای واحد جرم

$$W = \Delta U = c_v(T_2 - T_1)$$



شکل مثال ۴-۱۴

اگر بتوانیم کار را محاسبه کنیم، آنگاه می‌توانیم مقدار  $T_2$  را محاسبه کنیم. نیاز است که فرآیند را مشخص نموده در یابیم که:

فرآیند حجم ثابت نیست.

فرآیند فشار ثابت نیست.

فرآیند دما ثابت (ایزوترمال) نیست.

فرآیند آدیاباتیک است ( $Q = 0$ ) اما الزاماً شبه تعادلی نمی‌باشد، زیرا سیستم ممکن نیست که برای یک انبساط ناگهانی در حالت تعادل باقی بماند.

می‌توان دید که تنها کار در مرز جابه‌جا کردن محیط می‌باشد که در ۱ atm باقی می‌ماند. برای واحد جرم کار انجام شده بر روی هوا در سیلندر برابر است با:

$$W = - \int p(1 \text{ atm}) dv = p(1 \text{ atm})(v_1 - v_2) \quad (b)$$

حجم مخصوص ابتدایی از معادله گاز ایده‌آل محاسبه می‌شود.

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{(287 \text{ J/kg}\cdot\text{K})(200 + 273)}{1.013 \times 10^5} = 1.34 \text{ m}^3/\text{kg}$$

و حجم مخصوص نهایی برابر است با

$$v_2 = 1.5v_1 = (1.5)(1.34) = 2.01 \text{ m}^3/\text{kg}$$

از معادله (b) کار به‌ازای واحد جرم برابر است با:

$$W = (1.0132 \times 10^5)(1.34 - 2.01) = -67880 \text{ J/kg}$$

با جایگزینی این مقدار در معادله (a) و با  $c_v = 718 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$  داریم:

$$-67880 = (718)(T_2 - 200)$$

$$T_2 = 105.4^\circ\text{C} = 378 \text{ K}$$

جالب است که این مقدار را با مقدار مربوط به فرآیند آدیاباتیک و شبه ساکن مقایسه نماییم. اگر معادله (۴-۴۰) را با  $n = \gamma = 1.4$  به کار ببریم داریم

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{1}{1.5}\right)^{0.4} = 0.874$$

و

$$T_2 = (0.874)(473) = 413 \text{ K}$$

که اساساً مقدار متفاوتی از  $378 \text{ K}$  به دست آمده در بالاست.

فشار نهایی از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$R = \frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} \quad (c)$$

$$p_2 = (750) \left(\frac{1}{1.5}\right) \left(\frac{378}{473}\right) = 400 \text{ kPa}$$

اگر فرآیند شبه ساکن می بود می توانستیم از رابطه زیر استفاده کنیم.

$$p_1 v_1^\gamma = p_2 v_2^\gamma$$

و

$$p_2 = (750) \left(\frac{1}{1.5}\right)^{1.4} = 425 \text{ kPa}$$

توضیح - در این مسأله از تعریف اصلی کار به صورت تغییر مکان نیروی اعمال شده در مرز سیستم استفاده کرده ایم.

#### ۴-۷ فرآیند خفگی<sup>۱</sup> (اختناقی) و ضریب ژول - تامسون<sup>۲</sup>

جریان نشان داده شده در شکل ۴-۵ را در نظر بگیرید. یک گاز واقعی از میان لوله ای با سطح

1- Throttling process

2- Joule - Thomson coefficient

مقطع ثابت جریان پیدا می‌کند. بین مقاطع ۱ و ۲ یک مانع متخلخل تعبیه شده تا افت فشار مطلوب در جریان را باعث گردد. فرآیند یک فرآیند خفگی یا اختناقی نامیده می‌شود و اگر از تغییرات انرژیهای جنبشی و پتانسیل صرف‌نظر کنیم، معادله انرژی جریان دائم برای یک فرآیند آدیاباتیک به صورت زیر خلاصه می‌شود.

$$h_1 = h_2$$

اگرچه انتالپیها در مقاطع ۱ و ۲ برای شرایط داده شده برابر است، انتالپی جریان ممکن است در حین عبور سیال از میان تویی متخلخل<sup>۱</sup> تغییر کلی کند. این تغییر بستگی به اندازه و تخلخل تویی و مقاومت اصطکاکی وارده بر سیال خواهد داشت. احتیاج نیست که فرآیند خفگی در تویی متخلخل اتفاق بیافتد. می‌توان آن را در شیر به صورت یک انبساط آدیاباتیک سیال نیز دید، اگر از انرژیهای جنبشی ورودی و خروجی صرف‌نظر کنیم. اگر انرژیهای جنبشی به اندازه‌ای بزرگ باشد که در بررسی در نظر گرفته شود، باید معادله کامل انرژی مورد استفاده قرار گیرد و اصطلاح خفگی دیگر به کار نمی‌رود.

اگر اطلاعات تجربی برای گازهای حقیقی بر روی نمودار  $T-p$  رسم گردد، منحنیهای شبیه به آنهایی که در شکل ۴-۶ می‌باشد نتیجه خواهد شد. مکان هندسی نقاط ماکزیمم در منحنیهای انتالپی ثابت منحنی معکوس<sup>۲</sup> نامیده می‌شود و نقطه ماکزیمم در هر منحنی نقطه معکوس<sup>۳</sup> نامیده می‌شود. شیب یک منحنی انتالپی ثابت<sup>۴</sup> (ایزنتالپیک) ضریب ژول = تامسون  $\mu_T$  نامیده می‌شود.

$$\mu_T = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \quad (4-17)$$

همچنان که در فصل ۶ نشان می‌دهیم و در فصل ۲ فرض شده است، انتالپی برای یک گاز ایده‌آل فقط تابعی از دما است. بنابراین برای یک گاز ایده‌آل، یک خط انتالپی ثابت، خط دما ثابت نیز خواهد بود. پس:

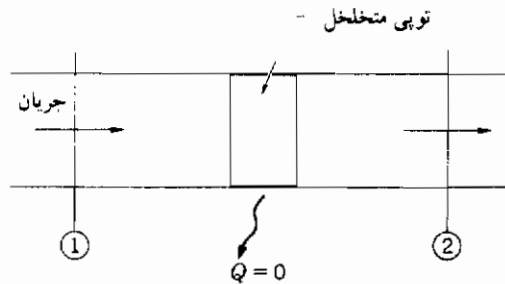
$$\mu_T = 0 \quad \text{برای یک گاز ایده‌آل} \quad (4-18)$$

1- Porous plug

2- Inversion curve

3- Inversion point

4- Isenthalpic curve



شکل ۴-۵ فرآیند خفگی از میان یک تویی متخلخل

اهمیت ضریب ژول - تامسون این است که می توان آن را با آزمایش اندازه گیری نمود و در نتیجه، برای محاسبه خواص ترمودینامیکی مورد توجه دیگر، به کار برد. موضوع محاسبه خواص به طور مفصل تر در فصل ۶ پیگیری خواهد شد، اما در این مرحله فایده آزمایش ژول - تامسون نشان داده می شود. اگر فرض کنیم که انتالپی می تواند به صورت تابعی از دو متغیر غیروابسته  $p$  و  $T$  بیان شود، از روابط دیفرانسیل نسبی داریم:

$$dh = \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T dp + \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT \quad (۴-۱۹)$$

با ارائه تعریف  $c_p$  داریم:

$$dh = \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T dp + c_p dT \quad (۴-۲۰)$$

برای فرآیند خفگی آدیاباتیک  $dh = 0$  و معادله (۴-۲۰) می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$0 = \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_h + c_p \quad \text{یا}$$

$$c_p = - \frac{1}{\mu_J} \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T \quad (۴-۲۱)$$

ضریب دمای ثابت بر طبق رابطه زیر تعریف می شود:

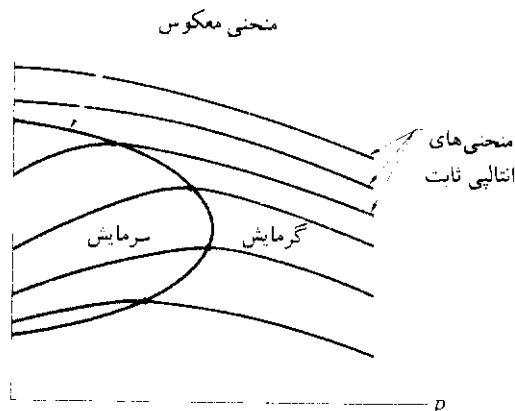
$$\mu_T = \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T \quad (۴-۲۲)$$

مقدار این ضریب به آسانی با اجرای آزمایش تویی متخلخل در دمای ثابت برای فشارهای متفاوت اندازه گیری می شود. حرارت داده شده یا گرفته شده از سطح مقطع ثابت (مثلاً بوسیله یک گرمکن الکتریکی) معرف تغییر انتالپی گاز می باشد، چون برای این فرآیند:

$$d'Q = dh$$

(تغییری در انرژی جنبشی وجود ندارد،  $W = 0$ ). موقعی که  $\mu_f$  و  $\mu_T$  تعیین شد، گرماهای ویژه فشار ثابت را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$c_p = - \frac{\mu_T}{\mu_f} \quad (4-23)$$



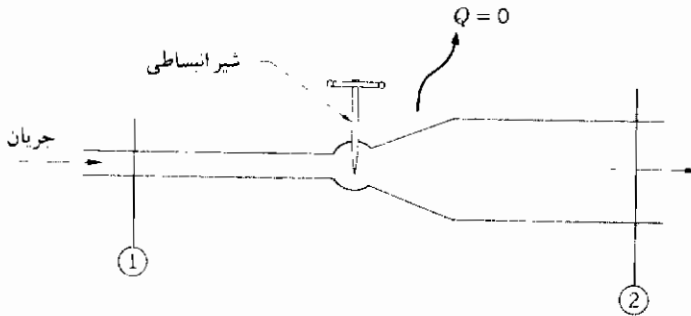
شکل ۴-۶ نقاط معکوس برای آزمایش تویی متخلخل ۴-۵

دانستن گرماهای ویژه همان طوری که در فصل ۶ خواهیم دید یک موضوع حیاتی در محاسبه خواص ترمودینامیکی است.

## مثال ۴-۱۵ خفگی فریون ۱۲

فریون ۱۲ در یک شیر انبساطی از مایع اشباع در  $150^\circ\text{F}$  به دمای  $40^\circ\text{F}$  منبسط می شود. کیفیت بخار فریون را بعد از این فرآیند خفگی، محاسبه کنید.





شکل مثال ۴-۱۵

**حل :** طرحواره این فرآیند در شکل همراه نشان داده می‌شود. برای فرآیند خفگی آدیاباتیک داریم:

$$h_1 = h_2$$

از جدول فریون (جدول A-۱۵) داریم:

$$h_1 = 43.850 \text{ Btu/lbm} \quad \text{مایع اشباع در } 150^\circ\text{F}$$

از این مقدار برای محاسبه کیفیت در خروجی ( $40^\circ\text{F}$ ) استفاده می‌شود.

$$h_2 = h_1 = h_{f2} + x_2 h_{fg2}$$

یا

$$43.85 = 17.273 + x_2(64.163)$$

و

$$x_2 = 0.414$$

همچنان که در فصل ۹ خواهیم دید، این فرآیند به‌طور گسترده در سیستمهای تبرید و تهویه مطبوع به‌کار می‌رود.

## خودآزمایی (سؤالات مروری)

- ۱ - چه تفاوتی بین سیستمهای باز و بسته وجود دارد؟
- ۲ - جریان دائم با حالت دائم چه فرقی دارد؟
- ۳ - منظور از کار جریان چیست؟
- ۴ - چرا تابع انتالپی در تحلیل سیستمهای باز با ارزش است؟
- ۵ - گاز ایده آل چیست؟
- ۶ - برای تشریح یک فرآیند آدیاباتیک نیمه ساکن گاز ایده آل چه معادله ای به کار می رود؟
- ۷ - فرآیند خفگی چیست؟ تحت چه شرایطی انتالپی در ورود و خروج با هم مساوی است؟
- ۸ - چرا منطقی است که فرآیند انبساطی در یک شیوره را به صورت آدیاباتیک فرض نمود؟
- ۹ - در مثال ۴-۳ بخار آب از یک منبع در  $500^{\circ}\text{F}$  به مخزن وارد می شود. مخزن عایق است، بنابراین حرارتی اضافه نمی گردد. از دیاد دما به  $767^{\circ}\text{F}$  بدون حرارت اضافی یا کار خارجی را چگونه از نظر فیزیکی توضیح می دهید؟

## مسائل (آحاد انگلیسی)

- ۴-۱ ۱۰ lbm نیتروژن طوری متراکم می شود که انرژی داخلی آن به اندازه ۱۵۰ Btu افزایش می یابد، در حالی که ۲۰ Btu حرارت اضافه می شود. کاری را که به گاز داده می شود محاسبه کنید. فرض کنید که تراکم در یک سیستم بسته انجام می گیرد.
- ۴-۲ مسأله ۴-۱ را دوباره انجام دهید با فرض این که تراکم در یک سیستم باز جریان دائم اتفاق بیفتد.
- ۴-۳ در یک کمپرسور جریان دائم، اکسیژن از ۱۶ psia و  $120^{\circ}\text{F}$  تا فشار نهایی ۱۵۰ psia طی یک فرآیند آدیاباتیک شبه ساکن متراکم می شود. قدرت ورودی به کمپرسور را برای دبی جریان ۱/۳ lbm/s محاسبه کنید.
- ۴-۴ مخزن صُلبی محتوی هوا در  $100^{\circ}\text{F}$  و ۷۵ psia می باشد. شیری در پهلوی مخزن باز می شود و هوا به آرامی خارج می گردد تا فشار به ۲۵ psia کاهش یابد. اگر دمای هوا در مخزن در حین این فرآیند آهسته ثابت باقی بماند، انتقال حرارت بین مخزن و محیط را

- محاسبه کنید. حجم مخزن  $5/1 \text{ ft}^3$  می باشد.
- ۴-۵ مخزنی با حجم  $5/2 \text{ ft}^3$  محتوی هوا در  $5 \text{ psia}$  و  $70^\circ \text{F}$  می باشد و در هوای محیط در  $14/7 \text{ psia}$  و  $70^\circ \text{F}$  قرار دارد. شیری در پهلوی مخزن باز می شود تا هوای محیط به آهستگی وارد مخزن شود. فرآیند به قدر کافی آهسته است تا دمای مخزن در  $70^\circ \text{F}$  ثابت بماند. انتقال حرارت بین مخزن و محیط را اگر فشار مخزن به  $14/7 \text{ psia}$  برسد محاسبه کنید.
- ۴-۶ یک گرمکن الکتریکی به ظرفیت  $1 \text{ kW}$  در یک ظرف به حجم  $100 \text{ ft}^3$  که با هوا در  $14/7 \text{ psia}$  و  $70^\circ \text{F}$  پر شده است، تعیبه می شود. گرمکن برای  $10 \text{ min}$  کار می کند و مخزن عایق است. دما و فشار هوا را در پایان این زمان محاسبه کنید.
- ۴-۷ هوا در یک توربین با فرآیند آدیاباتیک شبه ساکن از  $50 \text{ psia}$  و  $1000^\circ \text{F}$  تا فشار  $15 \text{ psia}$  جریان می یابد. سرعت ورودی برابر با  $100 \text{ ft/s}$  می باشد و سرعت خروجی  $1000 \text{ ft/s}$  است. کار خروجی توربین به ازای هر پوند هوا را محاسبه کنید.
- ۴-۸ کار لازم برای پمپ کردن  $10 \text{ gal/min}$  آب را از  $25 \text{ psia}$  و  $100^\circ \text{F}$  تا  $1200 \text{ psia}$  طی یک فرآیند آدیاباتیک محاسبه کنید.
- ۴-۹  $1 \text{ lbm}$  بخار آب اشباع در  $100 \text{ psia}$  تا  $500^\circ \text{F}$  در یک فرآیند فشار ثابت حرارت داده می شود. حرارت اضافه شده را در حالات زیر محاسبه کنید.
- (الف) یک فرآیند غیرجریانی که بخار آب در پشت یک پیستون در داخل سیلندر قرار دارد.
- (ب) یک فرآیند جریان دائم بدون کار خارجی.
- ۴-۱۰ مسأله ۴-۹ را برای یک فرآیند حجم ثابت دوباره انجام دهید. فشار نهایی بخار آب را محاسبه کنید.
- ۴-۱۱ در نیروگاه کوچکی در جنوب تگزاس، یک توربین بخار آدیاباتیک،  $20000 \text{ kW}$  توان تولید می کند. بخار آب در  $500 \text{ psia}$  و  $700^\circ \text{F}$  وارد توربین شده و در  $1 \text{ atm}$  و کیفیت ۹۷ درصد تخلیه می شود. نرخ جریان بخار لازم را محاسبه کنید.
- ۴-۱۲ توربو کمپرسور بزرگی هوا را در  $1 \text{ atm}$  و  $100^\circ \text{F}$  می گیرد و طی یک فرآیند جریان دائم آدیاباتیک و شبه ساکنی تا  $75 \text{ psia}$  متراکم می کند. قدرت ورودی به کمپرسور

۵۰۰۰ hp است. دبی حجمی هوا در ورود را بر حسب  $\text{ft}^3/\text{s}$  محاسبه کنید.

۴-۱۳ بخار آب از  $300 \text{ psia}$  به  $14/7 \text{ psia}$  و  $260^\circ\text{F}$  طی فرآیند خفگی منبسط می‌شود.

کیفیت بخار آب را در شرایط  $300 \text{ psia}$  محاسبه کنید.

۴-۱۴ بخار اشباع فریون ۱۲ در  $40^\circ\text{F}$  وارد یک کمپرسور با جریان دائم می‌شود. شرایط

خروجی  $250 \text{ psia}$  و  $200^\circ\text{F}$  و فرآیند آدیاباتیک فرض می‌شود. در صورتی که نرخ

جریان فریون برابر با  $10 \text{ lbm/min}$  باشد، اسب بخار لازم را محاسبه کنید. لوله ورودی

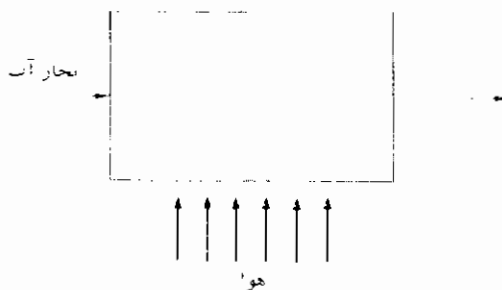
به کمپرسور اگر سرعت ورودی از  $15 \text{ ft/s}$  تجاوز نکند، چه قطری لازم دارد؟

۴-۱۵ یک مبدل حرارتی مطابق شکل همراه طرح می‌گردد. بخار آب در  $20 \text{ psia}$  و  $300^\circ\text{F}$

استفاده می‌شود تا هوا را از  $40^\circ\text{F}$  تا  $85^\circ\text{F}$  حرارت دهد. دبی بخار آب لازم جهت حرارت

دادن  $100 \text{ lbm/min}$  هوا را با شرایط خروجی بخار در  $20 \text{ psia}$  و کیفیت ۷۵ درصد

محاسبه کنید.



شکل مسأله ۴-۱۵

۴-۱۶ یک مخزن صلب به حجم  $15 \text{ ft}^3$  کاملاً خالی و عایق می‌باشد. شیری در پهلوی مخزن باز

می‌شود و هوای اتمسفر محل در  $14/7 \text{ psia}$  و  $70^\circ\text{F}$  وارد مخزن می‌شود. هنگامی که

فشار مخزن به  $14/7 \text{ psia}$  می‌رسد، شیر بسته می‌شود. مقدار هوای وارده به مخزن را

محاسبه کنید.

۴-۱۷ بخار آب پر فشار در  $800 \text{ psia}$  و  $1000^\circ\text{F}$  با سرعت  $500 \text{ ft/s}$  به یک توربین

آدیاباتیک تحویل داده می‌شود. تخلیه از توربین در  $40 \text{ psia}$  و  $500^\circ\text{F}$  با سرعت

- ۴-۱۸ بخار اشباع (بخار آب) در یک مخزن در فشار ۸۰ psia می باشد. مقدار حرارتی که باید خارج گردد تا کیفیت به ۵۰ درصد کاهش یابد محاسبه کنید. همچنین فشار نهایی برای این فرآیند را محاسبه کنید.
- ۴-۱۹ یک مخزن به حجم  $10 \text{ ft}^3$  محتوی هوا در  $14/7 \text{ psia}$  و  $70^\circ\text{F}$  می باشد. یک خط لوله پرفشار به مخزن متصل می باشد تا فشار به  $300 \text{ psia}$  برسد. با فرض این که مخزن و شیر اتصال آدیاباتیک باشد، دمای نهایی در مخزن را محاسبه کنید، اگر شرایط در خط لوله پرفشار در  $300 \text{ psia}$  و  $100^\circ\text{F}$  ثابت باقی بماند. چه مقدار سرمایش باید به مخزن داده شود تا دما در  $70^\circ\text{F}$  ثابت باقی بماند.
- ۴-۲۰ در یک گرمکن باز آب ورودی در یک نیروگاه بخار، بخار اشباع در  $100 \text{ psia}$  با مایع مادون سرد  $80^\circ\text{F}$  و  $100 \text{ psia}$  مخلوط می شود. بخار آب درست به اندازه کافی تهیه می شود تا مخلوط بخار آب از گرمکن به صورت مایع اشباع در  $100 \text{ psia}$  خارج شود. با فرض این که گرمکن جعبه ای است که کاملاً نسبت به محیط عایق است و فرآیند جریان دائم می باشد، نرخ جریان بخار لازم به ازای هر پوند مایع مادون سرد ورودی را محاسبه کنید.
- ۴-۲۱  $5 \text{ lbm/min}$  بخار آب در  $100 \text{ psia}$  و  $500^\circ\text{F}$  با  $10 \text{ lbm/min}$  بخار آب در  $100 \text{ psia}$  و ۵۰ درصد کیفیت در یک دستگاه جریان دائم آدیاباتیک مخلوط می شود. دما یا کیفیت مخلوط خروجی را محاسبه کنید.
- ۴-۲۲ بخار آب اشباع در  $60 \text{ psia}$  وارد لوله عایق کوچکی می شود. به علت مقاومت اصطکاکی در لوله، فشار بخار آب در طول نسبتاً کافی لوله تا  $45 \text{ psia}$  کاهش می یابد. دمای بخار آب را هنگامی که فشار به  $45 \text{ psia}$  می رسد محاسبه کنید.
- ۴-۲۳ بخار آب در  $1000 \text{ psia}$  و  $1000^\circ\text{F}$  وارد توربینی می شود و در  $4 \text{ psia}$  و کیفیت ۹۷ درصد آن را ترک می کند. توربین آدیاباتیک است و قدرت خروجی برابر با  $25000 \text{ hp}$  می باشد. قطر خط ورودی را محاسبه کنید اگر سرعت ورودی  $80 \text{ ft/s}$  باشد.
- ۴-۲۴ یک توربین بخار آدیاباتیک بوده و بخار آب را در  $700 \text{ psia}$  و  $900^\circ\text{F}$  با سرعت  $100 \text{ ft/s}$  دریافت می کند. تخلیه در فشار  $14/7 \text{ psia}$  و  $300^\circ\text{F}$  با سرعت  $500 \text{ ft/s}$

صورت می‌گیرد. دبی جریان لازم را جهت تولید قدرت خروجی ۱۵ MW محاسبه کنید. یک مخزن عایق  $15 \text{ ft}^3$  شامل هلیوم در  $500 \text{ psia}$  و  $400^\circ\text{F}$  می‌باشد. شیری در پهلوی مخزن باز می‌شود و هلیوم تا زمانی که فشار به  $100 \text{ psia}$  کاهش یابد خارج می‌گردد. در این لحظه شیر بسته می‌شود. تغییر انرژی کلی داخل مخزن را محاسبه کنید. فرضیاتی را که فکر می‌کنید لازم است مشخص نمایید.

۴-۲۵

اسب بخار یک موتور جت می‌تواند به‌طور تقریبی برحسب انرژی هوایی که از آن عبور می‌کند، محاسبه شود. اگر گازهای خروجی دارای خواص مشابه با هوا باشد و گاز ایده‌آل در نظر گرفته شود، دبی هوای لازم جهت تولید  $15000 \text{ hp}$  را تحت شرایط زیر محاسبه کنید.

۴-۲۶

دمای هوای ورودی  $= 50^\circ\text{F}$ .

سرعت هوای ورودی  $= 700 \text{ ft/s}$ .

دمای هوای خروجی  $= 2000^\circ\text{F}$ .

سرعت هوای خروجی  $= 1000 \text{ ft/s}$ .

همچنین سطح مقطع لازم برای جریان ورودی در فشار  $3 \text{ psia}$  را محاسبه کنید.

یک بادبزن به قدرت  $5 \text{ hp}$  در داخل یک جعبه به حجم  $100 \text{ ft}^3$  که از هوا در  $14/7$   $\text{psia}$  و  $70^\circ\text{F}$  پر شده، تعبیه می‌شود. جعبه کاملاً عایق است و بادبزن برای مدت ۱۰ دقیقه کار می‌کند. دما و فشار نهایی هوا را محاسبه کنید.

۴-۲۷

مقدار حرارتی را که جهت رسیدن به دمای نهایی  $110^\circ\text{F}$  باید از جعبه مسأله ۴-۲۷ خارج شود محاسبه کنید.

۴-۲۸

$1 \text{ lbm}$  از یک سوخت گازی با  $50 \text{ lbm}$  هوا در فرآیند جریان دائم فشار ثابت محترق می‌شود. انرژی شیمیایی سوخت برابر  $24000 \text{ Btu/lbm}$  است و سوخت و هوا تماماً در  $70^\circ\text{F}$  و با سرعت ناچیزی وارد مشعل می‌شود. می‌توان فرض کرد محصولات احتراق دارای خواصی مشابه با هوا باشد. با فرض رفتار گاز ایده‌آل و مشعل عایق، دمای گازهای خروجی را محاسبه کنید. برای این محاسبه انتالپی هوا و سوخت ورودی را در  $70^\circ\text{F}$  برابر صفر در نظر بگیرید.

۴-۲۹

- ۴-۳۰ مبدل حرارتی طوری طراحی شده تا آب مایع را طی فرآیند جریان دائم فشار ثابتی از  $100^\circ\text{F}$  و  $50\text{ psia}$  تا شرایط داغ  $400^\circ\text{F}$  حرارت دهد. حرارت دادن به وسیله سرمایش هوای گرم از  $800^\circ\text{F}$  تا  $600^\circ\text{F}$  طی فرآیند جریان دائم صورت می گیرد. دبی جرمی هوای مورد لزوم را برای دبی جرمی آب  $2/2\text{ lbm/s}$  محاسبه کنید.
- ۴-۳۱ گرمکن هوایی طوری طراحی می شود که  $5\text{ lbm}$  هوا را در  $25\text{ psia}$  از  $40^\circ\text{F}$  تا  $100^\circ\text{F}$  به وسیله تقطیر بخار آب از  $20\text{ psia}$  و  $300^\circ\text{F}$  تا شرایط مایع اشباع در  $20\text{ psia}$  گرم کند. اندازه خط بخار آب ورودی لازم را اگر سرعت بخار آب ورودی  $16\text{ ft/s}$  باشد محاسبه کنید.
- ۴-۳۲ کویل برودتی در یک سیستم تهویه مطبوع طوری طرح می شود که  $60000\text{ Btu/h}$  را از  $1500\text{ ft}^3/\text{min}$  هوا در  $85^\circ\text{F}$  و  $14/7\text{ psia}$  خارج کند. سرمایش در یک مبدل حرارتی نظیر آنچه در مسئله ۴-۱۵ مشخص شده صورت می گیرد، با این تفاوت که فریون -۱۲ از شرایط مایع اشباع در  $40^\circ\text{F}$  به حالت داغ در  $43^\circ\text{F}$  در فشار ثابت تبخیر می شود. دبی جریان جرمی فریون لازم و دمای هوای خروجی را محاسبه کنید.
- ۴-۳۳ هوا در  $3\text{ psia}$  و  $30^\circ\text{F}$  با سرعت  $900\text{ ft/s}$  وارد پخش کن<sup>۱</sup> می شود. هوا از یک فرآیند آدیاباتیک شبه ساکن می گذرد تا سرعت به  $100\text{ ft/s}$  کاهش یابد. دما و فشار نهایی را محاسبه کنید.
- ۴-۳۴ اکسیژن در یک سیلندر - پیستون از  $23\text{ psia}$ ،  $100^\circ\text{F}$  تا  $85\text{ psia}$ ،  $200^\circ\text{F}$ ، متراکم می شود. اگر فرآیند شبه ساکن باشد کار انجام شده بر روی گاز و انتقال حرارت را محاسبه کنید.
- ۴-۳۵ آب اشباع در  $500^\circ\text{F}$  تا فشار اتمسفر تحت فرآیند خفگی قرار می گیرد. کیفیت نهایی را اگر اشباع باشد یا دمای نهایی را اگر بخار داغ باشد، محاسبه کنید. سرعت بخار آب را در حالت نهایی برای جریان با شدت  $1\text{ lbm/min}$  از میان لوله ای به قطر  $1\text{ in}$  محاسبه کنید.
- ۴-۳۶ مساحت ورودی و خروجی لازم در مسئله ۴-۳۳ را که یک جریان با شدت  $1\text{ lbm/s}$  را جادهد محاسبه کنید.

چه اسب بخاری لازم است تا ۱۰۰ gal/min آب مایع در ۷۰ °F را تا ارتفاع ۱۰۰ ft پمپ نماید؟ فرض کنید جریان دما ثابت است و از تغییر انرژی جنبشی می‌توان صرف‌نظر کرد.

۴-۳۷

نشان دهید که دبی جریان جرمی برای یک شیوره همانند مثال ۴-۹ به وسیله رابطه زیر داده می‌شود.

۴-۳۸

$$\dot{m}^2 = 2g_c A_2^2 \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_1^2}{RT_1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{2\gamma} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma+1)\gamma} \right]$$

در جایی که  $A_2$  سطح خروجی شیوره و  $V_1 \approx 0$ .

در قسمت سرمایش یک یخچال آمونیاکی، آمونیاک به صورت مایع اشباع ۰ °F وارد و به صورت بخار داغ در ۲۰ °F خارج می‌شود. درحین فرآیند جریان دائم، ۲۰ kW حرارت (سرمایش) به آمونیاک اضافه می‌شود. دبی آمونیاک را محاسبه کنید. کلیه فرضیات لازم را مشخص نمایید.

۴-۳۹

یک توربین جریان دائم از آرگون به عنوان سیال عامل استفاده کرده و توان ۱۰۰ kW تولید می‌نماید. شرایط ورودی ۱۰۰ psia و ۲۳۰ °F است و فشار خروجی برابر ۲۰ psia است. توربین ممکن است آدیاباتیک فرض شود. اگر سرعت خروجی برابر ۱۰۰ ft/s باشد، قطر لوله خروجی را محاسبه کنید. کلیه فرضیات لازم جهت حلّ مسأله را بیان کنید.

۴-۴۰

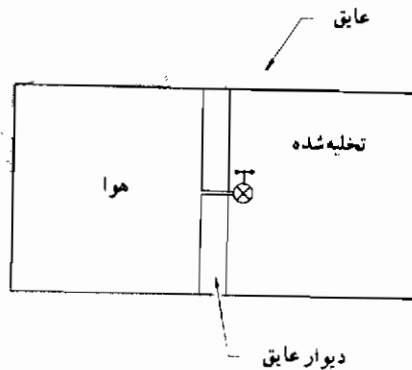
همان طوری که نشان داده شده دو محفظه به حجم ۱ ft<sup>3</sup> به وسیله یک دیوار غیرهادی حرارتی از هم جدا می‌شود، محفظه سمت چپ پر از هوا در ۱۰۰ psia و ۱۵۰ °F می‌باشد و محفظه سمت راست خالی است. یک شیر کوچک باز می‌شود و هوا از محفظه چپ به راست جریان می‌یابد. هنگامی که فشار در دو محفظه برابر شود شیر بسته می‌شود. فشار و دمای نهایی را برای هوا در هر محفظه حساب کنید. فرض‌های لازم جهت حلّ مسأله را مشخص نمایید.

۴-۴۱

مسأله ۴-۴۱ را برای حالتی که دیوار داخلی هادی حرارت است تکرار کنید، یعنی دما همیشه در دو طرف دیوار یکسان باشد. دوباره بدقت فرض‌های لازم را مشخص کنید.

۴-۴۲

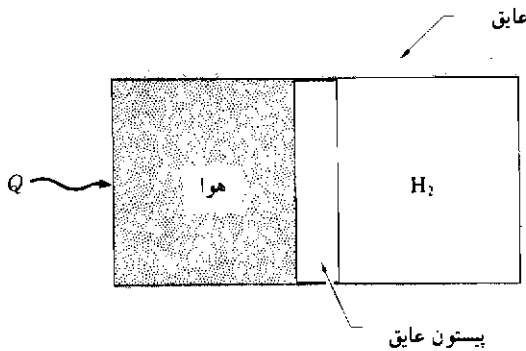




شکل مسأله ۴-۴۱

- ۴-۴۳ اکسیژن در  $30 \text{ atm}$  و  $50^\circ \text{C}$  در مخزنی به حجم  $10 \text{ m}^3$  وجود دارد. یک شیر بزرگ روی مخزن باز می شود و گاز ناگهان تخلیه می گردد تا فشار آن به  $15 \text{ atm}$  کاهش یابد. چه مقدار اکسیژن بر حسب  $\text{kg}$  تخلیه می شود؟
- ۴-۴۴ بخار آب در  $300 \text{ psia}$  و  $500^\circ \text{F}$  با سرعت  $500 \text{ ft/s}$  وارد یک شپوره مخصوص می شود. درحین یک فرآیند انبساط، بخار آب  $15 \text{ Btu/lbm}$  حرارت از دست می دهد و انتالپی به  $1200 \text{ Btu/lbm}$  افت می نماید. سرعت خروجی از شپوره چقدر است؟ برای  $2 \text{ lbm/s}$ ، چه سطح مقطع جریانی در ورود مورد احتیاج است؟
- ۴-۴۵ یک مخزن کوچک به حجم  $500 \text{ cm}^3$  محتوی فریون ۱۲ در حالت اشباع  $70^\circ \text{F}$  می باشد. فقط ۲۰ درصد مخزن از مایع پُر می باشد. یک شپوره کوچک در بالای قوطی برای پاشیدن فریون در اتاق در فشار اتمسفر به کار می رود. بعد از انقضای زمان پاشش دمای قوطی به  $50^\circ \text{F}$  کاهش می یابد و در این حالت مایع فقط ۱۰ درصد حجم قوطی را اشغال می کند. با فرض اینکه شپوره یک دستگاه خفه کننده آدیاباتیک باشد، چه مقدار انرژی در حین فرآیند تخلیه به قوطی اضافه می شود؟
- ۴-۴۶ سیستم نشان داده شده در شکل همراه را در نظر بگیرید. در ابتدا دو محفظه دارای حجم یکسان  $1 \text{ ft}^3$  است و به ترتیب محتوی هوا و هیدروژن می باشد. دو محفظه به وسیله یک

پیستون بدون اصطکاک که عایق است از هم جدا می شود. ابتدا هر دو گاز در فشار ۲۰ psia و دمای  $100^{\circ}\text{F}$  است. حرارت به طرف هوا داده می شود تا فشار دو گاز به ۴۰ psia برسد. تمام دیواره های محفظه به جز سطحی که به هوا حرارت داده می شود عایق است. دمای نهایی هوا را محاسبه کنید.



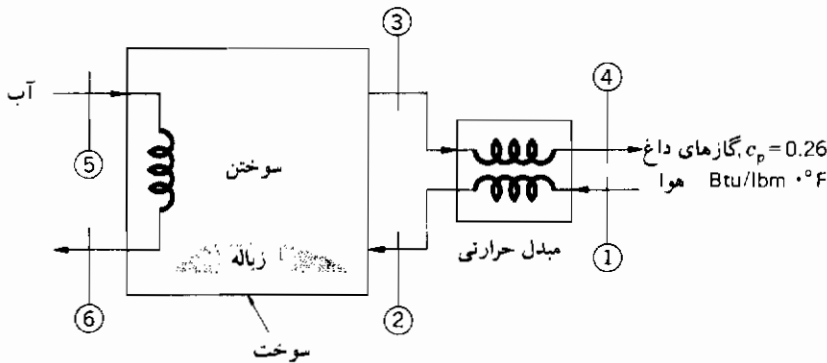
شکل مسأله ۴-۴۶

۴-۴۷ یک شیوره کوچک برای استفاده از آب مایع در  $100^{\circ}\text{F}$  ساخته می شود. فشار ورودی به شیوره ۱۰۰ psia و فشار تخلیه برابر فشار اتمسفر است. با فرض یک فرآیند آدیاباتیک سرعت خروجی را محاسبه کنید. برای سطح مقطع خروجی معادل  $0.5 \text{ in}^2$ ، دبی جریان را برحسب گالن در دقیقه به دست آورید.

۴-۴۸ پمپی با چه قدرت لازم است تا اختلاف فشار و دبی جریان در مسأله ۴-۴۷ را تولید نماید؟

۴-۴۹ یک آب گرمکن صنعتی<sup>۱</sup>، سوخت گازی با انرژی شیمیایی داخلی  $23000 \text{ Btu/lbm}$  را مصرف می کند. آب گرمکن طوری طرح می شود که ۱۸ lb هوا در  $70^{\circ}\text{F}$  و ۱ atm برای هر پوند سوخت تهیه شود و ۱۰ gal/min آب گرم  $180^{\circ}\text{F}$  از آب سرد  $60^{\circ}\text{F}$  تولید کند. گازهای گرم خروجی در دمای  $230^{\circ}\text{F}$  است. مقدار سوخت لازم را محاسبه کنید.

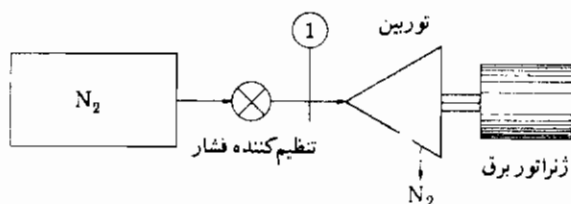
۴-۵۰ یک زباله‌سوز شهری<sup>۱</sup> برای سوزاندن زباله که دارای انرژی شیمیایی داخلی متوسط  $3000 \text{ Btu/lbm}$  است به کار می‌رود. گازهای داغ حاصل از فرآیند سوختن، برای گرم کردن اولیه هوا قبل از ورود به زباله‌سوز استفاده می‌شوند. ساختمان داخلی زباله‌سوز اجازه می‌دهد که به عنوان آب گرم‌کن فشار بالا برای یک نیروگاه مطابق با شکل نشان داده شده به کار رود. دماهای مربوطه بدین قرار است،  $T_3 = 1500^\circ\text{F}$ ،  $T_1 = 100^\circ\text{F}$ ،  $T_6 = 300^\circ\text{F}$  و  $T_5 = 95^\circ\text{F}$ ،  $T_4 = 400^\circ\text{F}$ . یک گازایده آل رفتار می‌کند و  $15 \text{ lbm}$  جهت سوختن یک پوند زباله یاهریوند از سوخت کمکی لازم است. سوخت کمکی دارای انرژی شیمیایی داخلی  $20000 \text{ Btu/lbm}$  می‌باشد و باید برای ایجاد دمای لازم جهت احتراق کامل به کار رود. برای حرارت دادن به  $3000 \text{ gal}$  آب چه مقدار انرژی کلی به صورت زباله و سوخت باید تهیه شود؟ اگر یک تن زباله برای گرمایش  $3000 \text{ gal}$  آب مهیا شود، چه مقدار سوخت کمکی لازم است؟



شکل مسأله ۴-۵۰

۴-۵۱ یک دستگاه کوچک مولد کمکی مانند شکل همراه طرح می‌شود. نیترژن در  $70^\circ\text{F}$  و  $2000 \text{ psia}$  در مخزن قرار دارد. این مخزن با یک شیر به توربین آدیاباتیک که ژنراتور برق را می‌چرخاند، متصل است. قدرت خروجی دستگاه  $75 \text{ W}$  می‌باشد و فشار در نقطه ۱ به وسیله یک رگولاتور (تنظیم) فشار که مانند یک المان خفگی عمل می‌کند،

فشار را در ۱۰۰ psia ثابت نگه می‌دارد. نیتروژن از توربین در فشار اتمسفر تخلیه می‌شود و فرآیند توربین آدیاباتیک فرض می‌شود. جهت تولید قدرت خروجی در یک ساعت، مخزن باید چه اندازه‌ای داشته باشد؟ فرض کنید که مخزن به‌طور دما ثابت در  $70^{\circ}\text{F}$  ثابت باقی می‌ماند و هنگامی که فشار مخزن به ۱۰۰ psia می‌رسد، تولید توان متوقف می‌گردد.



شکل مسأله ۴-۵۱

#### مسائل (آحاد متریک)

- ۴-۱M هوا در یک توربین آدیاباتیک و در طی فرآیند شبه ساکن از شرایط ۳۵۰ kPa و  $550^{\circ}\text{C}$  تا فشار ۱۰۰ kPa جریان می‌یابد. سرعت ورودی ۳۰ m/s می‌باشد و سرعت خروجی ۳۰۰ m/s است. کار خروجی توربین به‌ازای هر کیلوگرم هوا را محاسبه کنید.
- ۴-۲M کار لازم برای پمپ‌کردن ۴۰ liters/min آب از ۱۷۰ kPa و  $40^{\circ}\text{C}$  تا ۷/۵ MPa را طی یک فرآیند آدیاباتیک محاسبه کنید.
- ۴-۳M بخار آب طی یک فرآیند فشار ثابت از شرایط اشباع در ۷۰۰ kPa تا  $260^{\circ}\text{C}$  حرارت داده می‌شود. حرارت اضافه شده را در حالات زیر محاسبه کنید.
- الف) یک فرآیند غیرجریانی که بخار آب در پشت یک پیستون در داخل سیلندر قرار دارد ب) یک فرآیند جریان دائم بدون کار خارجی.
- ۴-۴M بخار اشباع (بخار آب) در یک مخزن در ۶۰۰ kPa می‌باشد. مقدار حرارتی را که باید خارج گردد تا کیفیت به ۵۰ درصد کاهش یابد، محاسبه کنید. همچنین فشار نهایی برای این فرآیند را محاسبه کنید.
- ۴-۵M یک خط لوله بزرگ بخار آب را در ۷۰۰ kPa و  $200^{\circ}\text{C}$  حمل می‌کند. این خط لوله از

طریق شیرخفگی به یک مخزن به حجم  $3 \text{ m}^3$  که کاملاً عایق و در ابتدا تخلیه شده است متصل می‌باشد. شیر باز می‌شود و بخار آب به مخزن وارد می‌شود تا فشار در مخزن به  $700 \text{ kPa}$  برسد، سپس شیر بسته می‌شود. مقدار جرم بخار آب وارده به مخزن را محاسبه کنید. فرض کنید که خط بخار یک منبع نامحدود از بخار آب باشد.

۴-۶M یک کمپرسور آدیاباتیک جریان دائم جهت تراکم کردن آرگون از  $100 \text{ kPa}$  و  $27^\circ\text{C}$  تا فشار  $1/2 \text{ MPa}$  مورد استفاده قرار می‌گیرد. کار لازم  $400 \text{ kW}$  است. اگر سرعت جریان ورودی  $10 \text{ m/s}$  باشد قطر خط جریان ورودی را محاسبه کنید.

۴-۷M آب با نرخ  $5 \text{ kg/s}$  در  $250 \text{ kPa}$  و  $40^\circ\text{C}$  با  $3 \text{ kg/s}$  بخار آب در  $250 \text{ kPa}$  و کیفیت  $80\%$  در یک فرآیند جریان دائم فشار ثابت مخلوط می‌شود. مخزنی که مخلوط شدن در آن صورت می‌گیرد عایق است. حالت جریان خروجی را تعیین کنید.

۴-۸M آرگون در شرایط  $1/2 \text{ MPa}$  و  $100^\circ\text{C}$  وارد یک توربین آدیاباتیک بدون اصطکاک شده و در فشار  $100 \text{ kPa}$  خارج می‌گردد. کار خروجی توربین  $400 \text{ kW}$  است. اگر سرعت جریان ورودی  $15 \text{ m/s}$  باشد قطر کانال جریان ورودی را محاسبه کنید. (فرض کنید کانال مدور باشد).

۴-۹M کویل برودتی در یک سیستم تهویه مطبوع طوری طرح می‌شود که  $18 \text{ kW}$  را از  $40,000 \text{ liters/min}$  هوا در  $30^\circ\text{C}$  و  $1 \text{ atm}$  خارج کند. سرمایش در یک مبدل حرارتی نظیر آنچه در سؤال ۴-۱۵M مشخص شده صورت می‌گیرد، با این تفاوت که فریون ۱۲ از شرایط مایع اشباع در  $40^\circ\text{F}$  به حالت داغ در  $44^\circ\text{F}$  در فشار ثابت تبخیر می‌شود. دبی جریان جرمی فریون لازم و دمای هوای خروجی را محاسبه کنید.

۴-۱۰M هوا در  $20 \text{ kPa}$  و  $35^\circ\text{C}$  با سرعت  $280 \text{ m/s}$  وارد پخش‌کن می‌شود. هوا طی یک فرآیند آدیاباتیک شبه ساکنی می‌گذرد تا سرعت به  $30 \text{ m/s}$  کاهش یابد. دما و فشار نهایی را محاسبه کنید.

۴-۱۱M مساحت ورودی و خروجی لازم در سؤال ۴-۱۰M را با دبی جریان  $1 \text{ kg/min}$  محاسبه کنید.

۴-۱۲M بخار آب بصورت بخار اشباع در  $400 \text{ kPa}$  وارد لوله عایق کوچکی می‌شود. به علت

مقاومت اصطکاکی در لوله، فشار بخار آب در طول نسبتاً کافی لوله تا  $300 \text{ kPa}$  کاهش می‌یابد. دمای بخار آب را هنگامی که فشار به  $300 \text{ kPa}$  می‌رسد محاسبه کنید.

۴-۱۳M

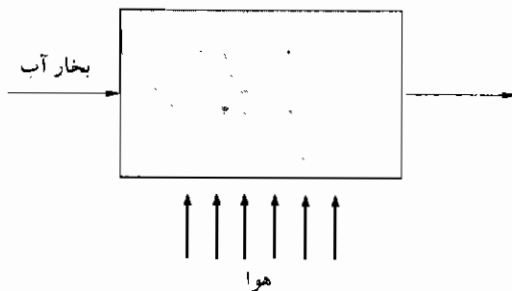
بخار آب از  $2 \text{ MPa}$  به  $100 \text{ kPa}$  و  $120^\circ \text{C}$  طی فرآیند خفگی منبسط می‌شود. کیفیت بخار آب را در شرایط  $2 \text{ MPa}$  محاسبه کنید.

۴-۱۴M

بخار فریون ۱۲ اشباع در  $40^\circ \text{F}$  وارد یک کمپرسور با جریان دائم می‌شود. شرایط خروجی  $250 \text{ psia}$  و  $200^\circ \text{F}$  و فرآیند آدیاباتیک فرض می‌شود. در صورتی که نرخ جریان فریون برابر با  $5 \text{ kg/min}$  باشد اسب بخار لازم را محاسبه کنید. اگر سرعت ورودی از  $5 \text{ m/s}$  تجاوز نکند، لوله ورودی به کمپرسور چه قطری لازم دارد؟

۴-۱۵M

یک مبدل حرارتی مطابق شکل همراه طرح می‌گردد. بخار آب  $150 \text{ kPa}$  و  $160^\circ \text{C}$  جهت گرمایش هوا از  $50^\circ \text{C}$  تا  $30^\circ \text{C}$  به کار رود. شدت جریان بخار آب لازم جهت حرارت دادن  $50 \text{ kg/min}$  هوا را با شرایط خروجی در  $150 \text{ kPa}$  و کیفیت ۷۵ درصد محاسبه کنید.



شکل مسأله ۴-۱۵M

یک بادبزن به قدرت  $350 \text{ W}$  در داخل یک جعبه به حجم  $3000 \text{ liters}$  که از هوا در  $20^\circ \text{C}$  و  $20 \text{ kPa}$  پر شده تعبیه می‌شود. جعبه کاملاً عایق است و بادبزن برای ۱۰ دقیقه کار می‌کند. دما و فشار نهایی هوا را محاسبه کنید.

۴-۱۶M

مقدار حرارتی را که جهت رسیدن به دمای نهایی  $45^\circ \text{C}$  باید از جعبه مسأله ۴-۱۶M

۴-۱۷M

خارج شود، محاسبه کنید.

۴-۱۸M چه قدرتی لازم است تا ۳۸۰ liters/min آب مایع در  $20^{\circ}\text{C}$  را تا ارتفاع ۳۰ m پمپ

نماید؟ فرض کنید جریان دما ثابت است و می توان از تغییر انرژی جنبشی صرف نظر کرد.

۴-۱۹M قدرت یک موتور جت می تواند به طور تقریبی برحسب انرژی هوایی که از آن عبور

می کند محاسبه شود. اگر گازهای خروجی دارای خواص مشابه با هوا باشد و گاز ایده آل در

نظر گرفته شود، دبی هوای لازم را جهت تولید ۱۰ MW تحت شرایط زیر محاسبه کنید.

$$\text{دمای هوای ورودی} = 45^{\circ}\text{C} -$$

$$\text{سرعت هوای ورودی} = 200 \text{ m/s}$$

$$\text{دمای هوای خروجی} = 1100^{\circ}\text{C}$$

$$\text{سرعت هوای خروجی} = 300 \text{ m/s}$$

همچنین سطح مقطع لازم برای جریان ورودی در فشار ۲۰ kPa را محاسبه کنید.

۴-۲۰M یک جریان سریع هلیوم در داخل یک کانال حرارت داده می شود. گاز در  $3^{\circ}\text{C}$ ، ۲۰ atm

و سرعت ۱۵۰ m/s وارد کانال می شود. درحین عبور از کانال، فشار به ۰/۱۵ atm و

سرعت به ۱۳۰ m/s کاهش می یابد. دمای خروجی گاز  $140^{\circ}\text{C}$  می باشد. برای جریان

جرمی ۱۰۰ g/s چقدر حرارت باید داده شود؟ برای شرایط داده شده، سطح مقطعی

جریان ورودی و خروجی چقدر است؟

۴-۲۱M هوا در فشار ۵ atm و  $30^{\circ}\text{C}$  برای چرخاندن یک توربین کوچک جهت قدرت دادن

به یک مته با دور بالا استفاده می شود. مته احتیاج به قدرت ورودی (۱ hp) ۷۴۶ W دارد

و می توان فرض کرد که هوا از توربین در ۱/۸ atm خارج می شود. اگر فرآیند توربین

آدیاباتیک شبه ساکن باشد، نرخ جریان هوای لازم را محاسبه کنید. اگر لوله هوای ورودی

۱ cm قطر داشته باشد، سرعت هوای ورودی را محاسبه کنید.

۴-۲۲M یک مخزن به حجم ۲۸۰ liters محتوی هوادر ۱۰۰ kPa و  $20^{\circ}\text{C}$  می باشد. یک خط

لوله پرفشاری به مخزن متصل می باشد تا فشار به ۲ MPa برسد. با فرض اینکه مخزن و شیر

اتصال آدیاباتیک باشد، دمای نهایی را در مخزن محاسبه کنید اگر شرایط در خط لوله پر

فشار در ۲ MPa و  $40^{\circ}\text{C}$  ثابت باقی بماند. چه مقدار سرمایش باید به مخزن داده شود تا

دما در  $20^{\circ}\text{C}$  ثابت باقی بماند؟

۴-۲۳M در یک گرمکن باز آب ورودی در یک نیروگاه بخار، بخار اشباع در  $700\text{ kPa}$  با مایع مادون سرد در  $25^{\circ}\text{C}$  و  $700\text{ kPa}$  مخلوط می شود. بخار آب به اندازه کافی تهیه می شود تا مخلوط بخار آب از گرمکن به صورت مایع اشباع در  $700\text{ kPa}$  خارج شود. با فرض اینکه گرمکن جعبه ای است که کاملاً نسبت به محیط عایق است و فرآیند جریان دائم می باشد، نرخ جریان بخار لازم به ازای هر کیلوگرم مایع مادون سرد ورودی را محاسبه کنید.

۴-۲۴M  $2\text{ kg/min}$  بخار آب در  $700\text{ kPa}$  و  $260^{\circ}\text{C}$  با  $4\text{ kg/min}$  بخار آب در  $700\text{ kPa}$  و کیفیت  $50\%$  در یک دستگاه جریان دائم آدیاباتیک مخلوط می شود. دما یا کیفیت مخلوط خروجی را محاسبه کنید.

۴-۲۵M  $3\text{ kg/s}$  بخار آب در  $200\text{ kPa}$  و کیفیت  $90\%$  در  $200\text{ kg/s}$  آب در  $100^{\circ}\text{C}$  و  $200\text{ kPa}$  طی فرآیند جریان دائم در فشار ثابت مخلوط می شود. مخزنی که این کار در آن صورت می گیرد کاملاً عایق است. حالت جریان خروجی را تعیین کنید.

۴-۲۶M  $5\text{ kg/s}$  آب مایع در  $300\text{ kPa}$  و  $50^{\circ}\text{C}$  با بخار آب در  $300\text{ kPa}$  و  $240^{\circ}\text{F}$  در یک فرآیند جریان دائم آدیاباتیک فشار ثابت مخلوط می شود و تولید جریان خروجی بخار در  $100^{\circ}\text{C}$  می کند. مقدار بخار آب لازم را محاسبه کنید.

۴-۲۷M هلیوم در  $1\text{ MPa}$  و  $150^{\circ}\text{C}$  با سرعت  $250\text{ m/s}$  وارد یک شیوره آدیاباتیک می شود و باید تا سرعت  $900\text{ m/s}$  منبسط شود. سطح مقطع جریان خروجی برای دبی جریان  $2/3\text{ kg/s}$  را محاسبه کنید.

۴-۲۸M یک کمپرسور آدیاباتیک جریان دائم برای تراکم کردن  $15\text{ g/s}$  آرگون از  $150\text{ kPa}$  و  $35^{\circ}\text{C}$  تا فشار نهایی  $1/5\text{ MPa}$  مورد استفاده قرار می گیرد. اگر فرآیند شبه ساکن باشد، کار لازم را محاسبه کنید.

۴-۲۹M هلیوم در سرعت پایین و شرایط  $500\text{ kPa}$  و  $200^{\circ}\text{C}$  وارد یک شیوره می شود. شیوره عایق است و هلیوم تا فشار خروجی  $100\text{ kPa}$  منبسط می شود. اگر دبی جریان  $0/56\text{ kg/s}$  باشد، قطر خروجی شیوره را محاسبه کنید.

۴-۳۰M بخار آب از شرایط  $700\text{ kPa}$  و رطوبت  $5\%$  در  $5\text{ kg/s}$  تا فشار  $100\text{ kPa}$  طی فرآیند

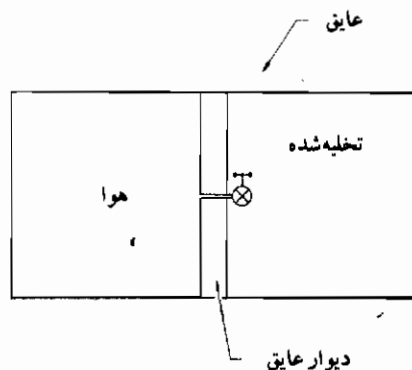


خفگی منبسط می‌شود. حالت نهایی بخار آب را تعیین کنید.

۴-۳۱M ۱ kg از یک سوخت گازی با  $50 \text{ kg}$  هوا در فرآیند جریان دائم فشار ثابت محترق می‌شود. انرژی شیمیایی سوخت برابر  $60 \text{ MJ/kg}$  است و سوخت و هوا تماماً در  $22^\circ\text{C}$  و با سرعت ناچیزی وارد مشعل می‌شود، می‌توان فرض کرد محصولات احتراق دارای خواص مشابهی با هوا باشد. با فرض رفتار گاز ایده آل و مشعل عایق، دمای گازهای خروجی را محاسبه کنید. برای این محاسبه انتالپی هوا و سوخت ورودی را در  $22^\circ\text{C}$  برابر صفر در نظر بگیرید.

۴-۳۲M یک شیبوره کوچک برای استفاده از آب مایع در  $40^\circ\text{C}$  ساخته می‌شود. فشار ورودی به شیبوره  $700 \text{ kPa}$  و فشار تخلیه  $100 \text{ kPa}$  می‌باشد. با فرض یک فرآیند آدیاباتیک سرعت خروجی را محاسبه کنید. برای سطح مقطع خروجی معادل  $3 \text{ cm}^2$  دبی جریان را بر حسب  $\text{liters/min}$  به دست آورید.

۴-۳۳M همان طوری که در شکل نشان داده شده، دو محفظه به حجم  $28 \text{ liters}$  به وسیله یک دیوار غیرهادی حرارتی مجزا شده است. در محفظه سمت چپ هوا در  $700 \text{ kPa}$  و  $65^\circ\text{C}$  و محفظه سمت راست خالی است. شیر کوچک باز می‌شود و هوا از محفظه چپ به راست جریان می‌یابد. هنگامی که فشارها در دو محفظه برابر می‌شود شیر بسته می‌شود. فشار و دمای نهایی را برای هوا در هر محفظه حساب کنید. فرضهای لازم جهت حل مسأله را مشخص نمایید.

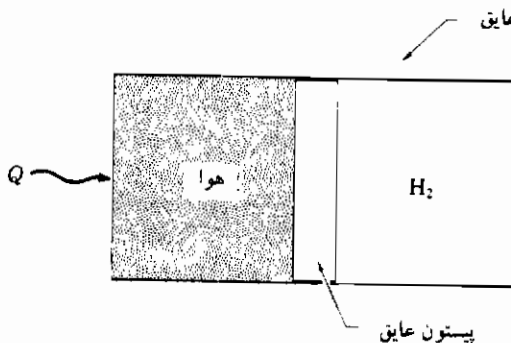


شکل مسأله ۴-۳۳M

۴-۳۴M اکسیژن در ۳ MPa و  $50^{\circ}\text{C}$  محتوای مخزنی به حجم  $10\text{ m}^3$  را تشکیل می‌دهد. یک شیر بزرگ روی مخزن باز می‌شود و گاز ناگهان تخلیه می‌گردد تا فشار آن به  $1/5\text{ MPa}$  کاهش یابد. چه مقدار اکسیژن برحسب kg تخلیه می‌شود؟

۴-۳۵M بخار آب در ۲ MPa و  $280^{\circ}\text{C}$  با سرعت  $150\text{ m/s}$  وارد یک شیبوره مخصوص می‌شود. در حین یک فرآیند انبساط، بخار آب  $35\text{ kJ/kg}$  حرارت از دست می‌دهد و انتالپی به مقدار  $2/8\text{ MJ/kg}$  کاهش می‌یابد. سرعت خروجی از شیبوره چه مقدار است؟ برای یک نرخ جریان  $1\text{ kg/s}$ ، چه سطح مقطع جریانی در ورود مورد احتیاج است؟

۴-۳۶M سیستم نشان داده شده در شکل همراه را در نظر بگیرید. در ابتدا دو محفظه دارای حجم یکسان  $28\text{ liters}$  و به ترتیب پر از هوا و هیدروژن است. دو محفظه به وسیله یک پیستون بدون اصطکاک که عایق می‌باشد از هم جدا می‌شود. ابتدا هر دو گاز در فشار  $140\text{ kPa}$  و  $40^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. حرارت به طرف هوا داده می‌شود تا فشار دو گاز به  $280\text{ kPa}$  برسد. تمام دیواره‌های محفظه به جز سطحی که از آن به هوا حرارت داده می‌شود، عایق است. دمای نهایی هوا را محاسبه کنید.



شکل مسأله ۴-۳۶M

۴-۳۷M مخزنی به حجم  $200\text{ liters}$  محتوی هوا در  $1\text{ MPa}$  و  $20^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. شیری در پهلوی مخزن باز می‌شود و هوا اجازه می‌یابد که به آهستگی خارج شود به طوری که دمای مخزن در  $20^{\circ}\text{C}$  ثابت باقی بماند. هنگامی که فشار به  $125\text{ kPa}$  می‌رسد، شیر بسته می‌شود. مقدار

حرارت جذب شده به وسیله مخزن را محاسبه کنید.

۴-۳۸M آب مایع در  $1 \text{ MPa}$  و  $20^\circ\text{C}$  با بخار آب در  $1 \text{ MPa}$  و کیفیت ۱۰۰ درصد مخلوط می شود تا آب داغ در  $120^\circ\text{C}$  تولید نماید. مخلوط شدن در یک فرآیند جریان دائم در داخل یک جعبه عایق صورت می گیرد. اگر دبی جریان آب ورودی در  $20^\circ\text{C}$ ،  $7/2 \text{ kg/s}$  باشد، مقدار بخار آب مورد لزوم را محاسبه کنید.

۴-۳۹M یک جریان سریع هلیوم در داخل یک کانال حرارت داده می شود. گاز در  $300 \text{ kPa}$  و  $20^\circ\text{C}$  و سرعت  $150 \text{ m/s}$  وارد کانال می شود. در حین عبور از کانال فشار به  $15 \text{ kPa}$  و سرعت به مقدار  $130 \text{ m/s}$  کاهش می یابد. دمای خروجی گاز  $140^\circ\text{C}$  می باشد. برای دبی جریان جرمی  $100 \text{ g/s}$  چقدر باید حرارت داده شود؟ برای شرایط داده شده، سطح مقطعی جریان ورودی و خروجی چقدر است؟

۴-۴۰M هوا در فشار بالای  $500 \text{ kPa}$  و  $30^\circ\text{C}$  برای چرخاندن یک توربین کوچک جهت قدرت دادن به یک مته پر دور استفاده می شود. مته احتیاج به قدرت ورودی  $746 \text{ W}$  ( $1 \text{ hp}$ ) دارد و می توان فرض کرد که هوا از توربین در  $180 \text{ kPa}$  خارج می شود. اگر فرآیند توربین آدیاباتیک شبه ساکن باشد، نرخ جریان جرمی هوای لازم را محاسبه کنید. اگر لوله هوای ورودی  $1 \text{ cm}$  قطر داشته باشد، سرعت هوای ورودی را محاسبه کنید.

۴-۴۱M توربین کوچکی برای کار با هلیوم در شرایط ورودی  $1 \text{ MPa}$  و  $45^\circ\text{C}$  طراحی می شود. تخلیه در فشار اتمسفر صورت می گیرد و فرآیند توربین آدیاباتیک و شبه ساکن فرض می شود. همچنین می توان فرآیند در توربین را جریان دائم حالت دائم فرض کرد. سرعت جریان ورودی  $10 \text{ m/s}$  است. قطر لوله ورودی را محاسبه کنید اگر قدرت خروجی توربین  $3 \text{ kW}$  باشد.

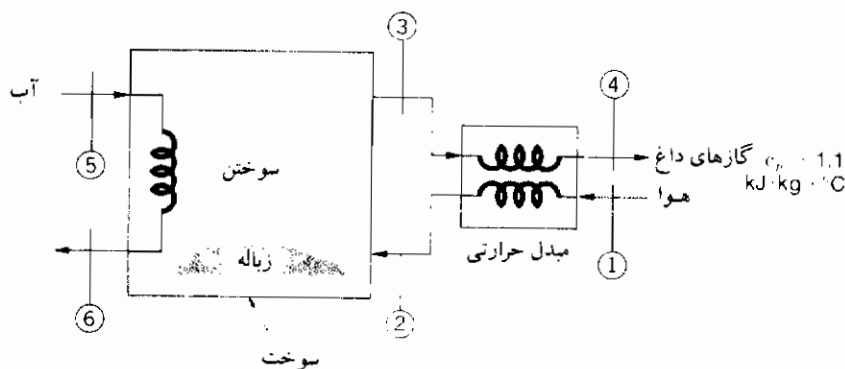
۴-۴۲M هلیوم در  $1/4 \text{ MPa}$  و  $140^\circ\text{C}$  وارد یک شپوره آدیاباتیک با سرعت  $20 \text{ m/s}$  می شود. هلیوم تا فشار  $110 \text{ kPa}$  در خروجی شپوره منبسط می شود. سرعت خروجی را محاسبه کنید.

۴-۴۳M یک آب گرمکن صنعتی از سوخت گازی با انرژی شیمیایی داخلی  $54 \text{ MJ/kg}$  استفاده می کند. آب گرمکن طوری طرح شده که  $16 \text{ kg}$  هوا در  $20^\circ\text{C}$  و  $1 \text{ atm}$  برای هر

کیلوگرم سوخت تهیه شود و ۳۸ liters/min آب گرم در  $80^{\circ}\text{C}$  از آب سرد  $15^{\circ}\text{C}$  تولید کند. گازهای گرم خروجی در دمای  $110^{\circ}\text{C}$  است. مقدار سوخت لازم را محاسبه کنید.

۴-۴۴M

یک زباله سوز شهری برای سوزاندن زباله که دارای انرژی شیمیایی داخلی متوسط  $7\text{ MJ/kg}$  است به کار می‌رود. گازهای داغ حاصل از فرآیند سوختن برای گرم کردن اولیه هوا قبل از ورود به زباله‌سوز استفاده می‌شود. ساختمان داخلی زباله‌سوز اجازه می‌دهد که به عنوان آب گرمکن فشار بالا برای یک نیروگاه مطابق با شکل نشان داده شده، به کار رود. دماهای مربوطه از این قرار است،  $T_1 = 40^{\circ}\text{C}$ ،  $T_3 = 815^{\circ}\text{C}$ ،  $T_4 = 205^{\circ}\text{C}$ ،  $T_5 = 35^{\circ}\text{C}$  و  $T_6 = 150^{\circ}\text{C}$ . فرض کنید که گازهای داغ مانند یک گاز ایده آل رفتار کند و  $14\text{ kg}$  جهت سوختن یک کیلوگرم زباله یا هر کیلوگرم از سوخت کمکی لازم است. سوخت کمکی دارای انرژی شیمیایی داخلی  $46\text{ MJ/kg}$  می‌باشد و باید برای ایجاد دمای لازم جهت احتراق کامل به کار رود. برای حرارت دادن به  $11000\text{ liters}$  آب چه مقدار انرژی کلی به صورت زباله و سوخت باید تهیه شود؟ اگر  $900\text{ kg}$  زباله برای گرمایش  $11000\text{ liters}$  آب مهیا شود، چه مقدار سوخت کمکی لازم است؟



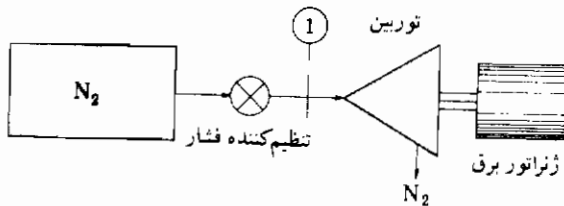
شکل مسأله ۴-۴۴M

۴-۴۵M

سرعت جریان هوایی با عبور از یک کانال از  $50\text{ kPa}$ ،  $-10^{\circ}\text{C}$  و  $700\text{ m/s}$  به  $150\text{ m/s}$  کاهش می‌یابد. فرآیند می‌تواند آدیاباتیک و شبه ساکن فرض شود. سطح مقطع

جریان ورودی و خروجی را برای دبی جریان  $1/2 \text{ kg/s}$  محاسبه کنید.

۴-۴۶M یک دستگاه کوچک مولد نیروی کمکی مانند شکل طرح می شود. نیتروژن در  $14 \text{ MPa}$  و  $20^\circ \text{C}$  در مخزن قرار دارد. این مخزن با یک شیر به توربین که ژنراتور برق را می چرخاند متصل است. قدرت خروجی دستگاه  $75 \text{ W}$  می باشد و فشار در نقطه ۱ به وسیله رگولاتور (تنظیم کننده) فشار که مانند یک المان خفگی عمل می کند، در  $700 \text{ kPa}$  ثابت نگه داشته می شود. نیتروژن از توربین در فشار  $100 \text{ kPa}$  تخلیه می شود و فرآیند توربین آدیاباتیک فرض می شود. جهت تولید قدرت خروجی در یک ساعت، مخزن با چه اندازه ای لازم است؟ فرض کنید که مخزن به طور دما ثابت در  $20^\circ \text{C}$  ثابت باقی بماند و هنگامی که فشار مخزن به  $700 \text{ kPa}$  می رسد، تولید توان متوقف گردد.



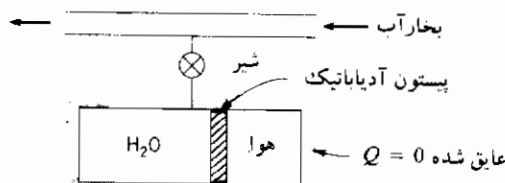
شکل مسأله ۴-۴۶M

۴-۴۷M مخزنی کروی کاملاً عایق و تخلیه شده است و در معرض هوای محیط در  $1 \text{ atm}$  و  $35^\circ \text{C}$  می باشد. شیری بر روی مخزن باز می شود و هوا اجازه می یابد که به آهستگی داخل آن شود. دمای هوا در داخل مخزن اگر فشار به  $1 \text{ atm}$  برسد چقدر است؟

۴-۴۸M مخزن صلبی به حجم  $1 \text{ m}^3$  شامل بخار آب در  $2 \text{ MPa}$  و  $320^\circ \text{C}$  می باشد. شیری بر روی مخزن باز می شود و بخار آب خارج می گردد تا فشار به  $100 \text{ kPa}$  کاهش یابد. در حین این فرآیند حرارت اضافه می شود تا دما ثابت باقی بماند. مقدار حرارت لازم را محاسبه کنید.

۴-۴۹M بخار آب در خط لوله ای در  $1/5 \text{ MPa}$  و  $320^\circ \text{C}$  جریان دارد. متصل به خط لوله یک سیلندر آدیاباتیک با پیستون بدون اصطکاکی مانند شکل وجود دارد. یک طرف سیلندر

شامل  $0.05 \text{ kg}$  هوا در  $1 \text{ atm}$  و  $105^\circ\text{C}$  و در طرف دیگر  $0.03 \text{ kg}$  بخار آب در  $1 \text{ atm}$  و  $105^\circ\text{C}$  وجود دارد. پیستون آدیاباتیک است. شیر باز می‌شود و بخار آب وارد سیلندر می‌شود تا فشار به  $1/5 \text{ MPa}$  برسد در این لحظه شیر بسته می‌شود. مقدار جرم بخار آب اضافه شده، حالت نهایی بخار آب در سیلندر و دمای نهایی هوا را محاسبه کنید.



شکل مسأله ۴-۴۹M

**۴-۵۰M** انتالپی سیالی در طی یک فرآیند جریان دائم  $4/5 \text{ kJ/kg}$  افزایش می‌یابد. حالت ابتدایی سیال  $2 \text{ atm}$  و  $100^\circ\text{C}$  است و حالت نهایی برابر  $10 \text{ atm}$  و  $300^\circ\text{C}$  می‌باشد. سرعتهای ابتدایی و انتهایی به ترتیب برابر  $36 \text{ m/s}$  و  $12 \text{ m/s}$  است و حالت نهایی در ارتفاع  $25 \text{ m}$  بالاتر از حالت ابتدایی است.  $25 \text{ MJ}$  حرارت برای دبی  $0.75 \text{ kg/s}$  تأمین می‌شود. کار فرآیند را برحسب واحدهای  $W$ ،  $\text{Btu}$  و  $\text{hp}$  محاسبه کنید.

**۴-۵۱M** بخار آب طی یک فرآیند جریان دائم آدیاباتیکی در یک توربین از  $6/0 \text{ MPa}$  و  $500^\circ\text{C}$  به فشار  $10 \text{ kPa}$  و کیفیت  $90\%$  درصد می‌رسد. کار خروجی را برای جریان  $1 \text{ kg/s}$  محاسبه کنید. چه نرخ جریانی جهت تولید کار خروجی  $400 \text{ kW}$  لازم است؟

**۴-۵۲M** بخار آب طی یک فرآیند انتالپی ثابت از  $1/5 \text{ MPa}$ ،  $360^\circ\text{C}$  به فشار  $10 \text{ MPa}$  می‌رسد. دمای نهایی در این فرآیند و تغییر حجم را پیدا کنید.

**۴-۵۳M** آب اشباع در  $260^\circ\text{C}$  تا  $100 \text{ kPa}$  تحت فرآیند خفگی قرار می‌گیرد. کیفیت نهایی را اگر اشباع باشد یا دمای نهایی را اگر بخار داغ باشد، محاسبه کنید. سرعت بخار آب را در حالت نهایی برای جریان با شدت  $1 \text{ kg/min}$  از میان لوله‌ای به قطر  $5 \text{ cm}$  محاسبه کنید.

**۴-۵۴M** مخزنی به حجم  $1 \text{ m}^3$  شامل نیتروژن در فشار  $15 \text{ atm}$  و  $100^\circ\text{C}$  می‌باشد و

بطور کامل از محیط عایق شده است. شیری بر روی مخزن باز می شود و نیتروژن خارج می گردد تا فشار به ۲ atm کاهش یابد. جرم  $N_2$  تخلیه شده از مخزن را محاسبه کنید.

۴-۵۵M

یک دمنده گریز از مرکز، هوارادر ۱ atm و  $20^\circ C$  بادی حجمی  $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$  دریافت می کند. هوادر  $1 \text{ m/s}$  وارد و در  $10 \text{ m/s}$  خارج می گردد و دما کلاً ثابت می باشد. قدرت ورودی لازم را محاسبه کنید. فرضیات را مشخص نمایید.

۴-۵۶M

به جای دستگاه خفگی آدیاباتیک جهت اندازه گیری کیفیت بخار آب از این روش استفاده می شود که نمونه بخار آب از طریق محفظه ای که کمیت اندازه گیری شده حرارت الکتریکی (معلوم) به کار می رود، جریان می یابد. نرخ جریان بخار آب خروجی از کالریمتر نیز اندازه گیری می شود. در یکی از اندازه گیریها بخار آب در ۲ MPa در نرخ جریان  $3/8 \text{ g/s}$  نمونه برداری می شود. توان الکتریکی اعمال شده به دستگاه ۳۸۰ W است و شرایط خروجی  $p = 150 \text{ kPa}$  و  $T = 180^\circ C$  اندازه گیری می شود. کیفیت بخار آب را در شرایط ۲ MPa محاسبه کنید.

۴-۵۷M

یک سیستم بسته فرآیند شبه ساکنی را بین دو حالت ابتدایی طی می کند بطوری که انتالپی ۱۱۰ kJ کاهش می یابد و سیستم ۱۰ kJ حرارت از دست می دهد. کار این فرآیند را محاسبه کنید. سپس فرض کنید که سیستم مشابهی فرآیند جریان دائمی بین همان حالات انتهایی را طی کند و همچنین دچار افزایش انرژی جنبشی ۵ kJ بشود در حالی که همان مقدار حرارت را از دست بدهد. کار خروجی برای این فرآیند را تعیین کنید.

۴-۵۸M

اکسیژن در یک خط لوله در  $70 \text{ m/s}$  با شرایط  $120 \text{ kPa}$  و  $15^\circ C$  جریان می یابد. متصل به این خط لوله مخزنی به حجم ۶ liters شامل اکسیژن در  $5^\circ C$  و ۱ atm وجود دارد. شیری باز می شود و اکسیژن وارد مخزن می شود تا جرم مخزن ۵ برابر جرم اولیه آن شود، در این لحظه شیر بسته می شود. مخزن آدیاباتیک است. فشار و دمای نهایی در مخزن را محاسبه کنید.

## مراجع

- 1 Hatsopoulos, G. N., and J. H. Keenan: "Principles of General Thermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
- 2 Reynolds, W. C.: "Thermodynamics," 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.
- 3 Sears, F. W.: "An Introduction to Thermodynamics, The Kinetic Theory of Gases, and Statistical Mechanics," Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1950.
- 4 Van Wylen, G. J., and R. E. Sonntag: "Fundamentals of Classical Thermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.



## فصل ۵

### قانون دوم ترمودینامیک

#### ۵-۱ مقدمه

در فصل اول دریافتیم که قانون دوم ترمودینامیک به "جهت" فرآیندهای مبادله انرژی مربوط می‌شود. بعضی از تبدیلات انرژی مجاز است، در صورتی که بعضی دیگر مجاز نیست. در فصل دوم توضیح دقیقتری از اصل بقای انرژی داده شده است که به مطالعات قبلی در مکانیک مربوط می‌شود. تا آنجا که به قانون اول ترمودینامیک مربوط است، تمام انواع انرژی به یک درجه مفید می‌باشد. هیچ یک از انواع مختلف انرژی برتری ویژه‌ای ندارد و تنها موضوع قابل توجه این است که انرژی در سیستم عایق شده باید محفوظ بماند. اگر چه برتری وجود ندارد، اما انواع مختلف انرژی از یکدیگر متمایز است. کار، نیروی عامل در طول یک مسافت است و تأثیر متقابل بین سیستمها را معرفی می‌کند. انرژی داخلی تابعی است از حالت که تغییر آن برحسب کار تعریف می‌شود، و حرارت متعاقباً برحسب کار و انرژی داخلی تعریف می‌شود. هیچ چیز در اصل بقای انرژی معین نمی‌کند که حرارت و کار نوعهای معادل یکدیگر نیستند. در حقیقت از معادله سیکلی زیر استنباط می‌شود که آنها معادل یکدیگرند.

$$\oint d'Q + \oint d'W = 0 \quad (5-1)$$

قانون دوم ترمودینامیک این حقیقت را که حرارت و کار معادل هم نیستند تأیید و مآلاً یک سلسله روابط

صوری را که جهت تکمیل قانون اول ترمودینامیک در بررسی سیستمهای ترمودینامیکی بکار برده می‌شود، برقرار می‌کند.

## ۵-۲ تشریح فیزیکی قانون دوم

از پدیده‌هایی که در حیطه اصل دوم قرار می‌گیرند در فصل ۱ خلاصه کوتاهی داده شده است. به منظور سهولت، این پدیده‌ها دوباره بیان می‌شوند.

۱ - حرارت از دمای بالا به دمای پایین بدون تأثیرات دیگر جریان می‌یابد. این بدین معنی است که جسم گرم موقعی که در مجاورت جسمی با دمای پایین تر قرار گیرد سرد خواهد شد و نه برعکس.

۲ - دو گاز هنگامی که در داخل یک محفظه عایق قرار بگیرند، به طور یکسان در تمام محفظه مخلوط خواهند شد، اما موقعی که مخلوط شوند، خود به خود جدا نخواهند شد.

۳ - یک باتری از طریق یک مقاومت تخلیه می‌شود و مقداری انرژی آزاد می‌کند، اما غیرممکن است که عکس این عمل اتفاق بیفتد، یعنی با افزایش انرژی به مقاومت از طریق گرمایش، باتری خودش را شارژ نمی‌کند.

۴ - امکان ندارد ماشین یا دستگاهی ساخت که به طور مدام کار کند، در حالی که تنها از یک منبع حرارت دریافت کند و به همان اندازه کار تولید نماید.

عبارات ۱ تا ۴ را به تفصیل مورد بررسی قرار می‌دهیم. وضعیت گفته شده در عبارت ۱ مطابق با تجربه روزمره است. در ابتدا این طور به نظر می‌رسد که نتیجه مستقیم اصل بقای انرژی است. این درست است که انرژی داده شده به وسیله جسم گرم صرف افزایش تراز انرژی جسم سردتر می‌شود به طوری که انرژی کل مجموعه دو جسم ثابت باقی می‌ماند. اما برای حالتی که انرژی گرفته شده از جسم سردتر صرف افزایش تراز انرژی جسم داغ به مقدار مساوی شود باز هم انرژی کل ثابت باقی می‌ماند. اما دومین فرآیند حتی اگر اصل بقای انرژی را هم نقض ننماید اتفاق نمی‌افتد. در مثال دیگر، انتظار نداریم که یک ظرف آب هنگامی که در یخچال قرار داده می‌شود در اثر انتقال حرارت از محیط سرد به آن به جوش آید. چنین امری اتفاق نمی‌افتد.

در عبارت چهارم، ملاحظات قدری مجردند، اما هنوز در حیطه تجربه معمولی قرار دارند. انتظار نداریم که بتوان موتوری ساخت که در فرآیندهای سیکلی به طور مداوم کار کند و بتواند به آسانی از منبع در دسترسى مانند اقیانوس یا زمین انرژی اخذ کرده و مقدار معادلی کار مکانیکی تولید کند. در حقیقت اگر امکان ساخت چنین موتوری وجود داشت، خیلی خوب بود زیرا تنها می‌باید آن را به اقیانوس متصل و کل قدرت مورد لزوم را برای آینده تأمین کرد. چنین موتوری به ماشین حرکت دائم از نوع دوم موسوم است زیرا موفق می‌شود که به طور دائم حرارت یک منبع را به کار تبدیل کند. ماشین حرکت دائم از نوع اول ماشینی است که در تناقض با قانون اول ترمودینامیک انرژی تولید کند.

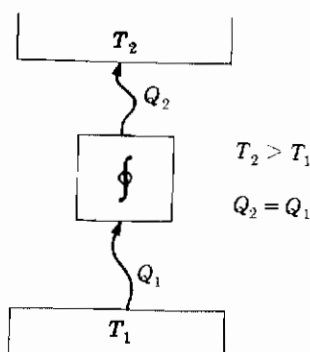
براساس این بحث مختصر، می‌توانیم به طور آزمایشی نتیجه بگیریم که قانون دوم ترمودینامیک دارای تأکید اساسی بر شناسایی ماهیت یک طرفه انتقال حرارت و انواع خاص تبدیل انرژی می‌باشد.

هدف کلی ما در این فصل گسترش تحلیلی و پذیرفتنی قانون دوم ترمودینامیک است که براساس بحث ماکروسکپی عبارت ۴ را به عنوان اصل تجربی پذیرفته است. این تحلیل ماکروسکپی ساختمان میکروسکپی ماده را نادیده می‌پندارد. خوانندگانی که ترمودینامیک میکروسکپی ارائه شده در فصول ۱۲ و ۱۳ را مطالعه می‌کنند، خواهند دید که دو نوع تجزیه و تحلیل را می‌توان به یکدیگر مربوط کرد، اما چنین مطلبی برای فهم این قسمت لازم نیست.

### ۵-۳ بیانهای کلاسیوس و کلونین - پلانک<sup>۱</sup>

دو بیان پذیرفته شده متداول قانون دوم ترمودینامیک مربوط به عبارات اول و چهارم می‌شود. بیان کلاسیوس: محال است دستگاهی ساخته شود که در یک سیکل (چرخه) عمل کند و تنها نقش آن انتقال حرارت از یک منبع سرد به یک منبع گرمتر باشد. بیان کلونین - پلانک: محال است دستگاهی ساخته شود که در یک سیکل کار کند و جز تولید کار و انتقال حرارت تنها با یک منبع حرارتی، نقش دیگری داشته باشد.

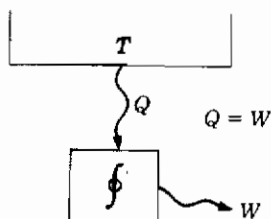
این بیانها در شکلهای ۵-۱ و ۵-۲ نشان داده می‌شود.



شکل ۵-۱ محال است دستگاهی ساخته شود که در یک سیکل کار کند و تنها نقش آن انتقال حرارت از یک منبع سرد به یک منبع گرمتر باشد.

#### ۵-۴ فرآیندها و سیکل‌های برگشت پذیر

اکنون، مسیر ایده آلی از حالتها را به نام فرآیند برگشت پذیر در نظر می‌گیریم. فرآیندی برگشت پذیر است که حالت ابتدایی سیستم بتواند بدون هیچ گونه تأثیر قابل مشاهده‌ای در سیستم و محیط، دوباره ابقا گردد. انبساط گازی را در پشت یک پیستون در سیلندر در نظر بگیرید. اگر انبساط به آرامی صورت بگیرد، سیستم (گاز) اصولاً در حالت تعادل باقی خواهد ماند و ممکن است فرآیند را همان طور که در فصل ۱ بحث شد شبه ساکن یا توالی حالات تعادلی بنامیم. برای پیدا کردن این که آیا



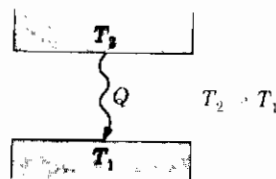
شکل ۵-۲ محال است دستگاهی ساخته شود که در یک سیکل کار کند و جز تولید کار و انتقال حرارت تنها با یک منبع حرارتی، نقش دیگری داشته باشد.

این فرآیند برگشت پذیر است، سؤال زیر را مطرح می‌کنیم. آیا ممکن است که فرآیند در جهت عکس بدون تأثیرات قابل مشاهده اضافی در سیستم یا محیط صورت گیرد؟ به عبارت دیگر آیا می‌توانیم گاز را به حالت اولیه‌اش متراکم کنیم و دقیقاً همان اندازه کار و حرارتی را که به هنگام انبساط خارج شده برگردانیم؟ ثابت می‌شود که فرآیند شبه ساکن یک فرآیند برگشت پذیر است. یک معیار عمومی برای برگشت پذیری می‌تواند به صورت زیر بیان شود.

اگر برگشت فرضی یک فرآیند ترمودینامیکی را بتوان طوری انجام داد که قانون دوم ترمودینامیک را نقض نکند، گفته می‌شود که فرآیند برگشت پذیر بوده است.

دو کاربرد واضح این معیار در شکل‌های ۵-۳ و ۵-۴ نشان داده می‌شود. اگر سعی کنیم که فرآیند انتقال حرارت در شکل ۵-۳ را معکوس کنیم، بیان کلاسیوس قانون دوم نقض می‌شود. اگر سعی کنیم که حالت شکل ۵-۴ را معکوس کنیم، بیان کلوین - پلانک نقض می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که انتقال حرارت با اختلاف دمای معین و تبدیل کار به حرارت در حین یک فرآیند سیکلی هر دو فرآیندهای برگشت ناپذیرند. برای رسیدن به این نتیجه، فرآیند برگشت نا پذیر را به صورت فرآیندی که برگشت پذیر نیست تعریف می‌کنیم. البته این تعریف تقریباً واضح است.

سیکل برگشت پذیر از توالی فرآیندهای برگشت پذیر تشکیل می‌شود، به طوری که سیستم به حالت اولیه‌اش باز گردد. همان طوری که قبلاً ذکر شد موتور یا دستگاه سیکلی در شکل ۵-۲ به ماشین



شکل ۵-۳ انتقال حرارت در عرض اختلاف دمای معین برگشت ناپذیر است.

با حرکت دائم از نوع دوم موسوم است. اصطلاح نوع دوم به خاطر این است که که قانون دوم ترمودینامیک را نقض می‌کند.

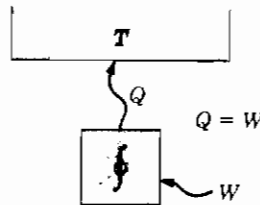
### موتورهای حرارتی سیکلی

در این جا ممکن است اندکی از بحث دور شویم تا موتور حرارتی سیکلی را تشریح کنیم. کار، نوع خیلی مفید انرژی است که می توان آن را برای کاربردهای عملی به گونه های مختلف تبدیل کرد. کار الکتریکی می تواند به دستگاههای بیشمار قدرت بدهد و کار مکانیکی می تواند اتومبیل، ماشینها و غیره را به حرکت درآورد. حرارت خیلی مفید نیست و هدف موتور حرارتی تبدیل حرارت به کار است. کلمه سیکل و فرآیند سیکلی برای فرآیندهای تبدیل انرژی مورد نظر که می توانند به طور مداوم عمل کنند، به کار گرفته می شود. موتور احتراق داخلی یک موتور سیکلی است که به طور مرتب سوخت و هوا را می مکد و پس از تراکم، مخلوط را محترق کرده و در حالی که محصولات احتراق را به محیط تخلیه می کند، کار خروجی تولید می نماید. سیکل قدرت سیکلی است که کار خالص خروجی تولید می کند (با مقدار حرارت خالص ورودی) و سیکل تبرید شامل کار خالص ورودی و حرارت خالص خروجی می باشد. با معکوس کردن تمام مقادیر جریان حرارت و کار یک سیکل قدرت برگشت پذیر را می توان به یک سیکل تبرید برگشت پذیر تبدیل کرد. برای تعیین جهات و علامات مناسب برای مقادیر کار و حرارت به جای یک قرارداد علامت خشک به طر حواره مناسب استناد خواهیم کرد.

### معادل بیانهای قانون دوم

معادل بیانهای کلاسیوس و کلونین - پلانک را می توان سرعت همانند شکل ۵-۵ نمایش داد. اجازه دهید فرض کنیم که امکان داشته باشد حرارت مطابق شکل الف ۵-۵ متناقص با بیان کلاسیوس منتقل شود. به سیستم نشان داده شده در شکل الف ۵-۵ می توانیم موتور برگشت پذیر شکل ب ۵-۵ را اضافه کنیم. مطابق اصل بقای انرژی، کار خروجی این موتور برابر با  $W = Q_A - Q_B$  می باشد. البته قانون دوم ترمودینامیک این نوع موتور را منع نمی کند. اگرچه نتیجه حاصله از اضافه کردن موتور حرارتی در شکل ب ۵-۵ برابر است با این که هیچ حرارت خالصی با منبع  $T_2$  مبادله نمی شود و این آرایش معادل با شکل ج ۵-۵ می باشد. موتور در شکل ج ۵-۵ درست همان دستگاهی است که بیان کلونین - پلانک را نقض می کند. بنابراین نشان داده ایم که نقض بیان کلاسیوس به نقض بیان کلونین -

پلانک منجر می شود.



شکل ۵-۴ تبدیل کار به حرارت، برگشت ناپذیر است.

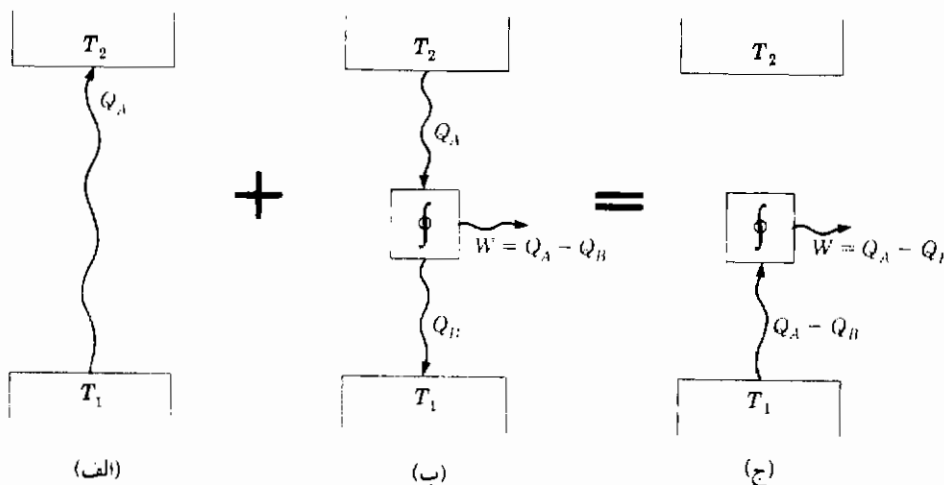
## ۵-۵ قرارداد علامت برای حرارت و کار

در بحث راجع به قانون اول ترمودینامیک و موازنه انرژی، ما علامتی قراردادی را برای حرارت و کار به خدمت گرفتیم به طوری که انرژی اضافه شده به مرز سیستم (حرارت یا کار) مثبت است. معادلات معرف موازنه انرژی بر اساس این قرارداد بودند. حالا با شروع بررسی سیکل‌های قدرت حرارتی، در پر تو قانون دوم ترمودینامیک خواننده متوجه می شود که انرژی در مسیر فلشهای حرارت و کار که در نمودارها رسم شده، به سیکلها اضافه و یا از آنها خارج می شود. هدف از چنین نمودارهایی، تشخیص جهت انتقال چنین انرژی‌هایی از قبل می باشد، به طوری که ارزیابی بهتری از فرآیندهای درگیر بشود. از نظر توازن انرژی هیچ گونه تغییری در مفاهیم اصلی رخ نمی دهد ما هنوز می گوئیم:

$$\text{انرژی خارج شده از سیستم} + \text{انرژی ذخیره شده در سیستم} = \text{انرژی اضافه شده به سیستم}$$

با رسم فلشها در جهات خاصی توجه تان را به کمیت‌های انرژی مورد علاقه از نظر عمل جلب می کنیم. در سیکل قدرت، منظور تولید کار خروجی در اثر دریافت حرارت در دمای بالا می باشد. بنابراین نمودار را به صورت کار خارج شده از سیکل و حرارت اضافه شده به سیکل رسم می کنیم. در سیکل تبرید، منظور خارج کردن حرارت از منبعی در دمای پایین با افزایش کار می باشد. بنابراین شکل را به صورت افزایش حرارت در دمای پایین و کار ورودی رسم می کنیم.

نکته مهم در این فصل این است که قانون دوم محدودیتهای مشخصی در مورد تبدیل مجاز حرارت به کار قرار می دهد اما این محدودیتهای نظریه تبدیل انرژی را به هیچ طریقی لغو نمی کند. همان



شکل ۵-۵ معادل بیانهای قانون دوم کلاسیوس و کلوین - پلانک

طوری که چندین بار تأکید کرده ایم، تحلیل تبدیل انرژی اساساً یک روش حسابداری است و هرگاه به صورت صحیح صورت گیرد، قرارداد علامت مهم نیست. همچنان که تشریح ما از قانون دوم ترمودینامیک گسترش می یابد، خواننده باید بر فهم پدیده فیزیکی درگیر تعمق نماید، با این تعمق قرارداد علامت خود به خود نتیجه صحیح می دهد.

## ۵-۶ دمای ترمودینامیکی

فرض کنید که دو موتور حرارتی برگشت پذیر در اختیار داریم که فرآیندهای سیکلی بین منابع حرارتی مطابق با شکل الف ۵-۶ عمل می کنند. بازده حرارتی یک موتور حرارتی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta_f = \frac{\text{تأثیر انرژی مفید}}{\text{انرژی هزینه شده}} = \frac{\text{کار خروجی}}{\text{حرارت اضافه شده}} \quad (۵-۲)$$

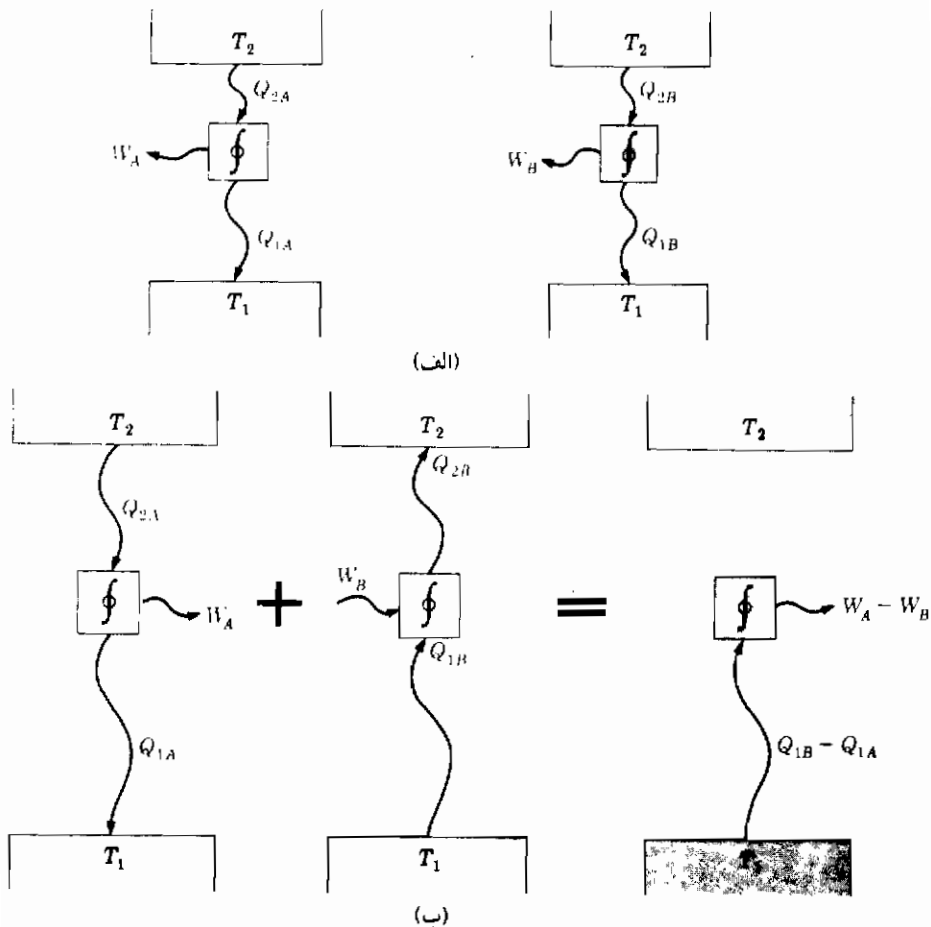
برطبق این تعریف، "انرژی هزینه شده" برابر با انرژی اضافه شده در دمای بالا می باشد زیرا این حرارت



می‌باید به وسیله مقداری سوخت تأمین شود. بدین ترتیب،

$$\eta_i = \frac{W}{Q_2} \quad (۵-۳)$$

تا به حال، چیزی درباره چنین بازده‌ای نگفته‌ایم. موتورهای برگشت پذیر  $A$  و  $B$  ممکن بود به طور متفاوتی ساخته شوند و در اولین نگاه می‌توانستیم دریابیم که بازده‌های متفاوتی دارند. اگر چه در صدد



شکل ۵-۶ تمام موتورهای برگشت پذیر که بین حدود دماهای یکسانی کار می‌کنند

بازده یکسانی دارند.

هستیم اثبات کنیم که آنها بازده یکسانی دارند. برای نشان دادن این مطلب به طور آزمایشی فرض می‌کنیم که موتور  $A$  دارای بازده بیشتری از موتور  $B$  باشد و قرار می‌دهیم:

$$Q_{2A} = Q_{2B}$$

سپس

$$W_A > W_B \text{ و } Q_{1A} < Q_{1B}$$

چون موتورهای برگشت پذیرند، موتور  $B$  می‌توانست به صورت معکوس نیز کار کند و با موتور  $A$  در شکل ب-۵ ترکیب شود. اما چون  $Q_{2A} = Q_{2B}$

$$W_A - W_B = Q_{1B} - Q_{1A}$$

آرایش شکل ب-۵ بیان کلوین - پلانک قانون دوم را نقض می‌کند، به طوری که فرض این که  $A$  دارای بازده بیشتری از  $B$  باشد غلط است. بنابراین حق داریم نتیجه بگیریم: تمام موتورهای برگشت پذیر که در بین حدود دماهای یکسانی عمل می‌کنند بازده برابری دارند. این بازده می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\eta_t = \frac{W}{Q_2} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} \quad (۵-۴)$$

چون بازده برای تمام موتورهای برگشت پذیری که بین حدود دماهای یکسانی عمل می‌کنند برابر می‌باشد، نتیجه می‌گیریم که نسبت حرارتی  $\frac{Q_1}{Q_2}$  باید فقط تابعی از این دو دما باشد.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = f(T_1 \text{ و } T_2) \quad (۵-۵)$$

فرض کنید که دمای میانی  $T_3$  بین  $T_1$  و  $T_2$  با دو موتور حرارتی برگشت پذیر در شکل ۵-۷ اضافه گردد. چون دو موتور برگشت پذیر  $A$  و  $B$ ، یک موتور برگشت پذیر بزرگتر را که بین  $T_1$  و  $T_2$  کار می‌کند تشکیل می‌دهد، این ترکیب باید بازدهی معادل بازده موتور  $C$  داشته باشد. از معادله (۵-۵) می‌دانیم که نسبتهای حرارتی توابعی از حدود دمای سیکلهاست.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = f(T_1 \text{ و } T_2)$$

$$\frac{Q_3}{Q_2} = f(T_3 \text{ و } T_2)$$

$$\frac{Q_1}{Q_3} = f(T_1 \text{ و } T_3)$$

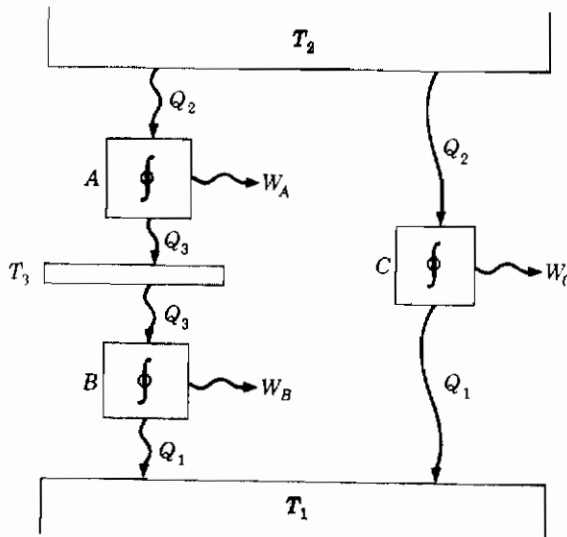
با ترکیب کردن این روابط :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = f(T_1 \text{ و } T_2) = \frac{Q_1}{Q_3} \frac{Q_3}{Q_2} = f(T_1 \text{ و } T_3) \times f(T_3 \text{ و } T_2) \quad (5-6)$$

یا

$$f(T_1 \text{ و } T_2) = f(T_1 \text{ و } T_3) \times f(T_3 \text{ و } T_2) \quad (5-7)$$

چون قسمت چپ معادله (۵-۷) شامل  $T_3$  نمی‌شود، نتیجه می‌گیریم که تابع  $f$  باید به صورتی باشد که  $T_3$



شکل ۵-۷ دمای ترمودینامیکی

از حاصل ضرب طرف راست معادله (۵-۷) حذف گردد. این مقدور است اگر

$$f(T_1 \text{ و } T_3) = \frac{\phi(T_1)}{\phi(T_3)}$$

$$f(T_3 \text{ و } T_2) = \frac{\phi(T_3)}{\phi(T_2)}$$

$\phi$  تابعی جدید است. نتیجه آن است که برای نسبت‌های حرارتی فرم تابعی را انتخاب می‌کنیم.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\phi(T_1)}{\phi(T_2)} \quad (5-8)$$

البته تعدادی از توابع دما می‌توانند در این معادله صدق کنند. تابع دما به صورت زیر به وسیله کلون پیشنهاد شد.

$$\frac{|Q_1|}{|Q_2|} = \frac{T_1}{T_2} \quad (5-9)$$

و معادله (۵-۹) به عنوان تعریف مقیاس دمای ترمودینامیکی مطلق به کار می‌رود. بازده موتور حرارتی برگشت پذیری که بین دو منبع کار کرده و تنها با این دو منبع حرارت رد و بدل می‌کند، برابر است با

$$\eta_t = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (5-10)$$

$T_L$  دمای منبع سرد را مشخص می‌کند و  $T_H$  دمای منبع گرم را مشخص می‌کند و این مقیاس دما به دمای اندازه گیری شده به وسیله ترمومتر گاز ایده آل هم که در فصل ۱ تشریح شده مربوط می‌شود.

## ۵-۷ نابرابری کلاسیوس<sup>۱</sup>

آرایش شکل ۵-۸ را در نظر بگیرید. مقدار حرارت  $d'Q_R$  از منبع دمای ثابت  $T_R$  به موتور حرارتی برگشت پذیر منتقل می‌شود و کار  $d'W_R$  را تولید می‌کند. حرارت دفع شده از این موتور برای موتور سیکلی دیگری که کار  $d'W_E$  را تولید می‌کند استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن دو موتور به عنوان یک سیستم، کل کار خروجی  $d'W$  برابر است با:

$$d'W = d'W_R + d'W_E$$

برای یک فرآیند با موتوری که داریم:

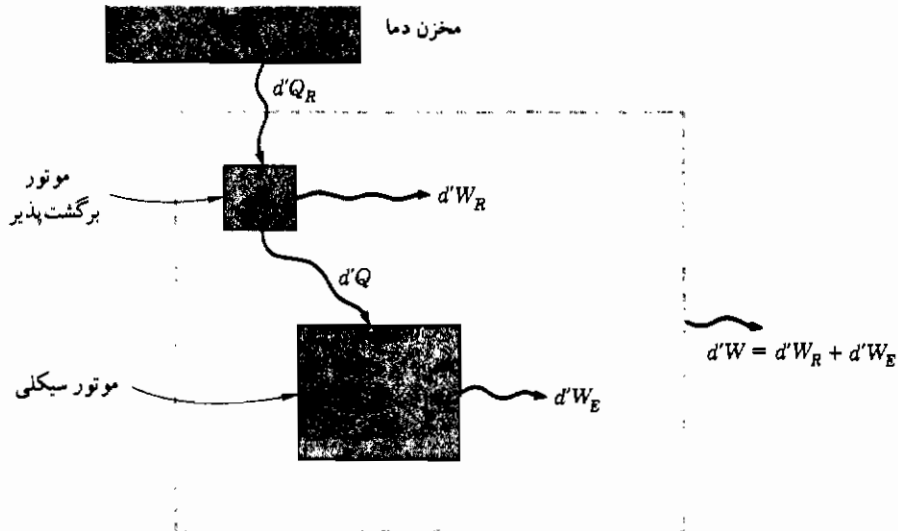
$$d'Q = dU + d'W_E$$

بنابراین کار کلی خروجی برابر است با:

$$d'W = d'W_R + d'Q - dU$$

اگر کل مجموعه یک سیکل انجام دهد،

$$\oint d'W = \oint d'W_R + \oint d'Q - 0 \quad (5-11)$$



شکل ۵-۸ نمودار برای اثبات نابرابری کلاسیوس

اما

$$d'W_R = d'Q_R \left(1 - \frac{T}{T_R}\right) = d'Q \left(\frac{T_R}{T} - 1\right)$$

بنابراین معادله (۵-۱۱) برای سیکل کامل به صورت زیر درمی آید:

$$\oint d'W = \oint d'Q \left(\frac{T_R}{T} - 1 + 1\right) = T_R \oint \frac{d'Q}{T} \quad (5-12)$$

آرایش شکل ۵-۸ نمی‌تواند کار خروجی خالص تولید کند، زیرا بیان کِلوین - پلانک از قانون دوم ترمودینامیک نقض می‌شود. بنابراین تنها راهی که این آرایش می‌تواند عمل کند، یک کار سیکلی ورودی و یک جریان حرارت سیکلی به‌منع می‌باشد. به‌صورت ریاضی این بدان معنی است که:

$$\oint d'W \leq 0 \quad (۵-۱۳)$$

$d'W$  کار خروجی است. با به‌کار بردن معادله (۵-۱۲) این شرط به‌صورت زیر در می‌آید.

$$\oint \frac{d'Q}{T} \leq 0 \quad (۵-۱۴)$$

رابطه داده شده در معادل (۵-۱۴) نابرابری کلاسیوس نامیده می‌شود.

در استنتاج قبلی اشاره‌ای به برگشت‌پذیری موتور  $E$  نشد. فرض کنید که این موتور برگشت‌پذیر باشد و فرض کنید که:

$$\oint d'W < 0 \quad (۵-۱۵)$$

چون موتور برگشت‌پذیر فرض می‌شود، می‌توانیم آن را معکوس کرده و به‌دست آوریم:

$$\oint d'W > 0$$

اما این برطبق قانون دوم غیرممکن است زیرا یک موتور حرکت دائم از نوع دوم بوجود می‌آید. نتیجه این است که نابرابری (۵-۱۵) نمی‌تواند برای حالت موتور برگشت‌پذیر  $E$  صادق باشد. در نتیجه باید علامت تساوی در معادله (۵-۱۴) برای حالت برگشت‌پذیر در نظر گرفته شود و می‌توان نوشت.

$$\oint \left( \frac{d'Q}{T} \right)_{rev} = 0 \quad (۵-۱۶)$$

## ۵-۸ تعریف ماکروسکپی آنتروپی

از نظر ریاضی، هر کمیتی که بتواند به‌صورت یک دیفرانسیل کامل بیان شود یک خاصیت یا

تابع نقطه‌ای<sup>۱</sup> یا تابعی از حالت سیستم است. شرط ریاضی برای یک دیفرانسیل کامل این است که انتگرال سیکلی دیفرانسیل برابر صفر باشد یعنی اگر

$$\oint dx = 0$$

بنابراین  $x$  یک خاصیت برای ناحیه‌ای که انتگرال سیکلی گرفته شده می‌باشد. برطبق این تعریف معادله (۵-۱۶) به صورت زیر در می‌آید.

$$dS = \left( \frac{d'Q}{T} \right)_{rev} \quad (5-17)$$

$S$  خاصیتی است که ما آن را آنتروپی می‌نامیم. معادله (۵-۱۷) تعریف ماکروسکوپی آنتروپی می‌باشد. توجه کنید که آنتروپی تنها برای فرآیندهای برگشت‌پذیر تعریف شد و تغییر در آنتروپی می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left( \frac{d'Q}{T} \right)_{rev} \quad (5-18)$$

تنها تغییرات آنتروپی به وسیله این روابط تعریف می‌شود. ما هنوز یک مقیاس مطلق برای آنتروپی برقرار نکرده‌ایم.

## ۵-۹ اصل افزایش آنتروپی

دو نقطه حالت نشان داده شده در شکل ۵-۹ و دو فرآیندی که بین این دو نقطه عمل کرده و تشکیل سیکل می‌دهند را در نظر بگیرید.  $R$  یک فرآیند برگشت‌پذیر است و  $I$  یک فرآیند برگشت ناپذیر می‌باشد طوری که کل فرآیند برگشت ناپذیر است. از نامعادله کلاسیوس داریم.

$$\oint \frac{d'Q}{T} = \int_1^2 \frac{d'Q_I}{T} + \int_2^1 \frac{d'Q_R}{T} < 0 \quad (5-19)$$

از آنجایی که سیکل برگشت ناپذیر است از علامت نامساوی استفاده کرده‌ایم. با ملاحظه این که

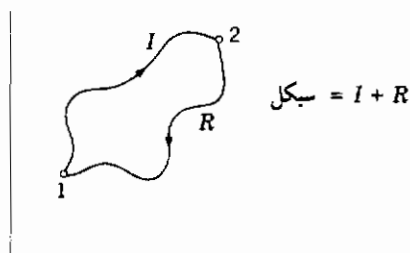
$$\int_2^1 \frac{d'Q_R}{T} = S_1 - S_2$$

معادله (۵-۱۹) می تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$\int_1^2 \frac{d'Q_I}{T} + S_1 - S_2 < 0$$

یا

$$S_2 - S_1 > \int_1^2 \frac{d'Q_I}{T}$$



شکل ۵-۹ سیکل برگشت ناپذیر

پس بطور کلی می توان نوشت :

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{d'Q}{T} \quad (۵-۲۰)$$

که تساوی برای فرآیند برگشت پذیر است و نامساوی برای فرآیند برگشت ناپذیر می باشد. معادله (۵-۲۰) اصل افزایش آنتروپی نامیده می شود.

فرض کنید معادله (۵-۲۰) برای فرآیندهای آدیاباتیک نوشته شود،  $d'Q = 0$ :

$$S_2 - S_1 \geq 0 \quad \text{فرآیند آدیاباتیک} \quad (۵-۲۱)$$

اگر فرآیند یک فرآیند آدیاباتیک برگشت پذیر باشد، تغییر آنتروپی صفر خواهد بود و ما



آن را یک فرآیند آنتروپی ثابت یا آیزنتروپیک<sup>۱</sup> می‌نامیم. اگر فرآیند آدیاباتیک برگشت ناپذیر باشد آنتروپی می‌باید ازدیاد پیدا کند. به علاوه فرض کنید که با یک سیستم منزوی<sup>۲</sup> (ایزوله) روبه‌رو هستیم. پس:

$$\Delta S \geq 0 \quad \text{سیستم منزوی} \quad (۵-۲۲)$$

یا آنتروپی سیستم منزوی باید در صورتی که تغییرات برگشت ناپذیر در داخل آن صورت گیرد افزایش یابد. در صورتی که تنها تغییرات برگشت پذیر در سیستم منزوی صورت گیرد آنتروپی ثابت باقی می‌ماند.

هیچ فرآیند واقعی برگشت پذیر نیست. تمام انتقال حرارتها با اختلاف دمای معین صورت می‌گیرد. تأثیرات اصطکاکی همیشه در اجرای فرآیندهایی که شامل کار برگشت ناپذیر است وجود دارد. بخاطر این واقعیات مجبوریم نتیجه بگیریم که آنتروپی جهان (با فرض یک سیستم منزوی) همیشه در حال افزایش می‌باشد. این فرض که جهان همیشه با "آنتروپی پر می‌شود" یک موضوع متافیزیکی است که مورد توجه زیاد فلاسفه و حکمای الهی بوده است. این مطلب زیاد جای نگرانی ندارد، زیرا احتمالاً تا مدت‌ها بر مسائل مهندسی تأثیری نخواهد گذاشت.

آنتروپی خاصیتی است که با معادله (۵-۱۷) تعریف می‌شود. تغییرات آن می‌تواند از راه معادله (۵-۱۸) محاسبه شود و این تمام چیز است که لازم است برای بسیاری از ملاحظات ماکروسکوپی بدانیم

#### آنتروپی، یک خاصیت ترمودینامیکی

بحث پیشین نشان داده است که آنتروپی یک خاصیت سیستم است. بدین ترتیب آنتروپی می‌تواند بر حسب خواص ترمودینامیکی دیگر بیان شده، درست به مانند انتالپی و انرژی داخلی جدول بندی شود در حقیقت آنتروپی به صورت تابعی از فشار و دما برای مواد مختلف جدول بندی می‌شود. خواص داده شده در ضمیمه مثالهایی از چنین جداولی است.

1- Isentropic process

2- Isolated system

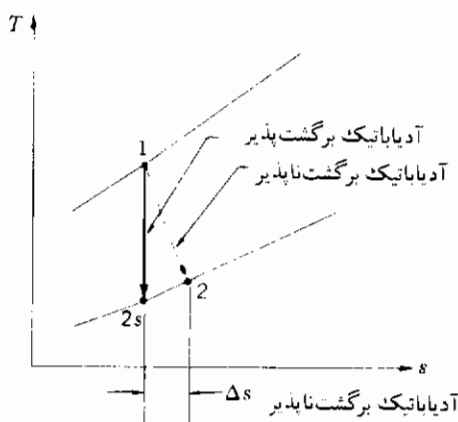
## فرآیندهای برگشت پذیر آدیاباتیکی و دما ثابت

از معادله (۵-۱۷) معلوم می شود که برای یک فرآیند آدیاباتیکی برگشت پذیر  $dQ_{\text{برگشت پذیر}} = 0$  و بنابراین  $dS = 0$  یا آنتروپی ثابت باقی می ماند. به این نوع فرآیند نام آیزنتروپیک داده می شود که مشخص کننده آنتروپی ثابت است. به همین ترتیب فرآیند دما ثابت برگشت پذیر می تواند به وسیله انتگرال گرفتن از رابطه (۵-۱۷) معرفی شود.

$$Q_{\text{دما ثابت برگشت پذیر}} = T \Delta S \quad (5-23)$$

نمودار  $T-S$  و فرآیندهای برگشت ناپذیر

از معادله (۵-۲۱) معلوم می شود که آنتروپی برای یک فرآیند آدیاباتیکی برگشت ناپذیر باید افزایش یابد، اما مقدار افزایش آن نامعلوم است. از نظر فیزیکی، فرآیند برگشت پذیر شبه ساکن



شکل ۵-۱۰ فرآیندهای آدیاباتیکی برگشت پذیر و برگشت ناپذیر بر روی نمودار دما-انتالپی.

هر چه افزایش آنتروپی بیشتر باشد درجه برگشت ناپذیری بزرگتر است.

است یعنی از یک سلسله حالت‌های تعادلی تشکیل شده و می توانیم حالت سیستم را در هر مرحله از طول مسیر مشخص کنیم. فرآیند برگشت ناپذیر فرآیندی است که سیستم اساساً به خاطر تأثیرهای اصطکاکی،

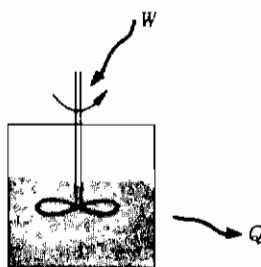
گرمای دمای ذاتی در بین سیستم یا تأثیرهای دیگر از حالت تعادلی دور می‌شود. در فرآیند برگشت‌ناپذیر، تغییر آنتروپی باید به وسیله تصور فرآیند برگشت‌پذیری مابین حالات انتهایی داده شده محاسبه شود. درجه تأثیری که اصطکاک یا گرمایان دما در تغییر حالت یک سیستم می‌گذارد باید صرف‌نظر از تحلیل ترمودینامیکی متعارف تعیین شود و معمولاً به صورت مبحثی در پدیده انتقال در نظر گرفته شود. برای فرآیند آدیاباتیکی فرآیندهای برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر مطابق آنچه در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده ظاهر خواهد شد، هر چه افزایش آنتروپی برای فرآیند برگشت‌ناپذیر بیشتر باشد می‌گوییم "درجه برگشت‌ناپذیری" بزرگتر است. توجه داشته باشید که فرآیند برگشت‌ناپذیر به صورت خط سایه‌دار ترسیم می‌شود، چون از یک سلسله حالات غیر تعادلی تشکیل شده و بدین ترتیب بر روی نمودار خواص ترمودینامیکی حالات تعادلی دقیقاً قابل ارائه نیست.

### ۵-۱۰ عوامل عملی برگشت‌ناپذیری

تاکنون دو مثال از فرآیندهای برگشت‌ناپذیر را در اشکال ۵-۳ و ۵-۴ نشان داده‌ایم. بنابراین اگر یک جسم فلزی داغ در تبادل حرارتی با یک جسم سردتر قرار گیرد و هر دو جسم به دمای تعادلی برسند، یک فرآیند برگشت‌ناپذیر خواهیم داشت. اگر دو جسم به صورت یک سیستم آدیاباتیکی کلی در نظر گرفته شود، افزایش آنتروپی برای جمع آنها مشاهده خواهد شد. اگر افزایش کار به صورت فرآیند چرخ‌پره‌دار مطابق شکل ۵-۱۱ صورت گیرد، این فرآیند برگشت‌ناپذیر می‌باشد زیرا نمی‌توانیم فرآیند را به وسیله افزایش حرارت به مخزن معکوس نماییم. جسم لغزنده علیه مقاومت اصطکاکی در شکل ۵-۱۲ معرف نوع مشابهی از فرآیند برگشت‌ناپذیر می‌باشد، زیرا کار  $W$  انجام شده به وسیله نیروی  $F$  نهایتاً به صورت حرارت  $Q$  در سطح یا اتمسفر محیط تلف می‌شود. دوباره نمی‌توانیم وضعیت را معکوس کنیم و انتظار داشته باشیم که وقتی حرارت به جسم اضافه کنیم جسم به حرکت درآید. اصطکاک سیال در لوله مثال مشابهی از فرآیند برگشت‌ناپذیر است. کار لازم است تا سیال را از میان لوله علیه مقاومت اصطکاکی دیواره عبور دهد و ما نمی‌توانیم به تأثیر یکسانی با افزایش حرارت به لوله دست یابیم.

بنابراین هرگاه انتقال حرارت با اختلاف دمای معینی یا اصطکاک صورت گیرد، فرآیند تا حدودی برگشت‌ناپذیر خواهد بود. تمام فرآیندهای واقعی برگشت‌ناپذیرند. بعضی از آنها بیشتر از

دیگران برگشت ناپذیرند. بعداً درخواهیم یافت که فرآیندهای برگشت پذیر خاصی معرف بهترین حالات ممکن برای دستگاههای تبدیل انرژی و تولید قدرت می باشند و بنابراین مورد مطالعه و توجه ما قرار می گیرند. درجه ای که ما را قادر می کند تا به وسیله چنین فرآیندهای ایده آلی به موضوع نزدیک شویم به مهارت طراحی مهندسی قسمت های مختلف دستگاه و عامل هزینه با توجه به شرایط اقتصادی حاکم بستگی دارد.



شکل ۵-۱۱ کار چرخ پره دار برگشت ناپذیر است.

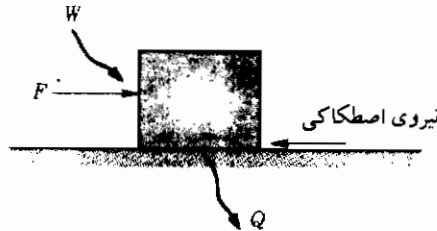
## ۵-۱۱ آنتروپی ماده خالص

نشان داده ایم که آنتروپی یکی از خواص سیستم است. آنتروپی یک خاصیت گسترده شبیه انرژی داخلی کل یا انتالپی کل می باشد که ممکن است از آنتروپی مخصوص بر اساس واحد جرم یا واحد مول سیستم محاسبه شود، به طوری که:

$$S = m s = n \bar{s}$$

برای مواد خالص مقادیر آنتروپی مخصوص می تواند با انتالپی و حجم مخصوص و خواص ترمودینامیکی دیگر مورد علاقه، مطابق با جداول گوناگون ضمیمه، جدول بندی شود. در ناحیه اشباع مایع - بخار آنتروپی مخصوص از خواص اشباع و کیفیت به همان ترتیب خواص دیگر به دست می آید، یعنی:

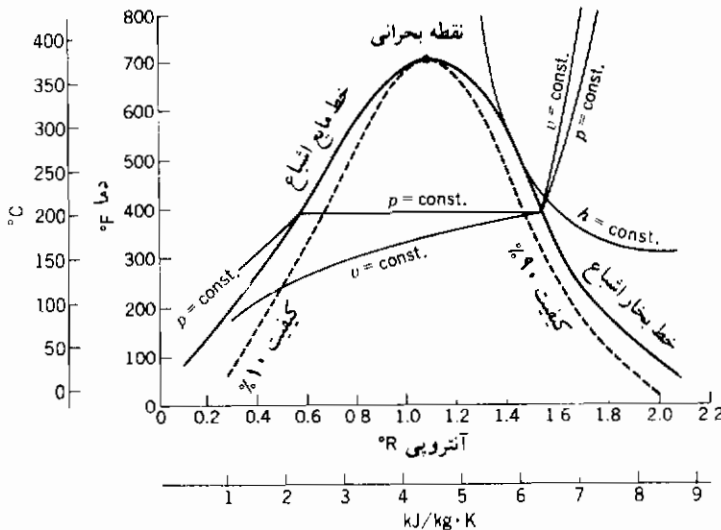
$$s = s_f + x s_{fg} \quad s_{fg} = s_g - s_f$$



شکل ۵-۱۲ جسم لغزنده برگشت ناپذیر است.

$$s = (1 - x)s_f + xs_g$$

دیده‌ایم که نمودار دما - آنتروپی وسیله‌ای مفید برای مطالعه فرآیندهای ترمودینامیکی است و نمودار  $T-s$  برای یک ماده خالص، مخصوصاً موقعی که سیکل‌های قدرت واقعی را مطالعه می‌کنیم، مفید خواهد بود. شکل ۵-۱۳ چنین نموداری را برای آب نشان می‌دهد و نمایش‌دهنده ظاهر کلی چنین

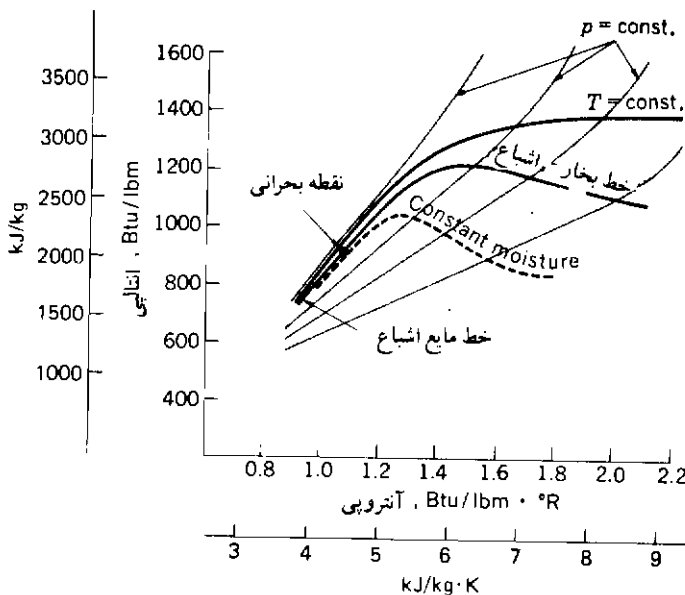


شکل ۵-۱۳ نمودار دما - آنتروپی برای آب

نمودارهایی برای مواد دیگر می‌باشد. این شکل خط اشباع را به صورت منحنی گنبدی شکل با نقطه بحرانی در رأس آن، خط مایع اشباع در طرف چپ و خط بخار اشباع در طرف راست نشان می‌دهد. تمام سطح زیر گنبد ناحیه مخلوط‌تر با خطوط مشخص شده مربوط به کیفیت ثابت می‌باشد. ناحیه چپ خط مایع اشباع ناحیه مایع متراکم است، در حالی که قسمت راست خط بخار اشباع ناحیه بخار داغ می‌باشد. در دماهای بالاتر از نقطه بحرانی تمایزی بین مایع و بخار نمی‌توان قائل شد، همچنین بعضی از خطوط نمونه فشار ثابت، حجم ثابت و انتالپی ثابت مشخص شده تا شکل عمومی چنین منحنی‌هایی را نشان دهد. باید توجه داشت که خط فشار ثابت در ناحیه اشباع یک خط دمای ثابت نیز هست.

#### نمودار مولیر

نمودار مولیر یک نقشه انتالپی بر حسب آنتروپی می‌باشد و این نقشه برای بخار آب در شکل ۵-۱۴ نشان داده می‌شود. نمودار مولیر بزرگی برای مقاصد محاسبه به صورت شکل ۴-A در ضمیمه ارائه می‌شود. نمودار  $h-s$  دارای شکلی کاملاً متفاوت با نمودار  $T-s$  می‌باشد. خط اشباع دارای شکل



شکل ۵-۱۴ نمودار انتالپی - آنتروپی برای آب

گنبدی می‌باشد، اما نقطه بحرانی در طرف چپ گنبد قرار می‌گیرد و با خط بخار اشباع به طرف بالا و سمت راست گنبد ادامه می‌یابد. خطوط کیفیت ثابت نیز دارای یک شکل گنبدی است و خطوط دمای ثابت در ناحیه داغ مشخص شده است. شکل کلی خطوط فشار ثابت نیز نشان داده می‌شود، نمودار  $h-s$  در ضمیمه اصولاً شامل نواحی اشباع و داغ است، چون این نواحی برای محاسبات واقعی خیلی مورد توجه است.

فرمولهای محاسبه آنتروپی برای جامد و بخار آب زیر  $32^\circ\text{F}$  در فصل ۳ به وسیله معادلات (۳-۱۰) و (۳-۱۱) داده شد.

## ۵-۱۲ تغییر آنتروپی برای گاز ایده آل

معادله (۵-۱۸) اساسی برای محاسبه تغییرات آنتروپی بین هر دو حالت انتهایی آماده می‌کند، به شرط آنکه فرآیند مناسب برگشت پذیری بتوان بین این حالات تصور کرد. یک گاز ایده آل مثال خوبی برای محاسباتی که بتوان انجام داد، ارائه می‌کند. خواننده به خاطر می‌آورد که برای یک گاز ایده آل، انتالپی و انرژی داخلی فقط توابعی از دما است (ما این را در فصل ۶ ثابت خواهیم کرد) و ممکن است به صورت زیر نوشته شود:

$$du = c_v dT \quad (5-24)$$

$$dh = c_p dT \quad (5-25)$$

برای یک فرآیند برگشت پذیر می‌توانیم جریان حرارت از معادله (۵-۱۷) را به صورت زیر بنویسیم

$$d'Q = T ds \quad (5-26)$$

گاز ایده آل از نوع ماده تراکم پذیر ساده است و بنابراین می‌توانیم بنویسیم

$$d'Q = du + pdv = T ds$$

بدین ترتیب:

$$ds = \frac{du}{T} + \frac{P}{T} dv \quad (5-27)$$

از معادله حالت گاز ایده آل داریم:

$$\frac{P}{T} = \frac{R}{v} \quad (5-28)$$

به طوری که، با استفاده از معادلات (5-24) و (5-28) معادله (5-27) به صورت زیر در می آید.

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v} \quad (5-29)$$

برای گرمای ویژه ثابت، معادله (5-29) می تواند مابین دو حالت انتهایی انتگرال گیری شود تا نتیجه زیر را بدهد:

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (5-30)$$

می توانیم یک رابطه دیگر ارائه دهیم. با توجه به این که،

$$d'Q = dh - vdp = T ds$$

دوباره با استفاده از معادله حالت گاز ایده آل همراه با معادله (5-25)،

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} \quad (5-31)$$

می توان از این رابطه برای گرمای ویژه ثابت انتگرال گرفت تا این نتیجه به دست آید.

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (5-32)$$

بدیهی است که تغییرات آنتروپی داده شده به وسیله روابط (5-30) و (5-32) برای فرآیند برگشت پذیر مابین حالات انتهایی داده شده  $(p_1, v_1, T_1)$  و  $(p_2, v_2, T_2)$  محاسبه می شود. چون آنتروپی یک خاصیت است، تغییر بین دو حالت انتهایی باید مستقل از فرآیند باشد. بدین ترتیب این روابط برای هر فرآیند گاز ایده آلی که بین این حالات انتهایی باشد به کار می رود.

در فصل ۲ نشان داده ایم که فرآیند آنتروپی ثابت (آدیاباتیک بازگشت پذیر) برای یک گاز



ایده آل با گرماهای ویژه ثابت به وسیله رابطه زیر نشان داده می شود.

$$pv^\gamma = \text{const.}$$

$$\text{که } \gamma = \frac{c_p}{c_v} \text{ می باشد.}$$

### ۵-۱۳ سیکل کارنو

تابعال نشان داده ایم که بازده تمام سیکل‌های برگشت پذیر که بین حدود دماهای یکسان کار کنند برابر است و به وسیله رابطه (۵-۱۰) نشان داده می شود. سیکل خاصی که این رابطه برای آن به کار می رود سیکل کارنو است که از چهار فرآیند برگشت پذیر زیر، مشخص شده در شکل ۵-۱۵ تشکیل می شود:

۱ - افزایش حرارت به صورت دما ثابت برگشت پذیر،  $ab$

۲ - فرآیند آدیاباتیک برگشت پذیر که کار به وسیله سیستم انجام داده می شود،  $bc$

۳ - دفع حرارت به صورت دما ثابت برگشت پذیر،  $cd$

۴ - فرآیند آدیاباتیک برگشت پذیر که کار بر روی سیستم انجام می دهد،  $da$

سیکل می تواند شامل هر ماده عاملی باشد، تا وقتی که این چهار فرآیند بترتیب صورت گیرد و همیشه سیستم به حالت ابتدایی خود بازگردد. در نمودار دما - آنتروپی سیکل کارنو دارای شکل مستطیلی مطابق شکل (الف ۵-۱۵) می باشد. در این نمودار  $da$  و  $bc$  فرآیندهای آنتروپی ثابت هستند در حالی که  $ab$  و  $cd$  بترتیب فرآیندهای برگشت پذیر افزایش و دفع حرارتند. از رابطه دما ثابت که در بالا اخذ شد، جریانهای حرارت را می توان به صورت زیر نوشت:

$$Q_H = T_H \Delta S$$

$$Q_L = T_L \Delta S$$

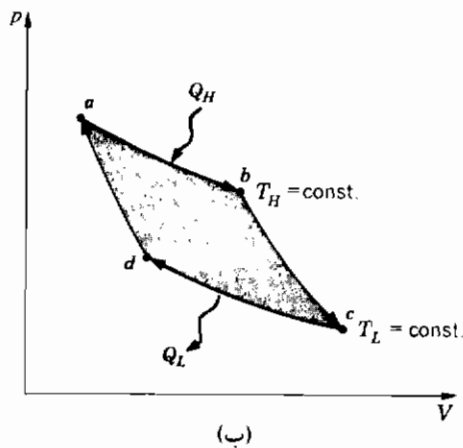
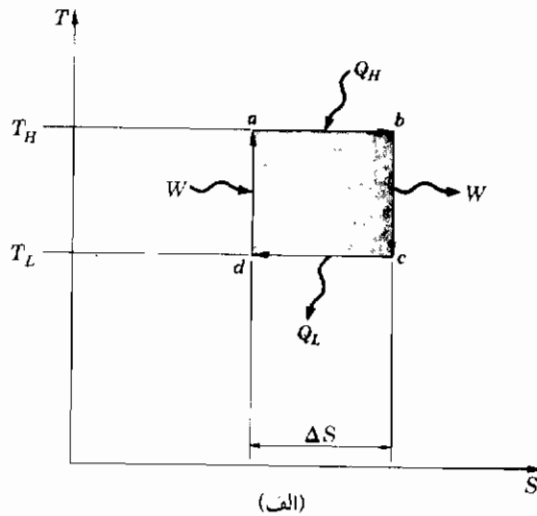
کار خالص خروجی سیکل برابر با اختلاف حرارت اضافه شده  $Q_H$  و حرارت دفع شده  $Q_L$  است.

$$W_{\text{net}} = Q_H - Q_L = (T_H - T_L) \Delta S \quad (۵-۳۳)$$

و بازده حرارتی سیکل می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\eta_t = \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{(T_H - T_L) \Delta S}{T_H \Delta S} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

البته این نتیجه با معادله (۵-۱۰) سازگار است زیرا تعریف ما از آنتروپی از تعریف دمای مطلق مورد استفاده جهت رسیدن به معادله (۵-۱۰) پیروی می‌کند.



شکل ۵-۱۵ نمایش ترسیمی سیکل کارنو

(الف) نمودار T-S (ب) نمودار p-V برای گاز ایده آل

برطبق معادله (۵-۳۳) کار خالص خروجی سیکل کارنو به صورت ترسیمی برابر با سطح داخل مربع مستطیل روی نمودار  $T-S$  می باشد. با تعمیم این بیان بسادگی می توان گفت که کارخالص خروجی هر سیکل برگشت پذیری برابر با سطح محصور شده در نمودار  $T-S$  می باشد.

اگر سیکل کارنو با هوا یا گاز ایده آل دیگری به عنوان سیال عامل کار کند، نمودار فشار - حجم برای این سیکل مانند شکل (ب ۵-۱۵) ظاهر می شود. افزایش حرارت از  $a$  تا  $b$  به صورت فرآیند دماثابت صورت می گیرد و به وسیله انبساط آنتروپی ثابت از  $b$  تا  $c$  ادامه می یابد. برای یک مکانیزم سیلندر - پیستون، در هر دو این فرآیندها بر روی سطح پیستون کار انجام می شود و بنابراین یک کار خروجی موجود است زیرا نیروی وارده بر پیستون در همان جهت تغییر مکان عمل می کند. در امتداد سیکل،  $c-d$  فرآیند دفع حرارت به صورت دماثابت است و  $d-a$  تراکم آنتروپی ثابت است. در این دو فرآیند آخر بر روی گاز کار انجام شده است. برای یک مکانیزم سیلندر - پیستون، کار خالص خروج از سیکل برابر سطح محصور نمودار  $p-V$  خواهد بود و باید منطبق بر سطح محصور بر روی نمودار  $T-S$  باشد.

### مثال ۵-۱ تغییر آنتروپی در یک فرآیند گرمایش

۵ lbm بخار آب اشباع در ۵۰ psia تا دمای ۵۰۰ °F حرارت داده می شود. فرآیند گرمایش در فشار ثابت صورت می گیرد، تغییر در آنتروپی را محاسبه کنید.

**حل:** حل این مسأله شامل روش ساده انتخاب مقادیر آنتروپی از جداول بخار آب است. کل تغییر در آنتروپی برابر است با

$$\Delta S = m(s_2 - s_1)$$

در ۵۰ psia مایع اشباع شده  $s_f = 0.4113 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$  و در ۵۰۰ °F آنتروپی برابر است با  $s_2 = 1.7909 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$  می باشد. تغییر آنتروپی برابر است با:

$$\Delta S = (5)(1.7909 - 0.4113) = 6.898 \text{ Btu/}^\circ\text{R} \quad (13.10 \text{ kJ/K})$$

### مثال ۵-۲ گرمایش دما ثابت برگشت پذیر

آب در یک فرآیند دما ثابت برگشت پذیر در ۲۰۰ kPa تبخیر می شود. انتقال حرارت را به ازای هر پوند جرم در این فرآیند محاسبه کنید.

**حل:** برای فرآیند دما ثابت برگشت پذیر داریم:

$$Q = T \Delta S$$

و برای تبخیر، این رابطه به صورت زیر در می آید.

$$Q = T(s_g - s_f) = T s_{fg}$$

برای حالات اشباع در ۲۰۰ kPa، از جداول بخار آب به دست می آوریم:

$$T = 120.2^\circ\text{C} = 393.35\text{ K}$$

$$s_{fg} = s_g - s_f = 7.1271 - 1.5301 = 5.597\text{ kJ/kg.K}$$

بدین ترتیب، انتقال حرارت برابر است با

$$Q = (393.35)(5.597) = 2201.6\text{ kJ/kg}$$

توجه داریم که حرارت اضافه شده طی فرآیند فشار ثابت مساوی تغییر انتالپی است که برای این مسأله  $h_{fg}$  می باشد. با مراجعه به جداول بخار آب بدست می آوریم  $h_{fg} = 2201.6\text{ kJ/kg}$ . تفاوت این دو عدد در نتیجه سرراست کردن اعداد جدول می باشد.

### مثال ۵-۳ تراکم پلی تروپیک هوا

هوا در طی یک فرآیند پلی تروپیک برگشت پذیر از حالت ابتدایی ۱۵ psia و ۱۰۰ °F به فشار نهایی ۵۰ psia تراکم می شود. توان پلی تروپیک  $n = 1/3$  می باشد. تغییر آنتروپی به ازای

هر پوند جرم هوا را محاسبه کنید.

**حل:** ممکن است تغییر آنتروپی را از معادله (۵-۳۲) اگر دمای نهایی معلوم باشد محاسبه کنیم. برای فرآیند پلی تروپیک از فصل چهارم داریم:

$$pv^n = \text{const.}$$

با به کار بردن رابطه گاز ایده آل  $v = \frac{RT}{p}$ ، این معادله می تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n}$$

برای شرایط این مسأله

$$\begin{aligned} T_2 &= (100 + 460) \left(\frac{50}{15}\right)^{(1.3-1)/1.3} \\ &= 739^\circ\text{R} = 279^\circ\text{F} \quad (137.2^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

با جایگزین کردن این دما در معادله (۵-۳۲) به دست می آید:

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= (0.24) \ln \frac{739}{560} - \frac{53.35}{778} \ln \frac{50}{15} \\ &= -0.0159 \text{ Btu/lbm. }^\circ\text{R} \quad (-0.0666 \text{ kJ/kg.K}) \end{aligned}$$

#### مثال ۵-۴ فرآیند خفگی

هوا در میان تویی متخلخل شبیه آنچه در شکل ۵-۴ نشان داده شده خفه می شود. شرایط ورودی ۳۰ psia و ۸۵ °F و فشار خروجی ۱۵ psia می باشد. فرآیند آدیاباتیک است و از انرژیهای جنبشی می توان صرف نظر کرد. تغییر آنتروپی به ازای هر پوند هوا را محاسبه کنید.

**حل:** این یک فرآیند برگشت ناپذیر است، اما اگر فرآیند برگشت پذیری بین حالات انتهایی داده شده برقرار باشد، تغییر آنتروپی می تواند محاسبه شود. برای یک گاز ایده آل انتالپی فقط تابع دما است

به طوری که رابطه  $h_1 = h_2$  به معادله  $T_1 = T_2$  کاهش می یابد. سپس می توانیم معادله (۵-۳۲) را به کار ببریم

$$s_2 - s_1 = c_p \ln 1.0 - R \ln \frac{p_2}{p_1} = - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

با به کار بردن اطلاعات داده شده، این معادله به صورت زیر درمی آید.

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= - \frac{53.35}{778} \ln \frac{15}{30} \\ &= + 0.0475 \text{ Btu/lbm.}^\circ\text{R} \quad (0.1989 \text{ kJ/kg.K}) \end{aligned}$$

توجه داشته باشید که تغییر آنتروپی مثبت است، همچنان که باید برای یک فرآیند آدیاباتیک برگشت ناپذیر باشد.

## مثال ۵-۵ انتقال حرارت با اختلاف دمای معینی

یک منبع حرارتی در  $1000 \text{ K}$  در تبادل حرارتی با منبع دیگری در  $500 \text{ K}$  قرار می گیرد.  $1000 \text{ kJ}$  حرارت از منبع دما پایین منتقل می شود. تغییر آنتروپی جهان را در نتیجه این فرآیند تبادل حرارت محاسبه کنید.

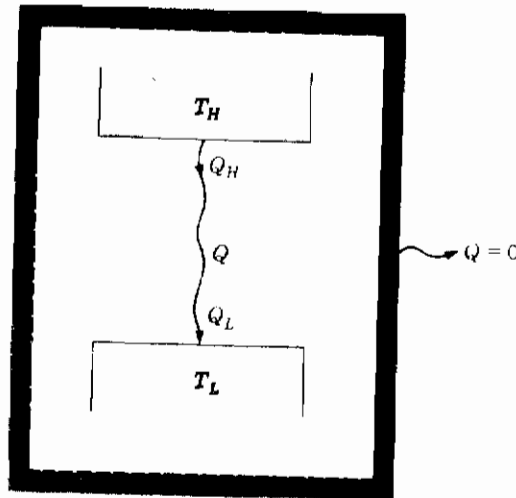
**حل:** می توانیم هریک از منابع را به عنوان سیستم فرعی در نظر بگیریم و به طور جداگانه تغییرات آنتروپی آنها را محاسبه کنیم، سپس تغییر آنتروپی جهان از جمع جبری این کمیتها به دست می آید. یک فرآیند دما ثابت برای هر دو منبع فرض می کنیم. بدین ترتیب

$$\Delta S_H = \frac{Q_H}{T_H} \quad T_H = 1000 \text{ K برای}$$

$$\Delta S_L = \frac{Q_L}{T_L} \quad T_H = 500 \text{ K برای}$$

$$\Delta S_H = - \frac{1000}{1000} = - 1.0 \text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_L = + \frac{1000}{500} = + 2.0 \text{ kJ/K}$$



شکل مثال ۵-۵

تغییر آنتروپی جهان برابر است با

$$\Delta S_{\text{جهان}} = \Delta S_H + \Delta S_L = -1.0 + 2.0 = 1.0 \text{ kJ/K}$$

طرحواره برای این فرآیند نشان می‌دهد که دو منبع در نظر گرفته شده با هم یک سیستم آدیاباتیک را تشکیل می‌دهند. فرآیند انتقال حرارت که در داخل این سیستم صورت می‌گیرد برگشت ناپذیر است چون شامل انتقال حرارت با اختلاف دمای معین است. بنابر این ما یک فرآیند آدیاباتیک برگشت ناپذیر داریم و تا جایی که مربوط به جهان می‌شود افزایش آنتروپی تجربه می‌گردد.

### مثال ۵-۶ توربین بخار آب آنتروپی ثابت

بخار آب بطور برگشت پذیر و آدیاباتیک در یک توربین از ۴۰۰ psia و ۸۰۰ °F تا ۵۰ psia منبسط می‌شود. کار انجام شده به ازای هر پوند بخار را در یک فرآیند جریان دائم محاسبه کنید. از تغییرات انرژی جنبشی صرف نظر کنید.

**حل:** برای یک فرآیند آدیاباتیک برگشت پذیر داریم

$$s_1 = s_2$$

معادله انرژی جریان دائم برای این فرآیند به صورت زیر درمی آید:

$$W = h_2 - h_1 \quad (a)$$

مقادیر  $h_1$  و  $s_1$  مستقیماً می تواند از جداول بخار آب داغ به دست آید.

$$h_1 = 1416.6 \text{ Btu/lbm} \quad (3925.0 \text{ kJ/kg})$$

$$s_1 = 1.6844 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R} \quad (7.0514 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})$$

اکنون حالت نهایی فرآیند جریانی توسط دو خاصیت زیر بدست می آید.

$$s_2 = s_1 = 1.6844$$

$$p_2 = 50 \text{ psia}$$

بدین ترتیب، ما دوباره با مراجعه به جداول بخار آب (جداول داغ) در می یابیم که

$$T_2 = 315.2^\circ\text{F} \quad (157.3^\circ\text{C})$$

$$h_2 = 1192.1 \text{ Btu/lbm} \quad (2773 \text{ kJ/kg})$$

حالا کار از معادله (a) محاسبه می شود.

$$W = h_2 - h_1$$

$$= 1192.1 - 1416.6$$

$$= -224.5 \text{ Btu/lbm} \quad (-522 \text{ kJ/kg})$$

علامت منفی نشان می دهد که کار به چیزهای خارجی نسبت به توربین داده می شود.



### ۵-۱۴ انرژی دسترس پذیر<sup>۱</sup> (مفید یا قابلیت کاردهی<sup>۲</sup>) و انرژی دسترس ناپذیر (غیرمفید)

دیدیم که موتور حرارتی که در حدود دماهای داده شده عمل می کند یک بازده حداکثری دارد. برای مقدار حرارت داده شده در حد دمای بالایی، مقدار کار حداکثری وجود دارد که می توانیم به عنوان خروجی دستگاه به دست آوریم. البته می توانیم کار خروجی را یا با ازدیاد حد دمای بالایی سیکل یا با کاهش حد دمای پایینی افزایش دهیم. از لحاظ عملی حد دمای پایینی کمیتی نیست که بتوان تا بینهایت کاهش داد؛ برای کاهش دادن آن به دمای پایین تر از دمای محیط، باید یک دستگاه مبرد با کار ورودی تهیه کرد که عملکرد کلی سیستم را تضعیف می کند. به این دلیل معمول است که برای عملکرد موتور حرارتی صحبت پایین ترین دمای در دسترس  $T_0$  می شود. این دما معمولاً دمای محیط محلی یا دمای چاه حرارتی<sup>۳</sup> بزرگی مانند دریاچه و یا رودخانه می باشد.

با دانستن پایین ترین دمای در دسترس  $T_0$  که با آن می توان حرارت را دفع کرد، موتور برگشت پذیر کوچکی که حرارت در دمای  $T$  دریافت می کند حداکثر قدرت خروجی زیر را تولید خواهد کرد:

$$d'W = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) d'Q \quad (5-34)$$

$d'Q$  حرارت اضافه شده در دمای بالایی می باشد. انرژی دسترس پذیر سیستم قسمتی از حرارت اضافه شده به سیستم است که می تواند در یک سلسله از موتورهای برگشت پذیر که بین دمای سیستم و پایین ترین دمای در دسترس  $T_0$  عمل می کنند به کار تبدیل شود. این کمیت به وسیله انتگرال معادله (۵-۳۴) به دست می آید و به وسیله حداکثر  $W$  مشخص می شود.

$$W_{\text{حداکثر خروجی}} = \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) d'Q \quad (5-35)$$

#### 1- Available energy

۲- این مفهوم با سلفه های گوناگون ترجمه شده است و چند معادل فارسی تاکنون توسط افراد مختلف بکار گرفته

شده است. (مترجم)

#### 3- Heat sink

انرژی دسترس‌ناپذیر تفاوت بین کل حرارت اضافه‌شده و انرژی دسترس‌پذیر می‌باشد. حالا فرض کنید که می‌خواهیم تغییر انرژی دسترس‌پذیر سیستمی را که از حالت ۱ به حالت ۲ تغییر میکند به دست آوریم. بنابراین از رابطه (۵-۳۵) بین این حالات انتگرال می‌گیریم تا حداکثر افزایش کار خروجی را پیدا کنیم. حداکثر کار خروجی هنگامی اتفاق می‌افتد که حرارت به‌طور برگشت‌پذیر افزوده شود بنابراین جهت محاسبه انتگرال، فرآیند برگشت‌پذیری بین این حالات انتخاب می‌کنیم.

$$W_{\text{حداکثر خروجی}} = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) d'Q_{\text{برگشت}}$$

سپس می‌توانیم دوباره آنتروپی را به‌خاطر آورده و بنویسیم

$$W_{\text{حداکثر خروجی}} = Q - T_0(S_2 - S_1) \quad (5-36)$$

$S_1$  و  $S_2$  به ترتیب آنتروپی‌های ابتدایی و انتهایی است و حداکثر خروجی  $W$  افزایش انرژی دسترس‌پذیر در اثر یک فرآیند برگشت‌پذیر بین حالات ۱ و ۲ را بیان می‌کند.

البته برداشت غالب در این بحث این است که هرچه قسمت انرژی حرارتی دسترس‌پذیر برای تولید کار بزرگتر باشد، دمای سیستم بالاتر خواهد بود. از معادله (۵-۳۶) می‌بینیم که افزایش انرژی دسترس‌ناپذیر به وسیله جمله  $T_0(S_2 - S_1)$  معرفی می‌شود.

## مثال ۵-۲ "اتلاف" انرژی دسترس‌پذیر

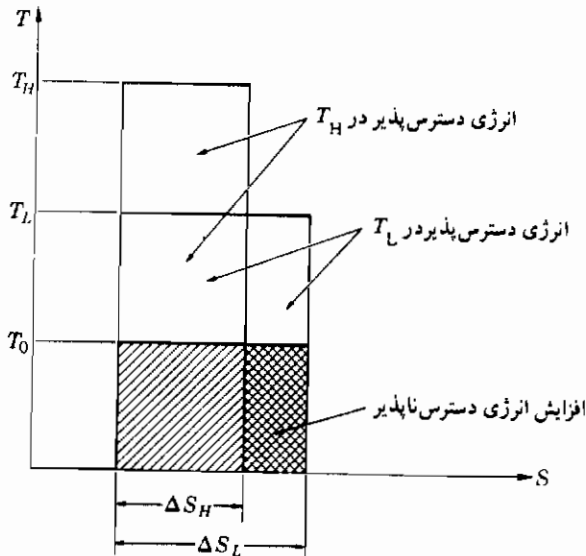
چه مقدار انرژی دسترس‌پذیر در فرآیند مثال ۵-۵ با فرض  $T_0 = 20^\circ\text{C} = 293\text{ K}$  از دست داده می‌شود؟

**حل:** اگر  $1000\text{ kJ}$  حرارت دفع‌شده از منبع در دمای بالا ( $1000\text{ K}$ ) به‌موتور برگشت‌پذیری که بین آن دما و  $293\text{ K}$  عمل می‌کند افزوده شود، کار تولید شده برابر خواهد بود با

$$W = \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) Q_H = \left(1 - \frac{293}{1000}\right)(1000) = 707\text{ kJ}$$

$707\text{ kJ}$  قسمت "دسترس‌پذیر"  $1000\text{ kJ}$  در منبع دمای بالا می‌باشد. هرچند اگر همین  $1000\text{ kJ}$

به موتور برگشت پذیری که بین  $500\text{ K}$  و  $293\text{ K}$  کار می‌کند افزوده می‌شد، کار تولید شده تنها برابر بود با



شکل مثال ۵-۲

$$W = \left(1 - \frac{T_0}{T_L}\right) Q_L = \left(1 - \frac{293}{500}\right) (1000) = 414 \text{ kJ}$$

بنابراین، در نتیجه انتقال حرارت  $1000\text{ kJ}$  با  $500\text{ K}$  اختلاف دما، اتلاف انرژی دسترس پذیر به اندازه  $293\text{ kJ} = 707 - 414$  بوده است. انرژی‌های دسترس پذیر و دسترس ناپذیر در این دو دما در شکل ضمیمه به صورت ترسیمی نشان داده می‌شود. البته اگر  $1000\text{ kJ}$  مستقیماً به  $T_0$  منتقل می‌شد، تمام انرژی دسترس پذیر تلف می‌شد.

### مثال ۵-۸ گرمایش، انرژی دسترس پذیر را افزایش می‌دهد

چه مقدار انرژی دسترس پذیر بوسیله گرمایش  $1\text{ kg}$  هوا به صورت برگشت پذیر در فشار ثابت  $1/5\text{ atm}$  از  $40^\circ\text{C}$  تا  $250^\circ\text{C}$  با پایین ترین دمای در دسترس  $20^\circ\text{C}$  اضافه می‌شود؟

**حل:** برای این مسأله با گرفتن انتگرال از معادله (۵-۳۵)، افزایش انرژی دسترس پذیر را پیدا می‌کنیم. برای فرآیند فشار ثابت و واحد جرم،

$$d'Q = c_p dT$$

بنابراین

$$\begin{aligned} W_{\text{حداکثر}} &= \int_{T_1}^{T_2} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) c_p dT \\ &= c_p (T_2 - T_1) - c_p T_0 \ln \frac{T_2}{T_1} \end{aligned}$$

که ما تشخیص می‌دهیم  $T_0$  ثابت است. داریم  $T_0 = ۲۰^\circ\text{C} = ۲۹۳\text{ K}$ ،  $T_1 = ۴۰^\circ\text{C} = ۳۱۳\text{ K}$ ،  $T_2 = ۲۵۰^\circ\text{C} = ۵۲۳\text{ K}$  و  $c_p = ۰/۲۴\text{ Btu/lbm}\cdot^\circ\text{F} = ۱۰۰۵\text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$  برای هوای باشد. بدین ترتیب

$$W_{\text{حداکثر}} = (1005) [(523 - 313) - (293) \ln \frac{523}{313}] = 5.988 \times 10^4\text{ J/kg}$$

کل حرارت افزوده شده برابر است با  $c_p(T_2 - T_1) = ۲/۱۱ \times ۱۰۵\text{ J/kg}$ ، بنابراین افزایش انرژی دسترس پذیر برابر است با  $۱۵/۱۱ \times ۱۰۴\text{ J/kg}$  (توجه:  $(۲۱/۱ - ۵/۹۸۸) \times ۱۰۴ = ۱۵/۱۱ \times ۱۰۴$ ). داشته باشید که فرآیند افزایش حرارت باعث ازدیاد هر دو انرژی دسترس پذیر و دسترس ناپذیر هوا می‌گردد.

### مثال ۵-۹ افزودن کار، انرژی دسترس پذیر را زیاد می‌کند

جعبه صلب عایق شده‌ای به حجم  $۱۰\text{ ft}^3$  محتوی هوا در  $۱۴/۷\text{ psia}$  و  $۱۰۰^\circ\text{F}$  می‌باشد. کار چرخ پره‌داری به جعبه اضافه می‌شود تا دما را به  $۴۰۰^\circ\text{F}$  افزایش دهد. تغییر انرژی دسترس پذیر هوا را برای  $T_0 = ۷۰^\circ\text{F}$  محاسبه کنید.

**حل:** این مثال نکته مهمی را نشان می‌دهد که انرژی دسترس پذیر سیستم ممکن است با افزایش حرارت یا افزایش کار تغییر کند. به عبارت دیگر، هر تغییری در حالت سیستم تولید تغییری در بیشترین

مقدار کار می‌کند، یعنی مقدار کاری که می‌توانست در هنگام عملکرد مابین دمای سیستم و  $T_0$ ، پایین‌ترین دمای در دسترس به دست آید. ابتدا کمیات عددی مورد نیاز را محاسبه می‌کنیم. جرم هوا برابر است با

$$m = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{(14.7)(144)(10)}{(53.35)(560)} = 0.709 \text{ lbm} \quad (0.322 \text{ kg})$$

از قانون اول

$$Q + W = \Delta U = mc_v(T_2 - T_1)$$

که  $W$  کار افزوده شده می‌باشد. جعبه عایق است بنابراین  $Q = 0$  می‌باشد و

$$W = (0.709)(0.1715)(400 - 100) = 36.48 \text{ Btu} \quad (38.49 \text{ kJ})$$

از رفتار گاز ایده‌آل در حجم ثابت داریم:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

و

$$p_2 = 14.7 \left( \frac{860}{560} \right) = 22.58 \text{ psia} \quad (155.7 \text{ kPa})$$

تغییر آنتروپی برای هوا می‌تواند از معادله (۵-۳۰) محاسبه شود.

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \\ &= (0.1715) \ln \left( \frac{860}{560} \right) = 0.0736 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R} \end{aligned}$$

$$S_2 - S_1 = m(s_2 - s_1) = (0.709)(0.0736) = 0.0522 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$$

حالا برای محاسبه انرژی دسترس پذیر، فرآیند برگشت پذیری بین حالات اولیه و انتهایی تصور می‌کنیم و بر طبق آن معادله (۵-۳۶) را محاسبه می‌کنیم. بوضوح فرآیند برگشت پذیر مورد علاقه یک فرآیند گرمایش در حجم ثابت است که

$$Q = mc_v(T_2 - T_1) = 36.48 \text{ Btu} \quad (38.49 \text{ kJ})$$

سپس با محاسبه معادله (۵-۳۶)

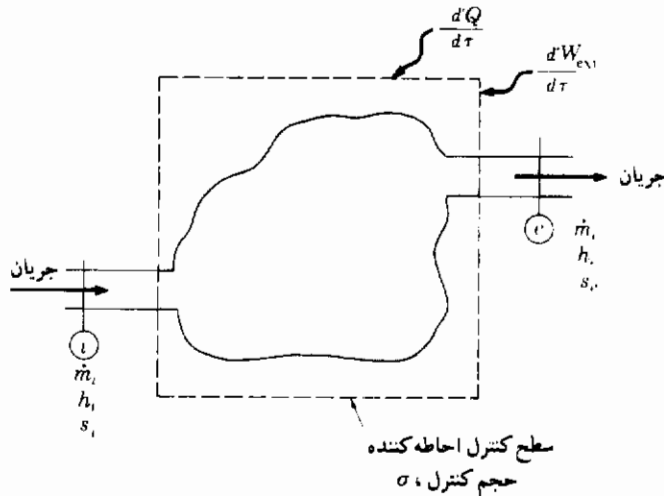
$$\begin{aligned} W_{\text{حداکثر خروجی}} &= Q - T_0(s_2 - s_1) \\ &= 36.48 - (530)(0.0522) \\ &= 8.814 \text{ Btu} \quad (9.299 \text{ kJ}) \end{aligned}$$

نکته مهم در این مثال این است که انرژی دسترس پذیر یک سیستم می تواند به وسیله هر عملی که حالت سیستم را تغییر دهد، تغییر کند، چه این عمل به طور بازگشت پذیر اتفاق بیفتد و چه نیفتد. در این مورد تغییر حالت در نتیجه افزایش کار برگشت ناپذیر چرخ پره دار صورت می گیرد، اما افزایش انرژی دسترس پذیر به همان اندازه است که با دادن مقدار مشابه حرارت حاصل می شود.

به طور خلاصه،  $8/814 \text{ Btu}$ ، معرف بیشترین مقدار کاری که می توانست تولید شود می باشد، اگر هوا به طور برگشت پذیر در حجم ثابت از  $400^\circ\text{F}$  تا  $100^\circ\text{F}$  با پایین ترین دمای در دسترس  $70^\circ\text{F}$  سرد می شد.

## ۵-۱۵ تحلیل قانون دوم برای حجم کنترل

قبلاً درباره تحلیل قانون اول انرژی برای یک حجم کنترل (سیستم باز) در فصل چهارم بحث کردیم و روشهای محاسبه ای را که می توان در چنین سیستمهایی به کار گرفت، نشان دادیم. حالا حجم کنترل را از نقطه نظر قانون دوم همچنان که در شکل ۵-۱۶ نشان داده شده است بررسی می کنیم. در این نمودار سیال از میان حجم کنترل از قسمت  $i$  تا قسمت  $e$  عبور می نماید در حالی که کار خارجی به حجم کنترل داده می شود. فرض می کنیم که مرز حجم کنترل در دمای محیط  $T_0$  باشد و تمام انتقال حرارت  $Q$  در این مرز اتفاق بیفتد. قبلاً ذکر کرده ایم که آنتروپی یک خاصیت است، بنابراین می تواند مانند انتالپی و انرژی داخلی انتقال یابد. جریان آنتروپی یک خاصیت است، بنابراین می تواند مانند انتالپی و انرژی داخلی انتقال یابد. جریان آنتروپی به داخل حجم کنترل در نتیجه انتقال جرم برابر  $\dot{m}_i s_i$  است و جریان آنتروپی خارج شده از حجم کنترل برابر  $\dot{m}_e s_e$  می باشد، با فرض اینکه خواص در مقاطع  $i$  و  $e$



شکل ۵-۱۶ حجم کنترل برای تحلیل قانون دوم

یکسان باشند. آنتروپی همچنین می‌تواند به‌خاطر انتقال حرارت در مرز حجم کنترل به‌حجم کنترل اضافه شود. با تشخیص اینکه حرارت ممکن است در چند محل اضافه شود و دما ممکن است تغییر کند، می‌نویسیم،

$$\text{آنتروپی از انتقال حرارت در سطح} = \int_{\text{سطح}} \frac{1}{T_i} \frac{d'Q_i}{d\tau} \quad (5-37)$$

حجم کنترل به‌داخل جریان می‌یابد.

که انتگرال در تمام سطح حجم کنترل گرفته می‌شود در جایی که انتقال حرارت صورت می‌گیرد و  $T_i$  دمای سطح مربوط به هر  $d'Q_i$  می‌باشد. به‌علاوه یک افزایش آنتروپی در حجم کنترل در نتیجه انباشت جرم یا برگشت ناپذیریهای داخلی، اصطکاک سیال و غیره می‌تواند موجود باشد. ما این جمله انبار یا انباشت را با  $\left(\frac{dS}{d\tau}\right)_\sigma$  مشخص خواهیم کرد که از زیرنویس  $\sigma$  مانند قبل برای مشخص کردن یک کمیت داخلی نسبت به حجم کنترل استفاده می‌شود. در نهایت، می‌توانیم تشخیص دهیم که ممکن است چندین جریان به‌داخل و یا خارج از حجم کنترل موجود باشد و مجموعه زیر را برای تمام چنین جریانهایی جهت بدست آوردن کل تولید آنتروپی برای حجم کنترل انجام می‌دهیم:

$$\left(\frac{dS}{d\tau}\right)_{\text{تولیدشده}} = \underbrace{\sum_{\text{خارج}} \dot{m}_e s_e}_{\text{انباشت آنتروپی}} - \underbrace{\sum_{\text{داخل}} \dot{m}_i s_i}_{\text{آنتروپی داخل شده}} - \underbrace{\int_{\text{سطح}} \frac{1}{T_i} \frac{d'Q_i}{d\tau}}_{\text{آنتروپی خارج شده}} + \left(\frac{dS}{d\tau}\right)_\sigma \quad (5-38)$$

اگر تصور شود که این فرآیند جریانی در طول کوچکی از زمان  $d\tau$  اتفاق می‌افتد، معادله (۵-۳۸) به المانهای جرمی که در آن لحظه درگیر می‌باشند مربوط می‌شود و طرف راست معادله (۵-۳۸) معادل نوشتن برای سیستم بسته شامل تمام المانهای جرم است.

$$(dS)_{\text{تولیدشده}} = \Delta S - \int_{\text{سطح}} \frac{d'Q}{T} \quad (5-39)$$

مطابق قانون دوم ترمودینامیک این کمیت باید بزرگتر یا مساوی صفر باشد. بنابراین برای معادله (۵-۳۸) می‌نویسیم

$$\left(\frac{dS}{d\tau}\right)_{\text{تولیدشده}} \geq 0 \quad (5-40)$$

علامت تساوی مربوط به فرآیندهای برگشت پذیر می‌باشد در حالی که نامساوی برای فرآیندهای برگشت ناپذیر به کار می‌رود. برای جریان دائم و حالت دائم تغییری در داخل حجم کنترل نسبت به زمان وجود ندارد بنابراین  $\left(\frac{dS}{d\tau}\right) = 0$ ،  $\dot{m}_i = \dot{m}_e$  و

$$\sum_{\text{خارج}} \dot{m}_e s_e - \sum_{\text{داخل}} \dot{m}_i s_i \geq \int_{\text{سطح}} \frac{1}{T_i} \frac{d'Q_i}{d\tau} \quad (5-41)$$

برای یک فرآیند جریان دائم، حالت دائم آدیاباتیک،  $\frac{d'Q_i}{d\tau} = 0$  و معادله (۵-۴۱) به صورت زیر در می‌آید.

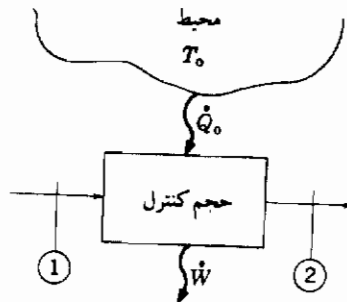
$$s_e \geq s_i \quad (5-42)$$

## ۵-۱۶ مقدار کاردهی و مقدار برگشت ناپذیری در جریان دالم

قبلاً قابلیت اجرای تحلیل انرژی جریان دائم را برای سیستمهای واقعی تولید قدرت دیده‌ایم. بخشهای قبلی نشان می‌دهد که از اصل ازدیاد آنتروپی می‌توان محدودیت‌های مسیرهای انتقال حرارت



را در فرآیندهای جریانی و غیرجریانی معلوم نمود. حالا با استفاده از این اصول مقدار کار خروجی حداکثر را که می‌توانیم از دستگاه جریان دائم به دست آوریم، مطابق شکل ۵-۱۷ پیش‌بینی می‌کنیم. نمودار را با فرض مثبت بودن کاری که حجم کنترل را ترک می‌کند رسم کرده‌ایم زیرا علاقه‌مندیم که



شکل ۵-۱۷ مقدار کاردهی در جریان دائم

توان خروجی را به حداکثر برسانیم. بنابراین معادله انرژی جریان دائم برابر است با

$$\begin{aligned} \dot{m}(h_1 + KE_1 + PE_1 + \dots) + \dot{Q}_0 \\ = \dot{m}(h_2 + KE_2 + PE_2 + \dots) + \dot{W} \end{aligned} \quad (5-43)$$

و نرخ تولید آنتروپی از معادله (۵-۳۸) به دست می‌آید.

$$\left(\frac{dS}{dt}\right) = \dot{m}s_2 - \left(\dot{m}s_1 + \frac{\dot{Q}_0}{T_0}\right) \geq 0 \quad (5-44)$$

در حالی که فرض می‌کنیم تمام حرارت  $\dot{Q}_0$  از محیط در  $T_0$  به دست آید و این دما در مرز حجم کنترل می‌باشد. با ترکیب معادله (۵-۴۳) و (۵-۴۴) می‌دهد.

$$\dot{m}(s_2 - s_1)T_0 - \dot{m}[(h_2 - h_1) + KE_2 - KE_1 + PE_2 - PE_1 + \dot{W}] \geq 0$$

$$\dot{W} \leq \dot{m} [(h + KE + PE - T_0 s)_1 - (h + KE + PE - T_0 s)_2] \quad (5-45)$$

در بسیاری از مسائل واقعی از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل می‌توان صرف‌نظر کرد و بدست می‌آوریم:

$$\dot{W} \leq \dot{m} [(h - T_0 s)_1 - (h - T_0 s)_2] \quad (5-46)$$

کمیت  $(h - T_0 s)$  تابع کاردهی جریان دائم،  $b$ ، نامیده می‌شود

$$b = h - T_0 s \quad (5-47)$$

و کار خروجی حداکثر به‌ازای واحد جرم برابر با کاهش این تابع خواهد بود

$$\dot{W}_{\text{حداکثر خروجی}} = \dot{m}(b_1 - b_2) \quad (5-48)$$

کار خروجی واقعی کمتر از این مقدار خواهد بود. مقدار برگشت‌ناپذیری به‌صورت اختلاف بین حداکثر کار خروجی ممکن و کار خروجی واقعی تعریف می‌شود یا

$$\dot{I} = \dot{W}_{\text{max}} - \dot{W}_{\text{act}} = \dot{m}(b_1 - b_2) - \dot{W}_{\text{act}} \quad (5-49)$$

اگر فرآیند آدیاباتیک باشد و انرژیهای جنبشی ناچیز باشد، کارخروجی واقعی باید برابر کاهش در انتالپی باشد یا

$$\dot{W}_{\text{act}} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (5-50)$$

با ترکیب روابط بالا برای فرآیند آدیاباتیک می‌دهد،

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{m}[(h - T_0 s)_1 - (h - T_0 s)_2] - \dot{m}(h_1 - h_2) \\ &= \dot{m}T_0(s_2 - s_1) \end{aligned} \quad (5-51)$$

هنگامی که چند جریان ورود و خروج از حجم کنترل مطابق شکل ۵-۱۸ باشد باید یک مجموعه از

توابع کاردهی برای کلیه آنها انجام داد.

$$\dot{W}_{max} = \sum \dot{m}_i b_i - \sum \dot{m}_e b_e \quad (۵-۵۲)$$

و

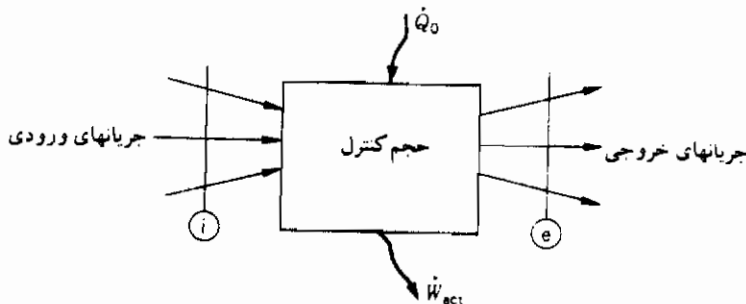
$$\dot{I} = \dot{W}_{max} - \dot{W}_{act} = \sum \dot{m}_i b_i - \sum \dot{m}_e b_e - \dot{W}_{act} \quad (۵-۵۳)$$

برای یک فرآیند آدیاباتیک به صورت زیر خلاصه می شود.

$$\dot{I} = T_0 (\sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i) \quad (۵-۵۴)$$

اگر انرژیهای جنبشی و پتانسیل قابل ملاحظه باشند، می توان آنها را به تابع کاردهی اضافه نمود.

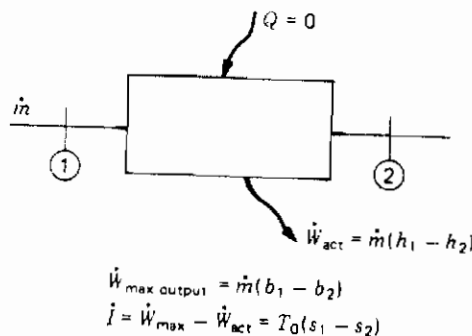
تابع کاردهی برای تحلیل فرآیندهای واقعی مفید است، زیرا نشان می دهد که چقدر به یک فرآیند برگشت پذیر ایده آل نزدیک است. باید توجه داشته باشیم که این کمیت تابعی از خواص سیال و دمای محیط می باشد، زیرا هر انتقال حرارتی با یک اختلاف دمای معین برگشت ناپذیر است و یک ازدیاد آنتروپی در مرز حجم کنترل را تولید می کند. در فرآیند آدیاباتیک بازگشت پذیر انتقال حرارتی موجود نیست ( $s_1 = s_2$ ) و مقدار بازگشت ناپذیری صفر است.



شکل ۵-۱۸ مقدار برگشت ناپذیری برای چندین جریان ورودی و خروجی

## ۵-۱۷ ملاحظات کاربردی با مقدار کاردهی

ارائه ملاحظات چند مربوط به عملی بودن تحلیل مقدار برگشت ناپذیری در اینجا مناسب می باشد. در انتخاب بین امکانات مختلف برای تولید قدرت یا دستگاههای تبدیل انرژی چندین عامل باید در نظر گرفته شود. طبیعتاً شخص باید قادر به طرح و ساخت دستگاهی باشد که به طور قابل اعتمادی کار کند. بغیر از این قاعده کلی، ملاحظات مربوط به هزینه اولیه دستگاه و همچنین مخارج سالیانه کار دستگاه که معمولاً تابع هزینه های انرژی است، باید در نظر گرفته شود. سرمایه گذاری اولیه بستگی به چندین عامل دارد از جمله جنس، هزینه ساخت و توجهی که در طراحی مهندسی دستگاه مؤثر است و کمتر از بقیه نمی باشد. هزینه های مصرف انرژی تا حدودی متفاوت است. ما می توانیم یک قاعده نسبتاً کلی ارائه کنیم که نرخ مصرف انرژی در دستگاههای تولید قدرت هرچه کمتر باشد، تولید مقدار برگشت ناپذیری کمتر خواهد بود.



شکل ۵-۱۹ مقدار کاردهی کاهش و مقدار برگشت ناپذیری برای فرآیند جریان دائم

$$KE \approx \text{آدیاباتیک با } 0$$

بنابراین می توانیم پیش بینی کنیم که یک فرآیند یا دستگاهی که حداقل مقدار برگشت ناپذیری را تولید نماید، احتمالاً شامل حداقل هزینه انرژی خواهد بود. این به هیچ وجه یک اصل مطلق نیست ولی روشی را جهت ارزیابی راه حل های مختلف فنی فراهم می کند.

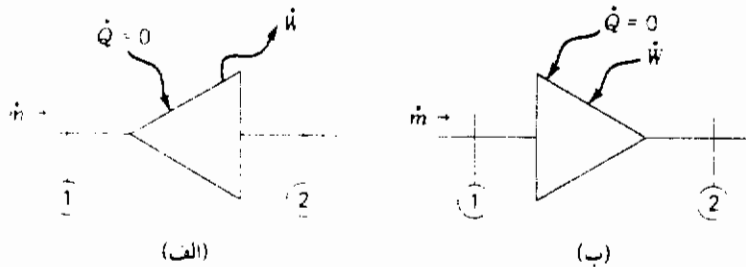
## بازده‌های قانون اول و دوم

یک توربین و کمپرسور آدیاباتیک مطابق شکل ۵-۲۰ را در نظر بگیرید. برای مقادیر ناچیز انرژی‌های جنبشی، مقدار کار خروجی واقعی توربین برابر است با

$$\dot{W}_{act} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

و کار ورودی به کمپرسور برابر است با

$$\dot{W}_{act} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$



شکل ۵-۲۰ (الف) توربین (ب) کمپرسور

اگر فرآیندها برگشت پذیر هم بودند یعنی آنتروپی ثابت، جمله کار مربوط برابر بود با

$$\dot{W}_{isen, out} = \dot{m}(h_1 - h_{2s})$$

$$\dot{W}_{isen, in} = \dot{m}(h_{2s} - h_1)$$

که زیرنویش  $s$  معرف فرآیند آنتروپی ثابت می‌باشد و می‌توانیم بازده‌های قانون اول را برای این دستگاهها به صورت زیر تعریف کنیم

$$\eta_{\text{توربین}} = \frac{\text{کار خروجی واقعی}}{\text{کار خروجی آنتروپی ثابت}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (5-55)$$

$$\eta_{\text{کمپرسور}} = \frac{\text{کار ورودی آنتروپی ثابت}}{\text{کار ورودی واقعی}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (5-56)$$

اینها بازده‌های قانون اول نامیده می‌شود که فرآیندهای واقعی را با فرآیند ایده آل مقایسه می‌کنند. در بحثهای بالا دیده‌ایم که برای هر دو حالت انتهایی داده شده یک مقدار حداکثر کار خروجی موجود است که به وسیله تغییر در کاردهی می‌توان آن را محاسبه کرد. بازده قانون دوم را می‌توان به این صورت تعریف نمود که این حداکثر کار را با کار واقعی مقایسه نمایند.

$$\begin{aligned} \eta_{\text{قانون دوم}} &= \frac{\text{کار خروجی واقعی}}{\text{حداکثر کار خروجی بین دو حالت انتهایی}} \\ &= \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2} \quad \text{برای یک توربین} \end{aligned} \quad (5-57)$$

$$\begin{aligned} \eta_{\text{قانون دوم}} &= \frac{\text{کار ورودی برگشت پذیر}}{\text{کار ورودی واقعی}} \\ &= \frac{h_2 - h_1}{h_2 - h_1} \quad \text{برای یک کمپرسور} \end{aligned} \quad (5-58)$$

بنابر این برای توربین عوامل زیاد دیگری نیز وجود دارند که در طرح دستگاه عملی در نظر گرفته می‌شود مانند سادگی نگهداری و تعمیرات، کارگر ماهر مورد نیاز برای راه اندازی، و در دسترس بودن فیزیکی یک منبع انرژی خاص. برای مثال در نظر گرفتن گاز طبیعی به عنوان منبع انرژی در ناحیه‌ای که گاز طبیعی در دسترس نیست، منطقی نمی‌باشد.

مثالهای زیر نشان می‌دهد که چگونه مفاهیم مقدار کاردهی و مقدار برگشت ناپذیری می‌تواند برای مقاصد تحلیلی به کار گرفته شود.

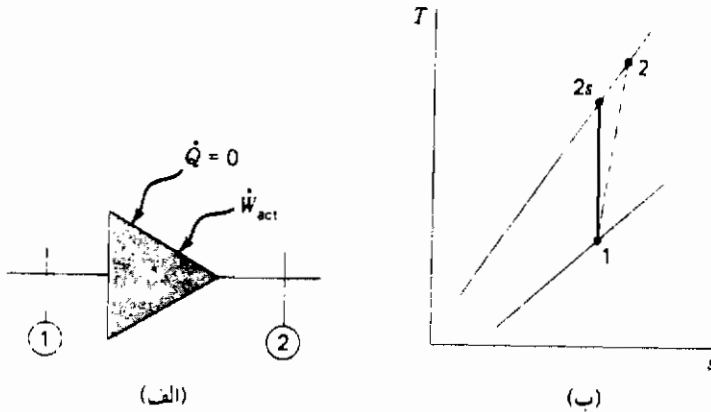
## مثال ۵-۱۰

یک کمپرسور جریان دائم برای متراکم کردن هوا از ۱ atm و ۲۵ °C تا ۸ atm در طی یک فرآیند آدیاباتیک به کار می‌رود. بازده قانون اول این فرآیند ۸۷ درصد است. مقدار برگشت ناپذیری برای این فرآیند و بازده قانون دوم را محاسبه کنید. در نظر بگیرید  $T_0 = ۲۰\text{ }^{\circ}\text{C} = ۲۹۳\text{ K}$

**حل:** کمپرسور در شکل همراه با نمودار  $T-S$  برای این فرآیند نشان داده شده است.

داریم  $T_1 = ۲۵\text{ }^{\circ}\text{C} = ۲۸۹\text{ K}$  و  $p_1 = ۱\text{ atm}$ ،  $p_2 = ۸\text{ atm}$  برای واحد جرم کار

ورودی واقعی برابر است با



شکل مثال ۵-۱۰

$$\dot{W}_{act} = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1) \quad (a)$$

در صورتی که فرآیند برگشت پذیر باشد یعنی آنتروپی ثابت، کار ورودی برابر خواهد بود با

$$\dot{W}_{isen} = h_{2s} - h_1 = c_p(T_{2s} - T_1) \quad (b)$$

با در نظر گرفتن هوا به صورت گاز ایده آل،  $T_{2s}$  به صورت زیر محاسبه می شود:

$$T_{2s} = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} = 298 \left( \frac{8}{1} \right)^{(1.4-1)/1.4} = 540 \text{ K}$$

و کار آنتروپی ثابت برابر است با

$$\dot{W}_{isen} = (1.005 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C})(540 - 298) = 243.3 \text{ kJ/kg}$$

از بازده قانون اول داده شده

$$\eta_{کمپرسور} = \frac{\dot{W}_{isen}}{\dot{W}_{act}} = 0.87 \quad (c)$$

به طوری که

$$\dot{W}_{act} = \frac{243.3}{0.87} = 280 \text{ kJ/kg}$$

سپس از معادله (a) پیدا می‌کنیم

$$T_2 = \frac{\dot{W}_{act}}{c_p} + T_1 = \frac{280}{1.005} + 298 = 576 \text{ K}$$

کار خروجی حداکثر از تغییر در تابع کاردهی محاسبه می‌شود

$$\dot{W}_{max} = b_1 - b_2 = h_1 - h_2 - T_0(s_1 - s_2) \quad (d)$$

و تغییر در آنتروپی به وسیله معادله (۵-۳۲) داده می‌شود

$$\begin{aligned} s_1 - s_2 &= c_p \ln \frac{T_1}{T_2} - R \ln \frac{p_1}{p_2} \\ &= (1.005 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \ln \frac{298}{576} - (287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}) \ln \frac{1}{8} = -66.06 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

بنابراین از معادله (d)

$$\dot{W}_{max} = -280000 - (293)(-66.06) = -260644 \text{ J/kg}$$

البته این معادل کار ورودی + ۲۶۰/۶ kJ/kg می‌باشد. مقدار برگشت ناپذیری از معادله (۵-۵۱) برای یک فرآیند آدیاباتیک برابر است با

$$\begin{aligned} \dot{I} &= T_0(s_2 - s_1) \\ &= (293)(66.06) = 19356 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

با به کار بردن معادله (۵-۵۸) بازده قانون دوم به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\begin{aligned} \eta_{\text{قانون دوم}} &= \frac{b_2 - b_1}{h_2 - h_1} \\ &= \frac{260.6 \text{ kJ/kg}}{280 \text{ kJ/kg}} = 0.931 \end{aligned}$$

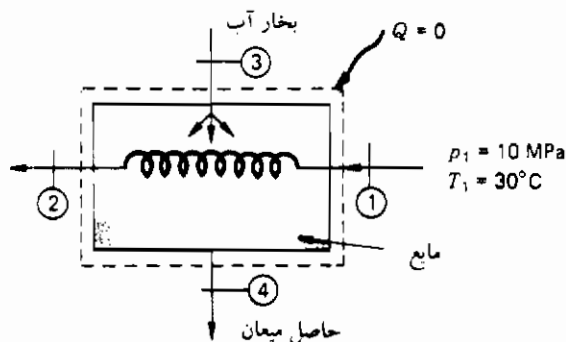


## مثال ۵-۱۱

گر مکن بسته آب تغذیه مثال ۴-۶ باید از نظر مقدار برگشت ناپذیری که در فرآیند انتقال حرارت تولید می شود، تحلیل گردد. محاسبه را بر اساس کمترین دمای در دسترس  $20^\circ\text{C}$  انجام می دهیم.

**حل:** طرحواره مثال ۴-۶ دوباره برای راحتی در این جا آورده می شود. کار واقعی برای این فرآیند صفر است و حداکثر کار خروجی می تواند بر حسب تابع کاردهی ارائه شود، به طوری که

$$\dot{W}_{max} = \dot{m}_1(b_1 - b_2) + (b_3 - b_4) \quad (a)$$



شکل مثال ۵-۱۱

آنتروپیها برای این محاسبات از جداول بخار آب بدست می آید.

$$s_1 = 0.4316 \text{ kJ/kg.K} \quad (\text{مایع متراکم}, 30^\circ\text{C}, 10 \text{ MPa})$$

$$s_2 = 2.3016 \text{ kJ/kg.K} \quad (\text{مایع متراکم}, 198.3^\circ\text{C}, 10 \text{ MPa})$$

$$\begin{aligned} s_3 &= s_f + x_3 s_{fg} \\ &= 2.3150 + (0.95)(6.4448 - 2.3150) = 6.2383 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$s_4 = s_f (1.5 \text{ MPa در}) = 2.3150 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C}$$

معادله (a) حالا می تواند با  $m_1 = 1/0$  و  $m_3 = 0/3858$  و  $T_0 = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$

ارزیابی گردد.

$$\begin{aligned}\dot{W}_{max} &= [(h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_2)] + \dot{m}_s[(h_3 - h_4) - T_0(s_3 - s_4)] \\ &= [(134.86 - 848.54) - (293)(0.4316 - 2.3016)] \\ &\quad + (0.3858)[(2694.8 - 844.89) - (293)(6.2383 - 2.3150)] \quad (b) \\ &= 104.44 \text{ kJ/kg آب}\end{aligned}$$

چون  $\dot{W}_{act} = 0$  مقدار برگشت ناپذیری برابر است با

$$\dot{I} = \dot{W}_{max} - \dot{W}_{act} = 104.44 \text{ kJ/kg آب}$$

## مثال ۱۲-۵ نوع دیگر برای گرمکن هوایی

می‌خواهیم گرمایش  $1/0 \text{ lbm/s}$  هوا در طی یک فرآیند فشار ثابت از  $50^\circ\text{F}$  تا  $120^\circ\text{F}$  چهار نوع گرمکن زیر را ارزیابی کنیم:

- ۱ - بخار آب تقطیر شده در  $1 \text{ atm}$  با تغییر از حالت بخار اشباع به مایع اشباع
- ۲ - با استفاده از آب داغ ورودی به مبدل حرارتی در  $200^\circ\text{F}$  و خروجی در  $150^\circ\text{F}$
- ۳ - با استفاده از آب داغ ورودی به مبدل حرارتی در  $150^\circ\text{F}$  و خروجی در  $100^\circ\text{F}$
- ۴ - با استفاده از گرمکن الکتریکی

برای تمام حالات فرض می‌شود که اتلاف حرارتی از مبدل حرارتی وجود نداشته باشد. طرحواره سیستم در شکل همراه نشان داده شده است. می‌خواهیم مقدار برگشت ناپذیری کلی برای هر حالت را ارزیابی و درباره معقول بودن هریک در کاربرد عملی اظهار نظر کنیم. کمترین دمای در دسترس  $T_0 = 70^\circ\text{F} = 530^\circ\text{R}$  در نظر گرفته می‌شود.

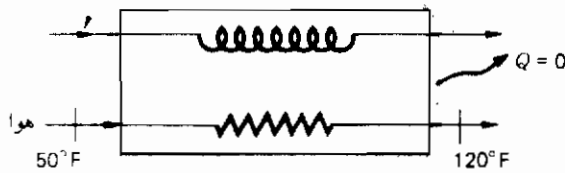
**حل:** حرارتی که می‌باید به هوا منتقل شود در هر سیستم برابر است با

$$q = \dot{m}_a(h_2 - h_1)_a = (1)(0.24)(120 - 50) = 16.8 \text{ Btu/s} \quad (17.7 \text{ kW})$$

در این فرآیند کاهش مقدار کاردهی هوا برابر است با

$$\dot{m}_a(-\Delta b_a) = \dot{m}_a[(h_1 - T_0 s) - (h_2 - T_0 s)]_a \quad (a)$$

سیال گرمایشی یا بری ورودی



شکل مثال ۵-۱۲

تغییر آنتروپی برای هوا در یک فرآیند فشار ثابت برابر است با

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = 0.24 \ln \frac{580}{510} = 0.03087 \text{ Btu/lbm.}^\circ\text{R} \\ &= 0.1292 \text{ kJ/kg.K} \end{aligned} \quad (b)$$

مپس کاهش مقدار کاردهی برابر است با

$$\begin{aligned} -\Delta b_a &= (1.0)[(0.24)(50 - 120) - (530)(-0.03087)] \\ &= -0.4389 \text{ Btu/s} \quad (-0.463 \text{ kW}) \end{aligned} \quad (c)$$

این نتیجه باید با کاهش مقدار کاردهی برای گرمکن یا سیال گرمایش ترکیب شود تا عملکرد کلی ارزیابی گردد.

حالت (۱): بخار آب تقطیرشده خواص بخار آب در ۱ atm برابر است با

$$\begin{aligned} h_1 - h_2' &= -h_{fg} = 970.4 \text{ Btu/lbm} \\ s_1 - s_2 &= s_{fg} = 1.4446 \text{ Btu/lbm.}^\circ\text{R} \end{aligned}$$

انرژی کسب شده به وسیله هوا برابر انرژی از دست داده شده به وسیله بخار آب است و بنابراین

$$q = 16.8 = \dot{m}_s h_{fg} \quad (d)$$

و

$$\dot{m}_s = 0.01731 \text{ lbm/s} \quad (0.00785 \text{ kg/s})$$

کاهش مقدار کاردهی بخار آب برابر است با

$$\begin{aligned} \dot{m}_s(-\Delta b_s) &= (0.0173)[970.4 - (530)(1.4446)] \\ &= + 3.5424 \text{ Btu/s} \quad (3.736 \text{ kW}) \end{aligned}$$

کاهش کلی در مقدار کاردهی برابر است با

$$\dot{m}_a(-\Delta b_a) + \dot{m}_s(-\Delta b_s) = - 0.4389 + 3.5424 = + 3.1035 \text{ Btu/s}$$

این حداکثر کار خروجی است. کار خروجی واقعی برابر صفر است؛ بنابراین مقدار برگشت ناپذیری برابر است با

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{W}_{max} - \dot{W}_{act} = 3.1035 - 0 = + 3.1035 \text{ Btu/s} \\ &= 3.274 \text{ kW} \end{aligned} \quad (e)$$

حالت (۲): منبع آب داغ جهت گرمایش برای این حالت خواص آب مربوطه برابر است با

$$h_1 = h_f(200^\circ\text{F در}) = 168.07 \text{ Btu/lbm}$$

$$h_2 = h_f(150^\circ\text{F در}) = 117.96 \text{ Btu/lbm}$$

$$s_1 = s_f(200^\circ\text{F در}) = 0.2940 \text{ Btu/lbm}\cdot^\circ\text{R}$$

$$s_2 = s_f(150^\circ\text{F در}) = 0.1250 \text{ Btu/lbm}\cdot^\circ\text{R}$$

موازنه انرژی محاسبه دبی جرمی جریان آب را فراهم می‌کند

$$q = 16.8 \text{ Btu/s} = \dot{m}_w (h_1 - h_2)_w$$

$$\dot{m}_w = 0.3353 \text{ lbm/s} \quad (0.1521 \text{ kg/s})$$

کاهش مربوطه در مقدار کاردهی آب برابر است با

$$\begin{aligned} \dot{m}_w(-\Delta b_w) &= (0.3353)[(168.07 - 117.96) - (530)(0.2940 - 0.2150)] \\ &= + 2.7629 \text{ Btu/s} \quad (2.91 \text{ kW}) \end{aligned}$$

حالا کاهش کلی در مقدار کاردهی برابر با مجموع مقادیر آن برای آب و هوا می‌باشد، یا

$$- 0.4389 + 2.7629 = 2.3240 \text{ Btu/s} \quad (2.451 \text{ kW})$$

مطابق حالت ۱ این مقدار برگشت ناپذیری می‌باشد:

$$\dot{I} = + 2.3240 \text{ Btu/s} \quad (2.451 \text{ kW}) \quad (f)$$

حالت (۳): آب داغ جهت گرمایش در دمای پایین برای این حالت ما باید نظر دهیم که مبدل حرارتی بزرگتری مورد نیاز است زیرا اختلاف دمای کمتری بین آب داغ و هوا موجود است. خواص آب مورد علاقه برابر است با

$$h_1 = h_f (150^\circ\text{F در}) = 117.96 \text{ Btu/lbm}$$

$$h_2 = h_f (100^\circ\text{F در}) = 68.05 \text{ Btu/lbm}$$

$$s_1 = s_f (150^\circ\text{F در}) = 0.2150 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$$

$$s_2 = s_f (100^\circ\text{F در}) = 0.1296 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$$

مطابق حالت ۲، می‌توانیم با استفاده از موازنه انرژی دبی جرمی جریان آب را به دست آوریم

$$\dot{m}_w = 0.3366 \text{ lbm/s}$$

کاهش در مقدار کاردهی برای آب به صورت زیر است

$$\begin{aligned}\dot{m}_w(-\Delta b_w) &= \dot{m}_w[(h_1 - T_0 s_1) - (h_2 - T_0 s_2)]_w \\ &= (0.3366)[(117.96 - 68.05) - (530)(0.2150 - 0.1296)] \text{ (g)} \\ &= + 1.5645 \text{ Btu/s} \quad (1.650 \text{ kW})\end{aligned}$$

سپس کاهش کلی مقدار کاردهی از مجموع مقدار آن برای هوا و برای آب به دست می آید و برابر با مقدار برگشت ناپذیری می باشد.

$$- 0.4389 + 1.5645 = +1.1256 \text{ Btu/s} = \dot{I} \quad (h)$$

حالت ۴: گرمایش الکتریکی برای این حالت سیال گرمایش وجود ندارد و کاهش کلی در مقدار کاردهی برابر مقدار آن هوا است یا

$$\dot{m}_a(-\Delta b_a) = - 0.4389 \text{ Btu/s} \quad (- 0.463 \text{ kW})$$

این معرف حداکثر کار خروجی ماکزیمم برای این سیستم گرمکن می باشد. اگرچه برخلاف سه حالت قبلی کار واقعی دیگر برابر صفر نمی باشد. حالا یک کار ورودی الکتریکی  $16/8 \text{ Btu/s}$  (یا کار خروجی واقعی به مقدار  $16/8 \text{ Btu/s}$ ) وجود دارد. بنابراین مقدار برگشت ناپذیری برابر است با

$$\begin{aligned}\dot{I} &= \dot{W}_{max} - \dot{W}_{act} = - 0.4389 - (- 16.8) \\ &= 16.3611 \text{ Btu/s} \quad (+ 17.258 \text{ kW})\end{aligned} \quad (i)$$

چهار حالت در جدول زیر خلاصه شده است. سه حالت اول نشان دهنده کاهش مقدار کاردهی می باشد موقعی که دمای سیال گرمایش کاهش می یابد. این نشان دهنده این است که مقدار برگشت ناپذیری کمتر، زمانی پیش می آید که حرارت با اختلاف دمای کمتری منتقل شود. آخرین حالت نشان دهنده مقدار برگشت ناپذیری زیاد می باشد که از تبدیل کار (در این حالت کار الکتریکی) به حرارت حاصل شده است. مثال ۵-۱۲ نشان دهنده یک روش تحلیل قانون دوم از طرح انتقال - انرژی است. باید به خواننده هشدار دهیم که این تحلیل کامل نیست. باید مقدار برگشت ناپذیری تولید بخار یا آب داغ و اتلافات و مقدار برگشت ناپذیریهای که در نیروگاه برق صورت گیرد را نیز ارزیابی نمود. هدف در اینجا استفاده از تحلیل مقدار کاردهی و مقدار برگشت ناپذیری به صورت ابزار نشان دادن بازده نسبی

قانون دوم در طرحهای گرمایش است.

گرمکن	کاهش در مقدار کاردهی Btu/s	کار خروجی واقعی Btu/s	برگشت ناپذیری Btu/s	kW
بخار آب، ۱ atm، ۲۱۲ °F	۳/۱۰۳۵	۰	۳/۱۰۳۵	۳/۲۷۴
آب داغ، ۱۵۰ °F تا ۲۰۰ °F	۲/۳۲۴۰	۰	۲/۳۲۴۰	۲/۴۵۱
آب داغ، ۱۰۰ °F تا ۱۵۰ °F	۱/۱۲۵۶	۰	۱/۱۲۵۶	۱/۱۸۷
گرمکن الکتریکی	- ۰/۴۳۸۹	- ۱۶/۸	۱۶/۳۶۱۱	۱۷/۲۵۸

### مثال ۵-۱۳ مقدار برگشت ناپذیری در یک توربین بخار

توربین آدیاباتیکی مثال ۵-۶ طوری عمل می‌کند که بخار آب در ۸۰۰ °F و ۴۰۰ psia وارد و در ۵۰ psia و ۴۰۰ °F خارج می‌شود. حداکثر کار خروجی را که می‌توان بین حالات انتهایی بدست آورد و مقدار برگشت ناپذیری را محاسبه کنید. از انرژیهای جنبشی صرف نظر کنید. کمترین دمای در دسترس ۷۰ °F می‌باشد. همچنین بازده قانون دوم را محاسبه کنید.

**حـل :** خواص مورد توجه بدین قرار است :

$$h_1 = 1416.6 \text{ Btu/lbm} \quad \text{در } 800^\circ\text{F و } 400 \text{ psia}$$

$$s_1 = 1.6844 \text{ Btu/lbm.}^\circ\text{R}$$

$$h_2 = 1235.0 \text{ Btu/lbm} \quad \text{در } 400^\circ\text{F و } 50 \text{ psia}$$

$$s_2 = 1.7370 \text{ Btu/lbm.}^\circ\text{R}$$

کار خروجی واقعی برابر است با

$$\dot{W}_{act} = h_1 - h_2 = 181.6 \text{ Btu/lbm} \quad (422.4 \text{ kJ/kg})$$

در حالی که حداکثر کار خروجی ممکن به صورت کاهش در تابع کاردهی به دست می آید:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\text{حداکثر خروجی}} &= (h - T_0 s)_1 - (h - T_0 s)_2 = h_1 - h_2 - T_0(s_1 - s_2) \\ &= 181.6 - (530)(1.6844 - 1.7370) \\ &= 209.48 \text{ Btu/lbm} \quad (487.25 \text{ kJ/kg}) \end{aligned}$$

بنابراین مقدار برگشت ناپذیری برابر است با

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{W}_{max} - \dot{W}_{act} \\ &= 209.48 - 181.6 = 27.88 \text{ Btu/lbm} \quad (64.85 \text{ kJ/kg}) \end{aligned}$$

بازده قانون دوم برابر است با

$$\eta_{\text{قانون دوم}} = \frac{\dot{W}_{act}}{\dot{W}_{max}} = \frac{181.6}{209.48} = 0.867$$

## ۵-۱۸ مقدار کاردهی در سیستمهای بسته

سیستم بسته نشان داده شده در شکل ۵-۲۱ را در نظر بگیرید که در معرض شرایط محیط محل  $T_0$  و  $p_0$  قرار دارد. می خواهیم حداکثر کار خروجی را با لحاظ کار لازم جهت جابه جا کردن محیط تعیین کنیم. از آنجایی که سیستم به طور کلی در تعادل با محیط قرار ندارد ما یک موتور برگشت پذیر  $E$  را بین دو تا متصل می کنیم. حداکثر کار خروجی مفید با لحاظ کردن کار جابه جایی محیط برابر است با

$$d'W_{\text{حداکثر مفید}} = d'W - (-p_0 dV) + d'W_E \quad (5-59)$$

برای فرآیند برگشت پذیر سیستم بسته

$$d'W_{rev} = dE - d'Q_{E,rev}$$

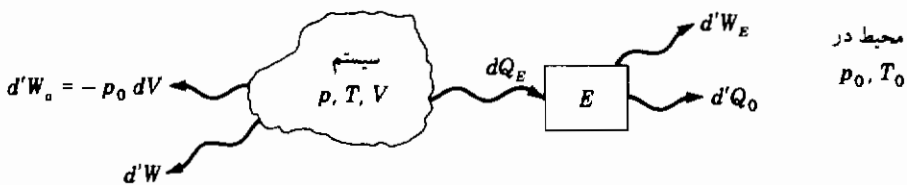


برای موتور برگشت پذیری که به صورت سیکلی کار می کند،

$$d'W_E = - d'Q_E - d'Q_0$$

از تعریف مقیاس دمای ترمودینامیکی مطلق

$$\frac{d'Q_0}{T_0} = - \frac{d'Q_E}{T}$$



شکل ۵-۲۱ مقدار کاردهی در سیستمهای بسته

برای یک فرآیند برگشت پذیر  $d'Q_{E,rev} = T ds$  به طوری که

$$d'W_E = d'Q_{E,rev} - d'Q_{E,rev} \left( \frac{T_0}{T} \right) = d'Q_{E,rev} - T_0 ds$$

بنابراین معادله (۵-۵۹) به صورت زیر در می آید:

$$\begin{aligned} d'W_{\text{حداکثر مفید}} &= dE + p_0 dV + (d'Q_{E,rev} - T_0 ds) - d'Q_{E,rev} \\ &= dE + p_0 dV - T_0 ds \end{aligned} \quad (5-60)$$

اگر حال اجازه دهیم که کل مجموعه یک فرآیند بین دو حالت ۱ و ۲ را طی کند، به دست می آوریم

$$W_{\text{حداکثر مفید}} = E_2 - E_1 + p_0(V_2 - V_1) - T_0(s_2 - s_1) \quad (5-61)$$

اگر انرژی حرارتی داخلی  $U$  تنها متغیر مهم در  $E$  باشد، می توانیم معادله را براساس واحد جرم به صورت

زیر بنویسیم:

$$W = (u_2 - u_1) + p_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) \quad (5-62)$$

حال اجازه دهید که سیستم از یک حالت ابتدایی  $p, v$  و  $T$  به نقطه‌ای که در تعادل با محیط در  $p_0, v_0$  و  $T_0$  قرار می‌گیرد منتهی شود. این حالت انتهایی حالت مرده نامیده می‌شود. حداکثر کار خروجی مفید برابر است با

$$W_{\text{حداکثر مفید}} = (u_0 - u) + p_0(v_0 - v) - T_0(s_0 - s)$$

عمل متداول این است که مقدار کاردهی سیستم بسته  $\phi$  را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$\phi = (u + p_0 v - T_0 s) - (u_0 + p_0 v_0 - T_0 s_0) \quad (5-63)$$

که البته توجه داریم تابعی از هر دو سیستم و محیط است

بنابراین برای یک تغییر بین حالات داده شده ۱ و ۲ حداکثر کار خروجی برابر است با

$$W_{\text{حداکثر مفید}} = \Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 \quad (5-64)$$

## مثال ۵-۱۴

۲ kg هوا با فشار ۵۰۰ kPa و دمای ۷۰۰ K در ظرف صلبی قرار دارد. حالت مرده  $20^\circ\text{C}$  و ۱۰۰ kPa در نظر گرفته می‌شود. حداکثر کار مفید را محاسبه کنید. (الف) اگر سیستم تا حالت مرده تغییر یابد و (ب) هنگامی که هوا تا ۴۰۰ K در ظرف صلب خنک شود.

**حل:** برای قسمت (الف) حداکثر کار مفید معادل تابع کاردهی است. ما در ابتدا خواص لازم را محاسبه می‌کنیم:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{(287)(700)}{500 \times 10^3} = 0.4018 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_0 = \frac{RT_0}{p_0} = \frac{(287)(293)}{100 \times 10^3} = 0.8409 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\begin{aligned} s - s_0 &= c_p \ln \frac{T_1}{T_0} - R \ln \frac{p_1}{p_0} = 1005 \ln \frac{700}{298} - 287 \ln \frac{500}{100} \\ &= 396.3 \text{ J/kg}\cdot\text{K} \end{aligned}$$

$$u_1 - u_0 = c_v(T_1 - T_0) = (718)(700 - 293) = 2.922 \times 10^5 \text{ J/kg}$$

و سپس

$$\begin{aligned} \phi_1 &= m[(u_1 - u_0) + p_0(v_1 - v_0) - T_0(s_1 - s_0)] \\ &= 2[2.922 \times 10^5 + (100 \times 10^3)(0.4018 - 0.8409) - (293)(396.3)] \\ &= 264.3 \text{ kJ} \end{aligned}$$

برای قسمت (ب) حداکثر کار مفید برابر است با

$$W_{\text{حداکثر مفید}} = m(\phi_2 - \phi_1)$$

چون ظرف صلب است  $v_2 = v_1$  و

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 500 \frac{400}{700} = 286 \text{ kPa}$$

بنابراین تغییر آنتروپی برابر است با

$$s_2 - s_1 = 1005 \ln \frac{400}{700} - 287 \ln \frac{286}{500} = -402.1 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

و چون  $v_2 = v_1$  است

$$\begin{aligned} W_{\text{حداکثر مفید}} &= [(u_2 - u_1) - T_0(s_2 - s_1)] \\ &= 2[(718)(400 - 700) - (293)(-402.1)] \\ &= -195.2 \text{ kJ} \end{aligned}$$

بنابراین حداکثر کار خروجی مفید برابر  $195/2 \text{ kJ}$  می باشد.

## ۵-۱۹ تعبیر میکروسکپی آنتروپی

برای خوانندگانی که تحصیل در اصول ترمودینامیک میکروسکپی را انتخاب کرده‌اند می‌توان نشان داد که یک تابع مشخصه حالت وجود دارد که مانند آنتروپی ماکروسکپی، که در این فصل شرح دادیم، رفتار می‌کند. در یک سیستم ذرات منزوی (جرم یا انرژی به سیستم اضافه نمی‌شود) مشخص شده است که سیستم به‌سوی محتمل‌ترین توزیع ذرات در میان حالات انرژی مجاز حرکت می‌کند. همچنین نشان داده شده است که انحراف از محتمل‌ترین حالت در حقیقت خیلی غیر محتمل می‌باشد. این معادل این است که گفته شود آنتروپی سیستم منزوی تمایل به افزایش تا مقدار حداکثر را دارد و خیلی بعید است که مقدارش بعد از این حداکثر (حالت) کاهش یابد. بدین ترتیب تعریف میکروسکپی آنتروپی اطلاعات مشابهی را مانند معادله (۵-۲۲) ارائه می‌کند. به‌جز این که اصل افزایش آنتروپی به‌صورت قاعده‌ای که محتمل‌ترین رفتار را پیش‌بینی می‌کند، در می‌آید. استنباط دیگری از تعریف میکروسکپی این است که قانون دوم ترمودینامیک آنچه را به احتمال زیاد اتفاق خواهد افتاد بیان می‌کند. اما بیش از این مجاز نیستیم که از کلمه "غیر ممکن" استفاده کنیم.

مطالعه بیشتر توزیع انرژی در سطح میکروسکپی نشان خواهد داد که مدل تئوری جنبشی ساده شده گاز ایده‌آل که در فصل ۱ آورده شد صحیح است. برای گازهای با فاصله زیاد ملکولها، قادر به تمیز دادن دمای گاز با متوسط انرژی جنبشی ملکولها هستیم، حتی زمانی که حالات انرژی کوانتوم مجاز ملکولها در نظر گرفته شود.

## ۵-۲۰ شیطانک ماکسول<sup>۱</sup> و تئوری اطلاعات<sup>۲</sup>

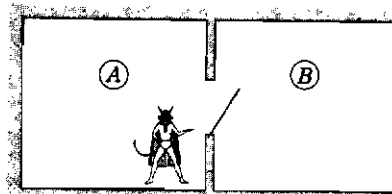
یک برداشت جالب از قانون دوم بوسیله چی . سی . ماکسول در سال ۱۸۷۱ ارائه شد. مخزن نشان داده شده در شکل ۵-۲۲ با دو محفظه  $A$  و  $B$  پر از گازهای مشابه در دمای یکسان تصور کنید. بعضی از ملکولها مربع و بعضی دیگر کند حرکت می‌کنند، اما بر طبق بحث ساده‌مان در قسمت ۱-۱۴ انرژی جنبشی متوسط ملکولها در هر دو محفظه یکسان می‌باشد. ماکسول می‌توانست تصور کند که چه

1- Maxwell's demon

2- Information theory

اتفاقی می‌افتد اگر در کوچکی در قسمت جداکننده محفظه‌ها ایجاد شود و شیطانک تند و تیزی می‌توانست در را به سرعت باز و بسته کند تا ملکولهای سریعتر قسمت  $A$  اجازه یابند به قسمت  $B$  وارد و ملکولهای کندتر از قسمت  $B$  به قسمت  $A$  منتقل شوند. روشن است که اگر شیطانک می‌توانست چنین کاری انجام دهد، وجودش مغتنم بود زیرا جدایی ملکولهای سریع و کند منجر به یک اختلاف دما بین دو محفظه می‌گردید. چنین اتفاقی نقص قانون دوم ترمودینامیک بود. زیرا باعث انتقال حرارتی در جهت ازدیاد اختلاف دما می‌شود.

مفهوم شیطانک ماکسول برای سالها مورد مناظره بوده است. موضوع کلی بحث این است که شیطانک باید به صورت قسمتی از سیستم کلی ترمودینامیکی تحت بررسی در نظر گرفته شود. شیطانک به نحوی باید تشخیص دهد که یک ملکول تند حرکت می‌کند یا کند. این نیاز به اندازه‌گیری دارد و اطلاعات راجع به اندازه‌گیری باید به شیطانک ابلاغ شود. ماحصل نظر عده زیادی این است که (۱)



شکل ۵-۲۲ شیطانک ماکسول، ملکولهای "سریع" در یکطرف، ملکولهای "آهسته"

در طرف دیگر

شیطانک قادر نیست که ملکولهای تند و کند را از هم تشخیص دهد زیرا در معرض بمباران ملکولی تصادفی است. (۲) آنتروپی شیطانک باید تغییر کند تا اطلاعات دریافتی در اثر فرآیند اندازه‌گیری را به حساب آورد. این مسأله بحث دومی را پیش می‌آورد که مربوط است به اطلاعات. استفاده از اصطلاح آنتروپی در علم تئوری اطلاعات موجب می‌شود و حتی بعضی از صاحب نظران را وادار کرده است که کل موضوع ترمودینامیک را براساس مفهوم تئوری اطلاعات بسط دهند. در این بسط آنتروپی به عنوان یک اندازه از "افزایش فقدان اطلاعات" در نظر گرفته می‌شود<sup>۱</sup>.

۱- مرجع [7] را ببینید.

در این بحث بهتر است فکر کنیم که اصول ترمودینامیک به عنوان قضایای بدیهی آزمایشی است که مبنای آن مشاهدات رفتار فیزیکی طبیعت است. هیچ وسیله‌ای نداریم که تعیین کنیم چرا طبیعت چنین رفتاری می‌کند اما معقول به نظر نمی‌رسد که گمان کنیم سبب این رفتار فقدان اطلاعات است. چنین استدلالی مثل این است که کسی بگوید، «من چند چک نوشتم که فراموش کردم در دفترچه چک خود بنویسم بنابراین من اطلاعات کافی برای تعیین موجودی بانک خود ندارم». در هر حال این فقدان شخصی اطلاعات چیزی را در روش محاسبه بانک تغییر نمی‌دهد یا بر آن تأثیر نمی‌گذارد و اگر شخصی بخواهد با نوشتن تعداد زیادی چک آن روش یا اصل را نقض کند، چون از موجودی خود بی‌خبر است به زحمت خواهد افتاد. اگر او بخواهد اصل قضیه را بدانند باید به تجربه روش محاسبه در بانک را ببیند و در دفترچه چک خود با دقت از آن پیروی کند. این درست همان چیزی است که ماسعی کردیم که در تحلیل ترمودینامیکی انجام دهیم، اگرچه اجرای آن به سادگی محاسبه دفترچه چک نیست.

### خودآزمایی (سئوالات مروری)

- ۱ - قانون اول ترمودینامیک چیست؟
- ۲ - چرا حرارت نوع انرژی متفاوتی نسبت به کار است؟
- ۳ - ماشین حرکت دائم از نوع دوم چیست؟
- ۴ - چگونه قانون دوم را به صورت ساده برای یک شخص عامی تشریح می‌کنید؟
- ۵ - فرآیند برگشت‌پذیر چیست؟ معنی این واژه از نظر فیزیکی چیست؟
- ۶ - چرا مفهوم یک موتور حرارتی مهم است؟
- ۷ - چرا قانون دوم برای تعریف مقیاس دمای مطلق ضروری است؟
- ۸ - آیا می‌توان در مقیاس دمای ترمودینامیکی مطلق به دمای صفر رسید؟ چرا؟
- ۹ - تعریف ماکروسکوپی آنتروپی چیست؟
- ۱۰ - اگر تغییر آنتروپی برای یک فرآیند برگشت‌پذیر تعریف شود، چگونه می‌توان محاسبه را برای فرآیندهای برگشت‌ناپذیر انجام داد؟
- ۱۱ - قانون دوم ترمودینامیک را برحسب آنتروپی تحلیل کنید.
- ۱۲ - چرا فرآیند آدیاباتیک برگشت‌پذیر یک فرآیند آنتروپی ثابت است؟

- ۱۳ - سیکل کارنو چیست؟ چه انواع دیگری از سیکلها می تواند از سیکل کارنو بازده بیشتری داشته باشد اگر در حدود دمای یکسانی کار کند؟
- ۱۴ - معنی اصطلاح انرژی دسترس پذیر (مفید) چیست؟ چگونه این بامفهوم مقدار کاردهی سیستمهای جریان دائم فرق می کند؟
- ۱۵ - آیا آنتروپی در یک سیستم منزوی محفوظ می ماند؟
- ۱۶ - آنتروپی را برای یک شخص عامی چگونه توضیح می دهید؟
- ۱۷ - کار را تعریف کنید.
- ۱۸ - مقصود از بازده حرارتی یک موتور حرارتی چیست؟
- ۱۹ - ضریب عملکرد یک فرآیند تبرید چیست؟
- ۲۰ - منظور از یک سری حالات تعادلی چیست؟
- ۲۱ - سیکل (چرخه) چیست؟
- ۲۲ - نابرابری کلاسیوس چیست و چگونه به آنتروپی مربوط می شود؟
- ۲۳ - خاصیت چیست؟
- ۲۴ - حالت یک سیستم را تعریف کنید .
- ۲۵ - آیا آنتروپی یک خاصیت است؟
- ۲۶ - جریان حرارت برگشت پذیر چگونه در نمودار  $T-S$  معرفی می گردد؟
- ۲۷ - میزان برگشت ناپذیری در یک سیستم جریان دائم چقدر است؟

### مسائل (آحاد انگلیسی)

- ۵-۱ در سیستمی که تحت یک فرآیند برگشت پذیر قرار می گیرد، کار انجام شده  $5 \text{ Btu}$  و حرارت دفع شده  $7 \text{ Btu}$  می باشد. تغییر آنتروپی برابر است با:
  - (الف) مثبت
  - (ب) منفی
  - (ج) صفر
  - (د) نمی توان گفت

ترمودینامیک	۳۲۰
<p>۵-۲ در سیستمی که تحت یک فرآیند برگشت‌ناپذیر قرار می‌گیرد، کار انجام شده <math>5 \text{ Btu}</math> و حرارت دفع شده <math>7 \text{ Btu}</math> می‌باشد. تغییر آنتروپی برابر است با:</p> <p>(الف) مثبت</p> <p>(ب) منفی</p> <p>(ج) صفر</p> <p>(د) نمی‌توان گفت</p>	
<p>۵-۳ در سیستمی که تحت یک فرآیند برگشت‌ناپذیر قرار می‌گیرد، کار انجام شده <math>5 \text{ Btu}</math> و حرارت داده شده <math>7 \text{ Btu}</math> می‌باشد. تغییر آنتروپی برابر است با:</p> <p>(الف) مثبت</p> <p>(ب) منفی</p> <p>(ج) صفر</p> <p>(د) نمی‌توان گفت</p>	
<p>۵-۴ بخار آب در یک توربین آدیاباتیکی از <math>900^\circ\text{F}</math> و <math>900 \text{ psia}</math> تا فشار خروجی <math>1 \text{ atm}</math> و کیفیت <math>96\%</math> در صد منبسط می‌شود. قدرت خروجی توربین <math>9000 \text{ kW}</math> است. دبی جریان و تغییر آنتروپی را محاسبه کنید.</p>	
<p>۵-۵ بخار آب در یک شیبوره از <math>100 \text{ psia}</math> و <math>500^\circ\text{F}</math> تا فشار اتمسفر به طور آنتروپی ثابت منبسط می‌شود. اگر سرعت ورودی کوچک باشد، سرعت خروجی از شیبوره را محاسبه کنید.</p>	
<p>۵-۶ بخار آب در <math>100 \text{ psia}</math> و رطوبت <math>10\%</math> در صد تا فشار اتمسفر یک به طور آدیاباتیکی طی فرآیند خفگی قرار می‌گیرد. تغییر آنتروپی را برای نرخ جریان <math>10 \text{ lbm/min}</math> محاسبه کنید.</p>	
<p>۵-۷ یک سیکل کارنو <math>700 \text{ Btu}</math> حرارت در <math>1000^\circ\text{F}</math> دریافت می‌کند و دارای بازده <math>50\%</math> در صد می‌باشد. کار خروجی و دمایی را که در آن حرارت دفع می‌شود محاسبه کنید.</p>	
<p>۵-۸ یک سیکل کارنو <math>1000 \text{ Btu}</math> حرارت در <math>800^\circ\text{C}</math> دریافت می‌کند و در <math>300^\circ\text{F}</math> حرارت دفع می‌کند. کار خروجی را محاسبه کنید.</p>	
<p>۵-۹ سیکل معکوس کارنو که بین حدود دمای صفر و <math>70^\circ\text{F}</math> کار می‌کند و مانند یخچال</p>	



مورد استفاده قرار می‌گیرد در نظر است. اسب بخار ورودی لازم را جهت خارج کردن  $12000 \text{ Btu/h}$  از منبع دما پایین محاسبه کنید.

۵-۱۰ پمپ حرارتی مخصوصی برای یک خانه تقریباً می‌تواند به صورت سیکل معکوس کارنو که بین دمای هوای خارج  $10^\circ\text{F}$  و دمای هوای داخل  $80^\circ\text{F}$  کار می‌کند در نظر گرفته شود. اسب بخار ورودی لازم به سیکل را جهت تحویل  $100000 \text{ Btu/h}$  به منبع دمای بالا (خانه) محاسبه کنید.

۵-۱۱  $1 \text{ lbm}$  مایع اشباع (آب<sup>۱</sup>) در  $100 \text{ psia}$  به طور آدیاباتیک با  $1 \text{ lbm}$  بخار اشباع در  $100 \text{ psia}$  مخلوط می‌شود. تغییر آنتروپی جهان در نتیجه این فرآیند چقدر است؟ مسأله را برای مایع در  $200^\circ\text{F}$ ،  $100 \text{ psia}$  و بخار اشباع در  $100 \text{ psia}$  تکرار کنید. جریان را دائم فرض کنید.

۵-۱۲  $2 \text{ lbm}$  آب در  $150^\circ\text{F}$  با  $5 \text{ lbm}$  آب در  $100^\circ\text{F}$  در یک فرآیند آدیاباتیک مخلوط می‌شود. تغییر آنتروپی جهان را محاسبه کنید.

۵-۱۳ دو شمش فولادی<sup>۲</sup> ( $c_p = 0.11 \text{ Btu/lbm}\cdot^\circ\text{F}$ ) یکی در  $800^\circ\text{F}$  و دیگری در  $300^\circ\text{F}$  در داخل یک مخزن عایق شده وصل می‌شود و به تعادل حرارتی می‌رسد. تغییر آنتروپی جهان چقدر است؟

۵-۱۴ فریون ۱۲ به صورت آنتروپی ثابت از فشار  $25 \text{ psia}$ ،  $40^\circ\text{F}$  تا فشار  $150 \text{ psia}$  در یک مکانیزم سیلندر - پستون متراکم می‌شود. کار به ازای هر پوند جرم سیال را محاسبه کنید. محاسبه را برای تراکم در یک کمپرسور جریان دائم تکرار نمایید.

۵-۱۵ تغییر آنتروپی جهان را در نتیجه فرآیند تبادل حرارت مسأله ۴-۱۵ محاسبه کنید. فرض کنید که به هوا در فشار ثابت  $15 \text{ psia}$  حرارت داده می‌شود.

۵-۱۶ یک شمش به جرم  $5 \text{ lbm}$  بر روی یک سطح افقی با سرعت  $10 \text{ ft/s}$  سُر می‌خورد. ضریب اصطکاک  $0.2$  است و دمای محیط  $70^\circ\text{F}$  می‌باشد. نرخ تولید آنتروپی را در این فرآیند محاسبه کنید. فرضیات را مشخص کنید.

۱- در متن اصلی نوع ماده مشخص نشده است. (مترجم)

۲- در متن اصلی جرم شمش‌ها مشخص نشده است. (مترجم)

۵-۱۷ هلیوم در  $20\text{ psia}$  و  $100^\circ\text{F}$  محتویات یک مخزن صلب را تشکیل می‌دهد. حجم مخزن  $10\text{ ft}^3$  است. مخزن حرارت داده می‌شود تا فشار به  $35\text{ psia}$  افزایش یابد. تغییر آنتروپی هلیوم را محاسبه کنید.

۵-۱۸ هلیوم با شدت  $5\text{ lbm/min}$  در یک آرایش پیستون-سیلندر از شرایط  $100^\circ\text{F}$  و  $20\text{ psia}$  تا  $100\text{ psia}$  به صورت، برگشت پذیر دما ثابت متراکم می‌شود. انتقال حرارت و تغییر آنتروپی را محاسبه کنید.

۵-۱۹ بخار آب با شدت  $2\text{ lbm/s}$  در  $200\text{ psia}$  و  $450^\circ\text{F}$  با  $4\text{ lbm/s}$  آب مایع در  $200\text{ psia}$  و  $150^\circ\text{F}$  طی یک فرآیند جریان دائم آدیاباتیک مخلوط می‌شود. تغییر آنتروپی را در این فرآیند محاسبه کنید.

۵-۲۰ مخترعین خوش اقبال معمولاً ماشینهایی می‌سازند که قانون دوم ترمودینامیک را نقض می‌کند. فرض کنید که یک مخترع از شما بخواهد که دستگاه "جدید" او را که حرارت از آب جوش در فشار اتمسفریک ( $212^\circ\text{F}$ ) دریافت می‌دارد و حرارت در  $70^\circ\text{F}$  دفع می‌کند، تحلیل کنید. او ادعا می‌کند که دستگاهش می‌تواند به بازده  $70\%$  در صد برسد. این ادعا را چگونه ارزیابی می‌کنید؟ به نظر شما حداکثر بازده واقعی چقدر می‌تواند باشد؟

۵-۲۱ یک سیکل کارنو با هوا به عنوان سیال عامل کار می‌کند. حدود دمای سیکل بترتیب برابر  $800^\circ\text{F}$  و  $100^\circ\text{F}$  می‌باشد و فشار در شروع افزایش حرارت  $50\text{ psia}$  است. جرم هوای لازم برای تولید  $1\text{ hp}$  کار خروجی را محاسبه کنید، اگر سیکل  $5000$  مرتبه در دقیقه تکرار شود. اگر حجم در حین افزایش حرارت  $2$  برابر شود کمترین فشار در سیکل چقدر می‌باشد؟

۵-۲۲ بخار آب بطور آدیاباتیک برگشت پذیر در داخل یک شیوره از  $800\text{ psia}$ ،  $700^\circ\text{F}$  تا  $20\text{ psia}$  منبسط می‌شود. در صورتی که سرعت ورودی خیلی کم باشد، سرعت خروجی بخار آب را محاسبه کنید.

۵-۲۳ بخار آب در یک فرآیند دما ثابت برگشت پذیر از  $100\text{ psia}$ ،  $400^\circ\text{F}$  به  $50\text{ psia}$  در یک مکانیزم سیلندر-پیستون منبسط می‌شود. کار و انتقال حرارت برای این فرآیند را محاسبه کنید.

- ۵-۲۴ تغییر آنتروپی را در نتیجه فرآیند مخلوط کردن مسأله ۲۰-۴ محاسبه کنید.
- ۵-۲۵ بخار آب در  $500^\circ\text{F}$ ،  $500\text{ psia}$  و با سرعت  $600\text{ ft/s}$  وارد توربین می‌شود. فرآیند آنتروپی ثابت است و سرعت خروجی برابر با  $200\text{ ft/s}$  می‌باشد. کار خروجی توربین برای تخلیه در  $1\text{ atm}$  را به‌ازای هر پوند جرم بخار آب محاسبه کنید.
- ۵-۲۶ طی یک فرآیند پلی‌تروپیک با  $n = 1/24$  هلیوم در یک مکانیزم پیستون - سیلندر تراکم می‌شود. فشارهای ابتدایی و انتهایی برابر  $15\text{ psia}$  و  $85\text{ psia}$  و دمای اولیه  $100^\circ\text{F}$  است. انتقال حرارت و تغییر آنتروپی را به‌ازای هر پوند جرم هلیوم محاسبه کنید.
- ۵-۲۷ مخزن صلبی شامل بخار آب و آب در  $500\text{ psia}$  می‌باشد. ده درصد مخزن با آب پر شده و مخزن کاملاً عایق است. شیری بر روی مخزن باز می‌شود و بخار آب (بخارخالص) به آرامی خارج می‌گردد تا فشار به  $200\text{ psia}$  کاهش یابد. اگر حجم کلی مخزن  $1\text{ ft}^3$  باشد، جرم بخار آب خارج شده را طی این فرایند محاسبه کنید.
- ۵-۲۸ فریون ۱۲ با شدت  $1/2\text{ kg/s}$  از شرایط مایع اشباع در  $120^\circ\text{F}$  تا دمای  $30^\circ\text{F}$  خفه می‌شود. تغییر آنتروپی را محاسبه کنید.
- ۵-۲۹ یک سیکل کارنو حرارت از منبعی بادمای ثابت  $800^\circ\text{F}$  دریافت کرده و به  $10\text{ lbm}$  آب که در ابتدا به‌صورت مایع اشباع در  $15\text{ psia}$  می‌باشد حرارت پس می‌دهد. همچنان که موتور کار می‌کند، آب در فشار ثابت حرارت داده می‌شود تا دمای آن به  $300^\circ\text{F}$  برسد. کار خروجی موتور کارنو را محاسبه کنید.
- ۵-۳۰ مسأله ۲۹-۵ را تکرار کنید با فرض اینکه منبعی که حرارت را تهیه می‌کند  $10\text{ lbm}$  بخار آب است که در ابتدا در  $800^\circ\text{F}$  و  $800\text{ psia}$  بوده و فشارش در حین فرآیند دفع حرارت ثابت باقی می‌ماند.
- ۵-۳۱  $1\text{ lbm}$  بپانه از ارتفاع  $10\text{ ft}$  بر روی سطح صاف می‌افتد. بلافاصله به سطح می‌چسبد. تغییر آنتروپی جهان را محاسبه کنید. فرضیات را مشخص کنید.
- ۵-۳۲ نشان دهید که مقدار برگشت‌ناپذیری برای فرآیند جریان دائم آدیاباتیک برابر است با:

$$I = \dot{m}T_0(s_2 - s_1)$$

- ۵-۳۳ سیکل کارنویی با بخار آب بعنوان سیال عامل طوری طرح می شود که با بازده ۳۰ درصد کار کند. افزایش حرارت در  $500^{\circ}\text{F}$  اتفاق می افتد و توسط تغییر آب از مایع اشباع به بخار اشباع انجام می گردد. دما، آنترپی و کیفیت را در هر نقطه سیکل محاسبه کنید و طرح را بر روی نمودار  $T-S$  بکشید. کار خارجی به ازای هر پوند جرم بخار آب چقدر است؟
- ۵-۳۴ دی اکسید کربن به مقدار  $5/0$  lbm در یک آرایش پیستون - سیلندر از  $150^{\circ}\text{F}$  و  $15$  psia تا  $85$  psia به طور برگشت پذیر و دما ثابت متراکم می شود. تغییر آنترپی و انتقال حرارت را محاسبه کنید.
- ۵-۳۵ هوا از میان یک شیرخفگی آدیاباتیک از  $100$  psia،  $90^{\circ}\text{F}$  تا فشار اتمسفر جریان می یابد. تغییر آنترپی هوا را برای دبی جریان  $3$  lbm/s محاسبه کنید.
- ۵-۳۶  $10$  lbm هوا در  $50$  psia و  $30^{\circ}\text{F}$  با  $5$  lbm هوا در  $30$  psia و  $500^{\circ}\text{F}$  مخلوط می شود. اختلاط در یک محفظه آدیاباتیک اتفاق می افتد. در صورتی که فشار نهایی  $25$  psia باشد، تغییر آنترپی را محاسبه کنید.
- ۵-۳۷ تغییر کلی آنترپی را برای فرآیند مسأله ۴-۴۶ محاسبه کنید.
- ۵-۳۸ تغییر کلی آنترپی را برای فرآیند مسأله ۴-۴۱ محاسبه کنید.
- ۵-۳۹ بخار آب در  $20$  psia و  $300^{\circ}\text{F}$  وارد یک لوله موئین عایق می شود. در اثر اصطکاک سیال، فشار به  $16$  psia کاهش می یابد. تغییر آنترپی را به ازای هر پوند جرم بخار آب محاسبه کنید.
- ۵-۴۰ هوا در یک توربین از  $1000^{\circ}\text{F}$  و  $200$  psia تا  $400^{\circ}\text{F}$  بطور آدیاباتیک منبسط می شود. اگر فرآیند برگشت پذیر می بود، دمای نهایی برای تخلیه در همان فشار  $350^{\circ}\text{F}$  می شد. تغییر آنترپی و کار تولید شده را به ازای هر پوند جرم هوا محاسبه کنید.
- ۵-۴۱ گرمکن الکتریکی به ظرفیت  $1$  kW در اطاق عایق شده به حجم  $300$  ft<sup>3</sup> محتوی هوا در  $14/7$  psia و  $70^{\circ}\text{F}$  قرار می گیرد. گرمکن  $15$  دقیقه کار می کند. تغییر آنترپی هوا را محاسبه کنید.
- ۵-۴۲ یک گرمکن الکتریکی جهت گرمایش  $30$  gal آب در یک ظرف عایق به کار می رود. دمای گرمکن در  $200^{\circ}\text{F}$  ثابت است و آب از  $60^{\circ}\text{F}$  تا  $120^{\circ}\text{F}$  گرم می شود. تغییر آنترپی

- جهان را در نتیجه این فرآیند گرمایش محاسبه کنید.
- ۵-۴۳ یک توربین هوایی خاص برای ایجاد نیروی محرکه مته‌ای به خدمت گرفته می‌شود. قدرت خروجی باید ۲ hp باشد و توربین دارای بازده ۸۹ درصد است. هوا در ۱۰۰ psia و ۷۰ °F وارد توربین شده و در فشار اتمسفر خارج می‌گردد. اگر سرعت ورودی ۲۰ ft/s باشد قطر لوله ورودی چقدر باید باشد؟ فرضیات را مشخص نمایید.
- ۵-۴۴ بخار آب از ۵۰۰ psia و ۷۸۰ °F تا فشار ۱ atm به طور آدیاباتیک برگشت پذیر منبسط می‌شود. اگر دستگاه یک توربین جریان دائم باشد، چه نرخ جریانی لازم است تا کار خروجی معادل ۱۵۰۰۰ kW تولید نماید؟
- ۵-۴۵ در یک دستگاه مخلوط کننده جریان دائم ۱ lbm/s بخار آب در ۲۰ psia و کیفیت ۲۰ درصد با ۲/۶ lbm/s بخار آب در ۲۰ psia و کیفیت ۸۰ درصد مخلوط می‌شود و مقدار کافی حرارت اضافه می‌شود تا جریان خروجی در فشار ۱ atm و ۳۰۰ °F تولید کند. حرارت از منبعی که در دمای ثابت ۳۵۰ °F نگهداشته می‌شود کسب می‌گردد. تغییر آنتروپی در نتیجه این فرآیند را محاسبه کنید.
- ۵-۴۶ بخار آب در یک مخزن کاملاً عایق به حجم ۱۰ ft<sup>3</sup> در ۷۰۰ °F و ۵۰ psia قرار دارد. شیر پهلوی مخزن باز می‌شود و بخار آب به اتمسفر تخلیه می‌گردد. به محض اینکه فشار مخزن به ۱۴/۷ psia برسد، شیر بسته می‌شود. جرم بخار آب خارج شده در این فرآیند و دمای نهایی مخزن را محاسبه کنید.
- ۵-۴۷ یک قوطی اسپری کوچک به حجم ۲۰ in<sup>3</sup> محتوی فریون ۱۲ در ۷۰ °F می‌باشد و ۳۰ درصد حجم به وسیله مایع اشغال شده است. یک شیوره کوچک در بالای قوطی متصل است به طوری که به صورت یک دستگاه خفگی برای تخلیه به محیط در ۱۴/۷ psia و ۷۰ °F عمل می‌کند. طی فرآیند تخلیه آرام، دمای قوطی در ۷۰ °F ثابت باقی می‌ماند. حرارت اضافه شده به قوطی و تغییر آنتروپی داخل قوطی را جهت یک فرآیند تخلیه آرام که در آن نصف جرم اولیه از دست می‌رود محاسبه کنید. همچنین تغییر آنتروپی بخار را که از دست می‌رود محاسبه کنید.
- ۵-۴۸ مخزنی به حجم ۲۰۰۰ ft<sup>3</sup> محتوی آب در حالت بخار اشباع در ۳۰۰ psia می‌باشد.

فرض کنید که مخزن به عنوان یک منبع حرارتی کار کرده، انرژی از دست می‌دهد به طوری که بخار آب تقطیر شده و به حالت مایع در می‌آید. چه مقدار انرژی دسترس پذیر نسبت به دمای محیط  $70^{\circ}\text{F}$  دارد؟

۵-۴۹ بخار آب در فشار ثابت  $200\text{ psia}$  از حالت بخار اشباع به حالت مایع اشباع خنک می‌شود. با فرض اینکه پایین ترین دمای در دسترس  $70^{\circ}\text{F}$  باشد، میزان کاهش انرژی دسترس پذیر برای این سیستم چقدر است؟

۵-۵۰ یک مخزن پرفشار بخار آب با حجم  $200\text{ ft}^3$  آماده است که توربین کوچکی را که می‌توان فرض کرد به صورت برگشت پذیر و آدیاباتیک عمل می‌کند، بچرخاند. در ابتدا بخار آب در  $1000\text{ psia}$  و  $1000^{\circ}\text{F}$  می‌باشد و مخزن کاملاً عایق است. تخلیه از توربین در  $100\text{ psia}$  صورت می‌گیرد. یک شیر کنترل فشار در قسمت تخلیه توربین بخار آب را تا فشار اتمسفریک کاهش می‌دهد. توربین تا فشار مخزن به  $300\text{ psia}$  برسد کار می‌کند. در این لحظه شیر تخلیه بسته می‌شود. کار خروجی توربین را برای این فرآیند محاسبه کنید.

۵-۵۱ یک مبدل حرارتی طوری طرح می‌شود که بخار آب اشباع را به مایع اشباع در  $15\text{ psia}$  تقطیر کند. هوا به عنوان واسطه سرمایش عمل می‌کند و به مبدل حرارتی در  $70^{\circ}\text{F}$  و  $150^{\circ}\text{F}$  به ترتیب وارد و خارج می‌شود. دستگاه عایق است به طوری که تمام حرارت اتلافی از بخار آب توسط هوا گرفته می‌شود. عملکرد می‌تواند جریان دائم در نظر گرفته شود. برای هر پوند جرم بخار آب تقطیر شده محاسبه کنید:

(الف) جریان جرمی هوای لازم

(ب) اتلاف مقدار کاردهی بخار آب

(ج) افزایش مقدار کاردهی هوا (با فرض  $T_0 = 70^{\circ}\text{F}$ )

(د) مقدار برگشت ناپذیری فرآیند جریان دائم

(ه) تغییر آنتروپی جهان در نتیجه این فرآیند

۵-۵۲ بخار آب در  $20\text{ psia}$  در تحت یک فرآیند گرمایش جریان دائم فشار ثابت از کیفیت  $50$  درصد به بخار داغ  $500^{\circ}\text{F}$  می‌رسد. حرارت برای این فرآیند از یک منبع دمای ثابت

$60.0^{\circ}\text{F}$  به دست می آید و شدت جریان بخار آب  $25 \text{ lbm/min}$  می باشد. محاسبه کنید:

(الف) تغییر آنتروپی بخار آب

(ب) تغییر آنتروپی منبع

(ج) تغییر آنتروپی جهان

(د) تغییر انرژی دسترس پذیر منبع برای  $T_0 = 70^{\circ}\text{F}$

(ه) مقدار برگشت ناپذیری جریان دائم بخار آب برای  $T_0 = 70^{\circ}\text{F}$

۵-۵۳ آمونیاک با شدت  $2 \text{ kg/s}$  در  $140^{\circ}\text{F}$  و  $140 \text{ psia}$  با  $3 \text{ kg/s}$  آمونیاک در  $140 \text{ psia}$  و

$60^{\circ}\text{F}$  در یک دستگاه جریان دائم آدیاباتیک مخلوط می شود. مقدار برگشت ناپذیری را برای فشار خروجی  $140 \text{ psia}$  محاسبه کنید. در نظر بگیرید که  $T_0 = 70^{\circ}\text{F}$ .

۵-۵۴ در یک نیروگاه بزرگ گازهای احتراق ( $c_p = 0.26 \text{ Btu/lbm}^{\circ}\text{F}$ ) از  $2300^{\circ}\text{F}$  تا

$1800^{\circ}\text{F}$  در یک فرآیند فشار ثابت خنک می شوند، در حالی که به بخار آب در  $1400 \text{ psia}$  که بین مایع اشباع و  $1400^{\circ}\text{F}$  کار می کند حرارت پس می دهند. برای هر پوند بخار آب محاسبه کنید:

(الف) دبی جرمی جریان گاز لازم

(ب) تغییر آنتروپی برای گاز و برای بخار آب

(ج) تغییر در تابع کاردهی جریان بخار آب با استفاده از  $T_0 = 70^{\circ}\text{F}$

(د) مقدار برگشت ناپذیری برای فرآیند کلی

۵-۵۵ تغییر انرژی دسترس پذیر را در نتیجه فرآیند مسأله ۵-۱۳ محاسبه کنید.

۵-۵۶ مخترعی می خواهد یک دستگاه نوظهوری برای ذخیره کار - انرژی بسازد که با تهیه کار

ورودی به یخچال کارنوئی کار خواهد کرد که به آب در  $14/7 \text{ psia}$  در دمای بالا حرارت

اضافه کند و از آب در  $14/7 \text{ psia}$  در دمای پایین حرارت بگیرد. وقتی که دستگاه در ابتدا

شروع به کار می کند هر دو منبع آب در  $70^{\circ}\text{F}$  است و هر دو آنها دارای  $500 \text{ lbm}$  آب

است. محاسبه کنید:

(الف) انرژی کار ورودی جهت شروع تولید یخ جامد در  $32^{\circ}\text{F}$  در منبع با دمای پایین

(ب) حالت نهایی منبع دمای بالا برای این کار ورودی

(ج) تغییر انرژی دسترس‌پذیر برای هردو منبع با  $T_0 = 70^\circ\text{F}$

فرض کنید که فرآیندها برای هردو منبع در فشار ثابت صورت می‌گیرد.

۵-۵۷ برای ماشین تبرید مخصوصی فریون ۱۲ از بخار اشباع در  $10^\circ\text{F}$  تا  $200\text{ psia}$  و  $180^\circ\text{F}$

در یک فرآیند جریان دائم آدیاباتیک متراکم می‌شود. کار ورودی به ازای واحد جرم فریون، تغییر در آنترופی و مقدار برگشت‌ناپذیری را برای  $T_0 = 70^\circ\text{F}$  محاسبه کنید.

۵-۵۸ بخار آب در لوله‌ای در  $100\text{ psia}$  و  $500^\circ\text{F}$  جریان دارد و از طریق شیر به مخزن به

حجم  $30\text{ ft}^3$  که در ابتدا شامل بخار آب در  $20\text{ psia}$  و  $300^\circ\text{F}$  می‌باشد متصل است.

شیر باز می‌شود و بخار آب به داخل مخزن جریان می‌یابد. هنگامی که فشار مخزن به

$100\text{ psia}$  برسد، شیر بسته می‌شود. اگر مخزن کاملاً عایق باشد، محاسبه کنید:

(الف) جرم اضافه شده به مخزن

(ب) تغییر آنترופی محتویات مخزن

(ج) تغییر آنترופی جرمی که وارد مخزن می‌شود

(د) تغییر آنترופی جهان در نتیجه این فرآیند

۵-۵۹ یک مخترع ادعا می‌کند که می‌تواند مقدار زیادی انرژی را جهت تبدیل به کار تنها با

ذخیره کردن بخار آب در فشار بالا یعنی  $5000\text{ psia}$  و  $1600^\circ\text{F}$  ذخیره نماید. او مدعی

است که برای مخزن ذخیره‌ای به حجم  $200\text{ ft}^3$  می‌تواند کار خارجی معادل  $8 \times 10^8\text{ J}$

تولید نماید. این ادعا را بوسیله تحلیل دستگاه ایده‌آلی که می‌تواند به مخزن بخار آب برای

تولید کار متصل شود، ارزیابی نماید.

۵-۶۰ بخار آمونیاک به طور آدیاباتیک از بخار اشباع  $20^\circ\text{F}$  به  $240\text{ psia}$  در دستگاه جریان

دائم متراکم می‌شود. به علت تأثیرات اصطکاکی و عوامل دیگر، کار واقعی ورودی ۱۷

درصد بیشتر از کار لازم در یک فرآیند آنترופی ثابت با همان فشار تخلیه می‌باشد. برای هر

پوند جرم آمونیاک متراکم شده محاسبه کنید:

(الف) کار واقعی لازم

(ب) دمای خروجی واقعی از کمپرسور

(ج) مقدار برگشت‌ناپذیری برای  $T_0 = 70^\circ\text{F}$



- ۵-۶۱ فریون ۱۲ از شرایط مایع اشباع در  $100^\circ\text{F}$  در حالتی که دمای نهایی  $40^\circ\text{F}$  می باشد تحت یک فرآیند خفگی آدیاباتیک قرار می گیرد. برای هر پوند جرم فریون محاسبه کنید:
- (الف) تغییر آنتروپی مایع
- (ب) برگشت ناپذیری فرآیند با  $T_0 = 70^\circ\text{F}$

## مسائل (آحاد متریک)

- ۵-۱M در سیستمی که تحت یک فرآیند برگشت پذیر قرار می گیرد، کارانجام شده  $5\text{ kJ}$  و حرارت دفع شده  $7\text{ kJ}$  است. تغییر آنتروپی برابر است با
- (الف) مثبت
- (ب) منفی
- (ج) صفر
- (د) نمی توان گفت
- ۵-۲M در سیستمی که تحت یک فرآیند برگشت ناپذیر قرار می گیرد، کارانجام شده  $5\text{ kJ}$  و حرارت دفع شده  $7\text{ kJ}$  است. تغییر آنتروپی برابر است با
- (الف) مثبت
- (ب) منفی
- (ج) صفر
- (د) نمی توان گفت
- ۵-۳M در سیستمی که تحت یک فرآیند برگشت ناپذیر قرار می گیرد، کارانجام شده  $5\text{ kJ}$  و حرارت داده شده  $7\text{ kJ}$  است. تغییر آنتروپی برابر است با
- (الف) مثبت
- (ب) منفی
- (ج) صفر
- (د) نمی توان گفت
- ۵-۴M  $5\text{ kg/s}$  آب مایع در  $200\text{ kPa}$  و  $50^\circ\text{C}$  با بخار آب در  $150\text{ kPa}$  و کیفیت ۸۰ درصد

مخلوط می‌شود تا تولید جریان خروجی مایع در  $150 \text{ kPa}$  و  $100^\circ\text{C}$  بنماید. فرآیند آدیاباتیک است. جریان بخار آب لازم را محاسبه کنید. همچنین تغییر در آنترופی را محاسبه کنید.

۵-۵M یک سیکل کارنو  $1 \text{ kJ}$  حرارت در  $540^\circ\text{C}$  دریافت می‌کند و دارای بازده  $50\%$  درصد می‌باشد. کار خروجی و دمایی را که در آن حرارت دفع می‌شود محاسبه کنید.

۵-۶M یک سیکل کارنو  $1 \text{ MJ}$  حرارت در  $800^\circ\text{C}$  دریافت می‌کند و در  $150^\circ\text{C}$  حرارت دفع می‌کند. کار خروجی را محاسبه کنید.

۵-۷M سیکل معکوس کارنو که در حدود دمای  $18^\circ\text{C}$  و  $20^\circ\text{C}$  کار می‌کند مانند یخچال مورد استفاده قرار می‌گیرد. اسب بخار ورودی لازم را جهت خارج کردن  $3/5 \text{ kW}$  از منبع دما پایین محاسبه کنید.

۵-۸M پمپ حرارتی مخصوصی برای یک خانه تقریباً می‌تواند به صورت سیکل معکوس کارنو که بین دمای هوای خارج  $10^\circ\text{C}$  و دمای هوای داخل  $30^\circ\text{C}$  کار می‌کند، در نظر گرفته شود. قدرت ورودی لازم به سیکل را جهت تحویل  $30 \text{ kW}$  به منبع دمای بالا (خانه) محاسبه کنید.

۵-۹M مخترعین خوش اقبال معمولاً ماشینهایی می‌سازند که قانون دوم ترمودینامیک را نقض می‌کند. فرض کنید که یک مخترع از شما بخواهد که دستگاه "جدید" او را که از آب جوش در  $100 \text{ kPa}$  ( $99/6^\circ\text{C}$ ) حرارت می‌گیرد و در  $20^\circ\text{C}$  دفع می‌کند، تحلیل کنید. او ادعا می‌کند که دستگاهش می‌تواند به بازده  $75\%$  درصد برسد. این ادعا را چگونه ارزیابی می‌کنید؟ شما فکر می‌کنید حداکثر بازدهی واقعی چقدر می‌تواند باشد؟

۵-۱۰M مخزن صلبی به حجم  $5/3 \text{ m}^3$  کاملاً عایق است و از بخار آب در  $10 \text{ MPa}$  و  $600^\circ\text{C}$  پر شده است. شیری در پهلوی مخزن باز می‌شود و بخار آب خارج می‌گردد تا فشار به  $700 \text{ kPa}$  کاهش یابد. کمیت بخار آب خارج شده از مخزن را محاسبه کنید.

۵-۱۱M هلیوم در نرخ  $2 \text{ kg/s}$  طی فرآیند جریان دائم از  $200 \text{ kPa}$  و  $150^\circ\text{C}$  تا شرایط  $100 \text{ kPa}$  و  $200^\circ\text{C}$  حرارت داده می‌شود. در حین این فرآیند سرعت از  $150$  به  $300 \text{ m/s}$  می‌رسد زیرا سطح مقطع کانال جریان تغییر می‌یابد. تغییر آنترופی هلیوم را

محاسبه کنید.

۵-۱۲M هوا در یک سیلندر - پیستون از  $150 \text{ kPa}$  و  $20^\circ\text{C}$  تا  $450 \text{ kPa}$  و  $70^\circ\text{C}$  طی یک فرآیند پلی تروپیک می‌گردد. تغییر آنتروپی را به ازای واحد جرم محاسبه کنید.

۵-۱۳M  $2 \text{ kg}$  آب  $65^\circ\text{C}$  با  $5 \text{ kg}$  آب  $40^\circ\text{C}$  طی یک فرآیند آدیاباتیک مخلوط می‌شود. تغییر آنتروپی را محاسبه کنید.

۵-۱۴M دو شمش فولادی ( $c_p = 460 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ) یکی در  $700 \text{ K}$  و دیگری در  $420 \text{ K}$  در داخل یک مخزن عایق شده بهم وصل می‌شود و به تعادل حرارتی می‌رسد. تغییر آنتروپی چقدر است؟

۵-۱۵M تغییر آنتروپی را در نتیجه فرآیند تبادل حرارت مسأله ۴-۱۵M محاسبه کنید. فرض کنید که در فشار ثابت  $100 \text{ kPa}$  به هوا حرارت داده می‌شود.

۵-۱۶M یک شمش به جرم  $5 \text{ kg}$  بر روی یک سطح افقی با سرعت  $3 \text{ m/s}$  سر می‌خورد. ضریب اصطکاک  $0.2$  است و دمای محیط  $20^\circ\text{C}$  می‌باشد. نرخ تولید آنتروپی را طی این فرآیند محاسبه کنید. فرضیات را مشخص نمایید.

۵-۱۷M بخار آب در  $10 \text{ MPa}$  و  $500^\circ\text{C}$  وارد لوله کاملاً عایق می‌گردد. در فاصله‌ای از لوله در اثر اصطکاک فشار به  $8 \text{ MPa}$  کاهش می‌یابد. تغییر آنتروپی برای بخار آب و مقدار برگشت‌ناپذیری را با  $20^\circ\text{C}$   $T_0$  محاسبه کنید.

۵-۱۸M آب در  $1 \text{ MPa}$  و  $30^\circ\text{C}$  وارد یک گرمکن باز آب تغذیه می‌شود در حالی که بخار آب در  $1 \text{ MPa}$  و کیفیت  $80\%$  درصد اضافه می‌شود تا تولید جریان خروجی در  $1 \text{ MPa}$  و  $160^\circ\text{C}$  بنماید. گرمکن عایق است. تغییر آنتروپی را به ازای واحد جرم آب سرد ورودی به گرمکن محاسبه کنید.

۵-۱۹M بخار آب در یک شیوره از شرایط  $1/5 \text{ MPa}$  و  $400^\circ\text{C}$  تا فشار خروجی  $1 \text{ atm}$  به طور آدیاباتیک منبسط می‌شود. سرعت ورودی کم است و فرآیند می‌تواند شبه ساکن فرض شود. سرعت خروجی را محاسبه کنید. همچنین قطر خروجی شیوره را برای شدت جریان  $1/2 \text{ kg/s}$  محاسبه کنید.

- ۵-۲۰M سیکل کارنوئی با هوا به عنوان سیال عامل کار می کند. حدود دمای سیکل به ترتیب برابر ۵۰۰ و ۳۱۰ K می باشد و فشار در شروع افزایش حرارت ۳۵۰ kPa است. جرم هوای لازم را جهت تولید کار خروجی ۱ kW محاسبه کنید؛ اگر سیکل ۵۰۰ بار در دقیقه تکرار شود. اگر حجم درجین افزایش حرارت ۲ برابر شود کمترین فشار در سیکل چقدر است؟
- ۵-۲۱M بخار آب در یک شیوره از ۶ MPa، °C ۳۶۰ تا ۱۵۰ kPa به طور آدیاباتیک برگشت پذیر منبسط می شود. در صورتی که سرعت ورودی خیلی کم باشد، سرعت خروجی بخار آب را محاسبه کنید.
- ۵-۲۲M بخار آب از ۷۰۰ kPa، °C ۲۰۰ تا ۳۰۰ kPa طی یک فرآیند دما ثابت آدیاباتیک در یک مکانیزم پیستون - سیلندر منبسط می شود. کار و انتقال حرارت برای این فرآیند را محاسبه کنید.
- ۵-۲۳M بخار آب در ۳ MPa، °C ۲۶۰ و سرعت ۱۸۰ m/s وارد توربین می شود. فرآیند آنتروپی ثابت است و سرعت خروجی برابر با ۶۰ m/s است. کار خروجی توربین را برای تخلیه در ۱۰۰ kPa به ازای هر کیلوگرم بخار آب محاسبه کنید.
- ۵-۲۴M یک کیلوگرم آب اشباع در ۷۰۰ kPa با ۱ kg بخار اشباع در ۷۰۰ kPa به طور آدیاباتیک مخلوط می شود. تغییر آنتروپی جهان در اثر این فرآیند چقدر است؟ مسأله را برای مایع در °C ۹۵، ۷۰۰ kPa و بخار اشباع در ۷۰۰ kPa تکرار کنید. جریان را دائمی فرض کنید.
- ۵-۲۵M هلیوم با شدت ۲/۳ kg/s در یک فرآیند جریان دائم از ۲۰۰ kPa و °C ۲۰۰ تا دمای °C ۱۳۲ سرد می شود. به علت تأثیر اصطکاک در لوله فشار به ۱۸۰ kPa کاهش می یابد. سرمایش لازم و تغییر آنتروپی هلیوم را محاسبه کنید. دمای اتمسفر محل °C ۲۵ می باشد.
- ۵-۲۶M یک گرمکن الکتریکی جهت گرمایش ۱۱۰ لیتر آب در مخزن عایقی به کار می رود. دمای گرمکن در ۳۷۰ K ثابت است و آب از ۱۵ تا °C ۵۰ گرم می شود. تغییر آنتروپی را در اثر این فرآیند گرمایش محاسبه کنید.
- ۵-۲۷M یک سیکل کارنو از یک منبع دما ثابت در ۷۰۰ K حرارت دریافت کرده و به ۵ kg آب اشباع در ۱۰۰ kPa حرارت پس می دهد. هنگامی که موتور کار می کند، آب طی یک

فرآیند فشار ثابت حرارت داده می‌شود تا دمایش به  $150^{\circ}\text{C}$  برسد. کار خروجی موتور کارنو را محاسبه کنید.

۵-۲۸M  $3\text{ kg/s}$  آب از  $30^{\circ}\text{C}$  تا  $75^{\circ}\text{C}$  در یک دستگاه جریان دائم حرارت داده می‌شود. دو راه حل می‌تواند در نظر گرفته شود. الف) گرمایش الکتریکی و ب) گرمایش با منبع دما ثابت در  $450^{\circ}\text{C}$ . تغییر آنتروپی کلی و مقدار برگشت ناپذیری را برای دو حالت با  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$  محاسبه کنید.

۵-۲۹M یک کالریمتر خفگی به خط لوله بخار (جهت نمونه برداری بخار آب) در  $p = 1/5\text{ MPa}$  متصل است. بعد از اینکه بخار آب تا  $p = 100\text{ kPa}$  تحت یک فرآیند خفگی آدیاباتیک قرار گرفت، دمایش  $105^{\circ}\text{C}$  اندازه گیری می‌شود. کیفیت بخار آب در خط لوله  $1/5\text{ MPa}$  را محاسبه کنید.

۵-۳۰M در یک جعبه صُلب عایق به حجم  $4/5\text{ m}^3$  بخار آب وجود دارد. شرایط  $300\text{ kPa}$  و  $600^{\circ}\text{C}$  است. شیری پهلوی مخزن باز می‌شود و بخار آب خارج می‌گردد تا شرایط بخار آب در مخزن به حالت اشباع برسد. مقدار جرم بخار آب خارج شده از مخزن را محاسبه کنید.

۵-۳۱M بخار آب در  $6\text{ MPa}$  و  $600^{\circ}\text{C}$  وارد توربینی شده و در  $100\text{ kPa}$  و  $120^{\circ}\text{C}$  آن را ترک می‌کند. جریان آدیاباتیک است. توان توربین  $50\text{ MW}$  است. تغییر آنتروپی بخار آب را حین عبور از توربین محاسبه کنید.

۵-۳۲M بخار آب با شدت  $2/0\text{ kg/s}$  در  $20\text{ MPa}$  و  $500^{\circ}\text{C}$  در یک شیپوره به طور آدیاباتیک برگشت پذیر از سرعت ورودی کم تا فشار خروجی  $200\text{ kPa}$  منبسط می‌شود. سطح مقطع خروجی لازم برای این دبی جریان را محاسبه کنید.

۵-۳۳M دی اکسید کربن با شدت  $1/1\text{ kg/s}$  از  $700\text{ kPa}$  و  $100^{\circ}\text{C}$  تا فشار اتمسفر خفه می‌شود. تغییر آنتروپی را محاسبه کنید.

۵-۳۴M بخار آب در  $8\text{ MPa}$  و  $560^{\circ}\text{C}$  وارد توربینی شده و در فشار محیط از آن خارج می‌گردد. انبساط آدیاباتیک برگشت پذیر می‌باشد. شدت جریان لازم را برای توان خروجی  $500\text{ MW}$  محاسبه کنید.

- ۵-۳۵M مخزنی از نیتروژن در ۴ MPa و  $60^{\circ}\text{C}$  جهت خارج کردن مایع از مخزن دیگری مورد استفاده قرار می‌گیرد. دو مخزن از طریق شیر کنترل فشاری که فشار تخلیه نیتروژن به مخزن مایع را در ۷۰۰ kPa ثابت نگه می‌دارد به همدیگر متصل می‌باشند. شیر تخلیه بر روی مخزن مایع باز می‌شود و  $0.25\text{ m}^3$  مایع در نتیجه ورود نیتروژن به مخزن مایع خارج می‌گردد. در انتهای فرآیند، فشار در مخزن نیتروژن به ۷۰۰ kPa کاهش می‌یابد. هردو مخزن و شیر اتصال عایق است. حجم مخزن نیتروژن و دمای نهایی نیتروژن در دو مخزن را محاسبه کنید.
- ۵-۳۶M نیتروژن به عنوان سیال عامل یک سیکل کارنو استفاده می‌شود. طی فرآیند افزایش حرارت حجم از ۱ تا  $1/44$  لیتر افزایش می‌یابد، در حالی که طی فرآیند دفع حرارت حجم از  $22/43$  به  $15/88$  لیتر کاهش می‌یابد. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید.
- ۵-۳۷M بخار آب از ۷۰۰ kPa، کیفیت ۷۵ درصد تا ۱۰۰ kPa خفه می‌شود. افزایش آنتروپی را محاسبه کنید.
- ۵-۳۸M ۱۰ kg هوا در ۳۵۰ kPa و ۴۲۰ K با ۵ kg هوا در ۲۰۰ kPa و ۵۳۰ K مخلوط می‌شود. مخلوط شدن در یک محفظه آدیاباتیک صورت می‌گیرد. تغییر آنتروپی را محاسبه کنید اگر فشار نهایی ۱۷۰ kPa باشد.
- ۵-۳۹M بخار آب در ۱۵۰ kPa و  $160^{\circ}\text{C}$  وارد لوله موئین عایق می‌شود. در اثر اصطکاک سیال فشار به ۱۰۰ kPa کاهش می‌یابد. تغییر آنتروپی به ازای هر کیلوگرم بخار آب را محاسبه کنید.
- ۵-۴۰M هوا در توربینی از ۸۰۰ K و ۱/۴ MPa تا ۴۸۰ K به طور آدیاباتیک منبسط می‌شود. اگر فرآیند برگشت پذیر می‌بود دمای نهایی برای تخلیه در همان فشار برابر ۴۵۰ K می‌شد. تغییر آنتروپی و کار تولید شده به ازای هر کیلوگرم هوا را محاسبه کنید.
- ۵-۴۱M یک گرمکن الکتریکی به قدرت ۱ kW در یک اتاق عایق به حجم ۸۵۰۰ لیتر محتوی هوا در ۱ atm و  $22^{\circ}\text{C}$  قرار داده می‌شود. گرمکن برای مدت ۱۵ دقیقه کار می‌کند. تغییر آنتروپی هوا را محاسبه کنید.
- ۵-۴۲M یک مخزن کروی به قطر ۲ m شامل بخار آب در ۱۰ MPa و  $600^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. مخزن

کاملاً عایق است. شیری در پهلوی مخزن باز می‌شود و بخار آب خارج می‌گردد تا فشار به  $2 \text{ MPa}$  کاهش یابد. سپس شیر بسته می‌شود. مقدار بخار آب خارج شده از مخزن را محاسبه کنید.

۵-۴۳M هیدروژن در  $10 \text{ atm}$  و  $400^\circ\text{C}$  در یک توربین تا  $2 \text{ atm}$  و  $200^\circ\text{C}$  منبسط می‌شود. توربین کاملاً عایق و انرژیهای جنبشی ناچیز است. اگر توان خروجی  $10 \text{ kW}$  باشد، تغییر آنتروپی کلی هیدروژن را در حین عبور از توربین محاسبه کنید.

۵-۴۴M توربین کوچکی طرح می‌شود که با استفاده از هلیوم در  $1 \text{ MPa}$  و  $40^\circ\text{C}$  توان  $2 \text{ kW}$  تولید نماید. توربین را می‌توان آدیاباتیک با بازده  $85\%$  و فشار تخلیه  $1 \text{ atm}$  فرض کرد. اگر سرعت خروجی  $30 \text{ m/s}$  باشد، قطر جریان خروجی را محاسبه کنید.

۵-۴۵M مخترعی ادعا می‌کند که موتوری طراحی کرده است که توان  $170 \text{ kW}$  تولید کرده در حالی که تنها  $5 \text{ kg/min}$  سوخت با ارزش حرارتی  $42000 \text{ kJ/kg}$  مصرف می‌کند. او مشخص می‌کند که دماهای بالا و پایین موتور به ترتیب  $670 \text{ K}$  و  $330 \text{ K}$  می‌باشد. آیا این ادعا را باور می‌کنید؟

۵-۴۶M تغییر آنتروپی برای سیستم مسأله ۳-۳۰ را تعیین کنید.

۵-۴۷M مسأله ۵-۲۷ را تکرار کنید با فرض اینکه منبع تأمین کننده حرارت  $5 \text{ kg}$  بخار آب است که در ابتدا در  $700^\circ\text{F}$  و  $6 \text{ MPa}$  بوده و فشارش در حین فرآیند دفع حرارت ثابت باقی می‌ماند.

۵-۴۸M  $1 \text{ kg}$  بپاانه از ارتفاع  $3 \text{ m}$  بر روی سطح صاف می‌افتد. بلافاصله به سطح می‌چسبد. تغییر آنتروپی را محاسبه کنید. فرضیات را مشخص کنید.

۵-۴۹M برق اضطراری جهت مرکز کامپیوتری با به خدمت گرفتن توربین عوایی که با مخزن پُر فشاری کار می‌کند تأمین می‌گردد. شرایط ورودی به توربین برابر با  $3 \text{ MPa}$  و  $45^\circ\text{C}$  در سرعت  $20 \text{ m/s}$  است. فشارخروجی از توربین  $600 \text{ kPa}$  است و توربین را می‌توان آدیاباتیک فرض کرد. قطر لوله ورودی را محاسبه کنید، اگر توان خروجی توربین  $2/5 \text{ MW}$  باشد.

۵-۵۰M  $5/2 \text{ kg}$  هوا از  $1 \text{ atm}$  و  $40^\circ\text{C}$  تا فشار  $500 \text{ kPa}$  طی یک فرآیند برگشت پذیر دما

ثابت متراکم می‌شود. تغییر آنتروپی را محاسبه کنید.

۵-۵۱M مخزنی به حجم  $1 \text{ m}^3$  محتوی آب در  $20^\circ\text{C}$  و  $1 \text{ atm}$  فشار می‌باشد. کار بر روی آب به وسیله یک چرخ پره دار با نرخ  $2/5 \text{ kW}$  صورت می‌گیرد. در همین زمان حرارت بانرخ  $0/75 \text{ kW}$  به محیط منتقل می‌شود. دمای محیط  $10^\circ\text{C}$  است. تغییر آنتروپی آب را هنگامی که دما طی فرآیند فشار ثابت ( $1 \text{ atm}$ ) به  $35^\circ\text{C}$  برسد محاسبه کنید.

۵-۵۲M یک سیکل کارنو با بخار آب به عنوان سیال عامل طوری طرح می‌شود که با بازده  $30\%$  درصد کار کند. افزایش حرارت در  $260^\circ\text{C}$  صورت می‌گیرد و با تغییر آب از مایع اشباع به بخار اشباع انجام می‌گیرد. دما، آنتروپی و کیفیت را در هر نقطه سیکل محاسبه کنید و طرح سیکل را بر روی نمودار  $T-S$  بکشید. کار خارجی به ازای هر کیلوگرم بخار آب چقدر است؟

۵-۵۳M یک سیکل معکوس کارنو به عنوان سیال عامل با فریون  $12$  در دستگاه تبریدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دستگاه بین  $50^\circ\text{F}$  و  $120^\circ\text{F}$  کار می‌کند و دفع حرارت (در دمای بالا) در حالی که سیال از حالت بخار اشباع به مایع اشباع تغییر می‌کند صورت می‌گیرد. آنتروپی و کیفیت در هر نقطه سیکل، تأثیر تبرید و کار ورودی را به ازای هر کیلوگرم فریون محاسبه کنید.

۵-۵۴M بخار آب در یک مخزن کاملاً عایق به حجم  $280$  لیتر در  $360^\circ\text{C}$  و  $300 \text{ kPa}$  قرار دارد شیر پهلوی مخزن باز می‌شود و بخار آب به اتمسفر تخلیه می‌گردد. شیر هنگامی که فشار در مخزن به  $1 \text{ atm}$  می‌رسد بسته می‌شود. جرم بخار آب خارج شده و دمای نهایی مخزن را در این فرآیند محاسبه کنید.

۵-۵۵M منبع دما ثابتی در  $2000 \text{ K}$ ،  $2 \text{ MJ}$  به موتور کارنوئی حرارت می‌دهد که این حرارت را در  $500 \text{ K}$  دریافت و در  $300 \text{ K}$  دفع می‌کند. تغییر آنتروپی جهان و کار خروجی موتور کارنو را محاسبه کنید.

۵-۵۶M یک قوطی اسپری کوچک به حجم  $3/0$  لیتر محتوی فریون  $12$  در  $70^\circ\text{F}$  می‌باشد و  $30\%$  درصد حجم به وسیله مایع اشغال شده است. یک شیوره کوچک در بالای قوطی متصل است به طوری که به صورت یک دستگاه خفگی برای تخلیه به محیط در  $1 \text{ atm}$  و



$20^{\circ}\text{C}$  عمل می‌کند. طی فرآیند تخلیه آرام، دمای قوطی در  $70^{\circ}\text{F}$  ثابت باقی می‌ماند. حرارت اضافه شده به قوطی و تغییر آنتروپی داخل قوطی را جهت یک فرآیند تخلیه آرام که در آن نصف جرم اولیه از دست می‌رود محاسبه کنید. همچنین تغییر آنتروپی بخاری را که از دست می‌رود محاسبه کنید.

۵-۵۷M مخزنی به حجم  $55000$  لیتر شامل آب در حالت بخار اشباع در  $2\text{ MPa}$  می‌باشد. فرض کنید که مخزن به صورت یک منبع حرارتی عمل کرده و همچنان که بخار آب به حالت مایع تقطیر می‌شود حرارت از دست دهد. مقدار "انرژی دسترس پذیر" نسبت به دمای محیط  $20^{\circ}\text{C}$  چقدر است؟

۵-۵۸M فرآیند برگشت پذیری در یک سیستم بسته طوری انجام می‌گیرد که  $40\text{ kJ}$  حرارت دریافت می‌کند و  $40\text{ kJ}$  کار پس می‌دهد. تغییر آنتروپی سیستم برابر است با

(الف) مثبت

(ب) منفی

(ج) صفر

(د) نمی‌توان گفت

۵-۵۹M  $1\text{ MJ}$  حرارت از منبع دما بالا در  $800\text{ K}$  به منبع دما پایین در  $400\text{ K}$  منتقل می‌شود. تغییر آنتروپی کلی برای این فرآیند و کاهش انرژی دسترس پذیر برای  $20^{\circ}\text{C}$  را  $T_0$  محاسبه کنید.

۵-۶۰M در یک چگالنده بخار آب مخصوصی، بخار در  $6\text{ kPa}$  و  $120^{\circ}\text{C}$  وارد شده و مایع اشباع در همان فشار خارج می‌شود. آب سرمایش از میان دستگاه جریان می‌یابد تا انرژی را از بخار آب خارج کرده و تقطیر را سبب گردد. آب سرمایش در  $25^{\circ}\text{C}$  وارد و در  $30^{\circ}\text{C}$  خارج می‌شود و دستگاه عایق می‌باشد. آب سرمایش لازم جهت تقطیر  $28\text{ kg/s}$  بخار آب و مقدار برگشت ناپذیری را برای دستگاه با  $20^{\circ}\text{C}$  محاسبه کنید.

۵-۶۱M هوا با شدت  $50\text{ m}^3/\text{min}$  در  $1\text{ atm}$  و  $10^{\circ}\text{C}$  تا  $30^{\circ}\text{C}$  بوسیله تقطیر بخار آب در  $200\text{ kPa}$  در یک دستگاه جریان دائم حرارت داده می‌شود. بخار اشباع وارد می‌شود و به صورت مایع اشباع شده دستگاه را ترک می‌کند. مقدار برگشت ناپذیری این فرآیند را

محاسبه کنید. توجه کنید که  $T_0 = ۲۵^{\circ}\text{C}$ .

۵-۶۲M مقدار برگشت ناپذیری را برای فرآیند مسأله ۵-۴۰M محاسبه کنید. توجه کنید که  $T_0 = ۲۵^{\circ}\text{C}$ .

۵-۶۳M  $۲\text{ kg/s}$  آب در  $۲۰۰\text{ kPa}$  از  $۳۰^{\circ}\text{C}$  تا  $۵۰^{\circ}\text{C}$  طی یک فرآیند جریان دائم در داخل لوله‌ای حرارت می‌یابد. مقدار برگشت ناپذیری را برای الف) گرمایش با المان مقاومت الکتریکی و ب) بخار آب تقطیر شونده در  $۱۰۰\text{ kPa}$  محاسبه کنید. توجه کنید که  $T_0 = ۲۵^{\circ}\text{C}$ .

۵-۶۴M  $۳\text{ kg}$  آب در  $۱۰۰\text{ kPa}$  و  $۲۰^{\circ}\text{C}$  در مخزن آدیاباتیک بسته‌ای با  $۵\text{ kg}$  آب در  $۸۰^{\circ}\text{C}$  و  $۱۰۰\text{ kPa}$  مخلوط می‌شود. تغییر آنتروپی را در اثر این فرآیند محاسبه کنید.

۵-۶۵M بخار آب در یک فرآیند فشار ثابت در  $۱/۵\text{ MPa}$  از حالت بخار اشباع تا حالت مایع اشباع سرد می‌شود. چه مقدار از انرژی دسترس پذیر این سیستم کاهش می‌یابد، با فرض اینکه کمترین دمای در دسترس  $۲۰^{\circ}\text{C}$  باشد؟

۵-۶۶M یک مخزن پر فشار بخار آب به حجم  $۵۵۰۰$  لیتر آماده است تا توربین کوچکی را که می‌توان فرض کرد که بصورت برگشت پذیر و آدیاباتیک عمل می‌کند بچرخاند. در ابتدا بخار آب در  $۷\text{ MPa}$  و  $۵۴۰^{\circ}\text{C}$  قرار دارد و مخزن کاملاً عایق است. تخلیه از توربین در  $۷۰۰\text{ kPa}$  صورت می‌گیرد. یک شیر کنترل فشار در قسمت تخلیه توربین بخار آب را تا فشار  $۱\text{ atm}$  کاهش می‌دهد. توربین تا وقتی که فشار مخزن به  $۲\text{ MPa}$  برسد کار می‌کند، در این لحظه شیر تخلیه بسته می‌شود. کار خروجی توربین برای این فرآیند را محاسبه کنید.

۵-۶۷M یک سیکل کارنو بین حدود دمای  $۹۰۰\text{ K}$  و  $۳۰۰\text{ K}$  کار می‌کند. حرارت دریافت شده در دمای بالا  $۴\text{ MJ}$  است. تغییر آنتروپی در حین فرآیندهای افزایش و دفع حرارت، حرارت دفع شده و کار خروجی را محاسبه کنید.

۵-۶۸M یک گرمکن الکتریکی برای حرارت دادن جریان هوایی از  $۱۰^{\circ}\text{C}$  تا  $۵۰^{\circ}\text{C}$  در فشار ثابت  $۱\text{ atm}$  به کار می‌رود. توان ورودی به گرمکن  $۲۵\text{ kW}$  است. تغییر آنتروپی هوا و مقدار برگشت ناپذیری فرآیند را با  $T_0 = ۲۰^{\circ}\text{C}$  محاسبه کنید.

۵-۶۹M نیروگاههای بزرگ دستگاههای صرفه‌جو را به خدمت می‌گیرند که از گازهای داغ خروجی دیگ بخار جهت پیش گرم کردن آب ورودی به دیگ بخار استفاده می‌کنند. در یک

کاربرد  $18 \text{ kg/s}$  از گازها ( $c_p = 1/0.5 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ) جهت گرم کردن  $50 \text{ kg/s}$  آب از  $120^\circ\text{C}$  تا  $200^\circ\text{C}$  در یک وسیله جریان دائم استفاده می شود. با فرض اینکه تمام حرارت اتلافی از گازها جهت گرم کردن آب صرف شود، تغییر مقدار کاردهی گاز، آب و تمام سیستم را به طور کلی محاسبه کنید. برگشت ناپذیری برای سیستم کلی با  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  چقدر است؟ بخار  $T$  در ورود  $400^\circ\text{C}$  است.

۵-۷۰M تغییر آنتروپی برای بخار آب را در مسأله ۴-۵۶M محاسبه کنید.

۵-۷۱M یک مبدل حرارتی طوری طراحی می شود که بخار اشباع را به مایع اشباع در  $100 \text{ kPa}$  تقطیر کند. هوا به عنوان واسطه سرمایش عمل می کند و در  $290 \text{ K}$  به مبدل حرارتی وارد و در  $340 \text{ K}$  از آن خارج می شود. دستگاه عایق است به طوری که تمام حرارت اتلافی از بخار آب توسط هوا گرفته می شود. عملکرد را می توان جریان دائم در نظر گرفت. برای هر کیلوگرم بخار آب تقطیر شده محاسبه کنید:

(الف) جریان دبی جرمی هوای لازم

(ب) اتلاف مقدار کاردهی بخار آب

(ج) افزایش مقدار کاردهی هوا (با فرض  $T_0 = 290 \text{ K}$ )

(د) مقدار برگشت ناپذیری فرآیند جریان دائم

(ه) تغییر آنتروپی جهان در نتیجه این فرآیند.

۵-۷۲M بخار آب در  $6 \text{ MPa}$  و  $360^\circ\text{C}$  درون ظرف صُلبی به حجم  $1/2 \text{ m}^3$  وجود دارد مقدار کاردهی را نسبت به فشار  $1 \text{ atm}$  و  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  محاسبه کنید.

۵-۷۳M بخار آب در  $150 \text{ kPa}$  در تحت یک فرآیند گرمایش جریان دائم فشار ثابت از کیفیت  $50\%$  به بخار داغ  $260^\circ\text{C}$  می رسد. حرارت برای این فرآیند از یک منبع دمای ثابت  $300^\circ\text{C}$  کسب می شود و شدت جریان بخار آب  $10 \text{ kg/min}$  می باشد. محاسبه کنید:

(الف) تغییر آنتروپی بخار آب

(ب) تغییر آنتروپی منبع

(ج) تغییر آنتروپی جهان

(د) تغییر انرژی دسترس پذیر منبع برای  $T_0 = 20^\circ\text{C}$

(ه) مقدار بازگشت ناپذیری جریان دائم بخار آب برای  $T_0 = ۲۰^{\circ}\text{C}$

۵-۷۴M در یک نیروگاه بزرگ گازهای احتراق ( $c_p = ۱/۱ \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ ) از  $۱۶۰۰ \text{ K}$  تا  $۱۳۰۰ \text{ K}$

در فشار ثابت سرد می شود در حالی که حرارتشان را به بخار آب در  $۸ \text{ MPa}$  که بین مایع اشباع و  $۷۴۰^{\circ}\text{C}$  کار می کند پس می دهند. برای هر کیلوگرم بخار آب محاسبه کنید:

(الف) دبی جرمی جریان گاز لازم

(ب) تغییر آنتروپی برای گاز و برای بخار آب

(ج) تغییر در تابع کاردهی برای هر سیستم جریانی با استفاده از  $T_0 = ۲۰^{\circ}\text{C}$

(د) مقدار برگشت ناپذیری برای فرآیند کلی

۵-۷۵M بخار آب در خط لوله ای در  $۷۰۰ \text{ kPa}$  و  $۲۶۰^{\circ}\text{C}$  جریان دارد و از طریق شیر به مخزنی

به حجم  $۸۵۰$  لیتر، شامل بخار آب در  $۱۵۰ \text{ kPa}$  و  $۱۶۰^{\circ}\text{C}$  متصل است. شیر باز و بخار

آب به داخل مخزن جاری می شود. هنگامی که فشار مخزن به  $۷۰۰ \text{ kPa}$  برسد شیر بسته

می شود. اگر مخزن کاملاً عایق باشد، محاسبه کنید:

(الف) جرم اضافه شده به مخزن

(ب) تغییر آنتروپی محتویات مخزن

(ج) تغییر آنتروپی جرمی که وارد مخزن شده

(د) تغییر آنتروپی در نتیجه این فرآیند

۵-۷۶M یک مخترع ادعا می کند که می تواند مقدار زیادی انرژی را جهت تبدیل به کار تنها به وسیله

ذخیره کردن بخار آب در فشار بالا  $۳۲ \text{ MPa}$  و  $۹۰۰^{\circ}\text{C}$  ذخیره نماید. برای مخزن

ذخیره ای به حجم  $۵۶۰۰$  لیتر ادعا می کند که می تواند کار خارجی معادل  $۸ \times ۱۰^8 \text{ J}$  تولید

نماید. این ادعا را به وسیله تحلیل دستگاه ایده آلی که می تواند به مخزن بخار آب برای

تولید کار متصل شود ارزیابی نماید.

۵-۷۷M مخترعی دستگاه نوظهوری برای ذخیره کار - انرژی طراحی کرده است که با تهیه کار

ورودی به یخچال کارنویی به آب در  $۱۰۰ \text{ kPa}$  در دمای بالا حرارت اضافه کرده و از آب

در  $۱۰۰ \text{ kPa}$  در دمای پایین حرارت می گیرد. وقتی که دستگاه روشن می شود هر دو منبع

آب در  $۲۰^{\circ}\text{C}$  و هر دو آنها حاوی  $۲۰۰ \text{ kg}$  آب است. محاسبه کنید:

(الف) انرژی ورودی جهت شروع تولید یخ در  $0^\circ\text{C}$  در منبع با دمای پایین

(ب) حالت نهایی منبع با دمای بالا برای این کار ورودی

(ج) تغییر انرژی دسترس پذیر برای هر دو منبع با  $T_0 = 20^\circ\text{C}$

فرض کنید که فرآیندها برای هر دو منبع در فشار ثابت صورت می گیرد.

۵-۷۸M هلیوم با شدت  $1/8 \text{ kg/s}$  در یک توربین آدیاباتیک از  $1 \text{ MPa}$  و  $300^\circ\text{C}$  تا  $100 \text{ kPa}$

منبسط می شود. بازده توربین ۹۲ درصد است. کار خروجی توربین، بازده قانون دوم

(سودمندی) و مقدار برگشت ناپذیری را محاسبه کنید. توجه کنید که  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ .

۵-۷۹M  $3 \text{ kg/s}$  آب در  $100 \text{ kPa}$  و  $20^\circ\text{C}$  با  $5 \text{ kg/s}$  آب در  $80^\circ\text{C}$  و  $100 \text{ kPa}$  در یک

دستگاه جریان دائم آدیاباتیک مخلوط می شود. اگر فشار خروجی نیز  $100 \text{ kPa}$  باشد،

مقدار برگشت ناپذیری فرآیند را محاسبه کنید. توجه کنید که  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ .

۵-۸۰M هوا محتویات مکانیزم سیلندر - پیستونی را در  $100 \text{ kPa}$  و  $30^\circ\text{C}$  تشکیل می دهد.

حداقل کار ورودی را جهت تراکم کردن هوا تا  $150^\circ\text{C}$  و  $350 \text{ kPa}$  محاسبه کنید. توجه

کنید که  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  و  $p_0 = 100 \text{ kPa}$ .

۵-۸۱M مخزن ضلبی به حجم  $750 \text{ cm}^3$  شامل هوا در  $1 \text{ MPa}$  و  $250^\circ\text{C}$  می باشد. اگر هوا تا

$50^\circ\text{C}$  سرد شود، حداکثر کار مفید را محاسبه کنید. توجه کنید که  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  و

$p_0 = 100 \text{ kPa}$

۵-۸۲M بخار آب اشباع در  $200 \text{ kPa}$  محتویات سیلندر - پیستونی را تشکیل می دهد. حداکثر کار

مفید را محاسبه کنید، اگر بخار در فشار ثابت تازمانی که نصف آن تقطیر شود مرد گردد.

توجه کنید که  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  و  $p_0 = 100 \text{ kPa}$ .

۵-۸۳M مخزنی به حجم  $25$  لیتر شامل هوا در  $1/2 \text{ MPa}$  و  $200^\circ\text{C}$  می باشد. مقدار کاردهی را

برای  $p_0 = 100 \text{ kPa}$  و  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  محاسبه کنید.

۵-۸۴M مخزنی به حجم  $2/5 \text{ m}^3$  شامل بخار آب در  $300 \text{ kPa}$  و  $200^\circ\text{C}$  می باشد. مقدار

کاردهی بخار آب را برای  $p_0 = 100 \text{ kPa}$  و  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  محاسبه کنید.

۵-۸۵M هوا محتویات مخزنی در  $1/5 \text{ MPa}$  و  $100^\circ\text{C}$  را تشکیل می دهد. حجم لازم مخزن را

برای تولید حداکثر کار مفید  $3400 \text{ kJ}$  در رابطه با  $p_0 = 100 \text{ kPa}$  و  $T_0 = 25^\circ\text{C}$

محاسبه کنید.

۵-۸۶M مخزن صلب عایقی به حجم  $1 \text{ m}^3$  به وسیله صفحه‌ای به دو محفظه مساوی تقسیم شده است. در یک محفظه آب در  $100^\circ\text{C}$  و  $200 \text{ kPa}$  و در محفظه دیگر در همان فشار و  $40^\circ\text{C}$  می‌باشد. صفحه برداشته می‌شود و مجموعه به تعادل می‌رسد. بیشترین کار مفید برای این فرآیند را با  $p_0 = 100 \text{ kPa}$  و  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  محاسبه کنید.

۵-۸۷M بخار آب اشباع در دمای  $260^\circ\text{C}$  به طور دما ثابت تا فشار  $100 \text{ kPa}$  منبسط می‌شود. با به کار بردن نمودار مولیر تغییر آنتروپی را محاسبه کنید. با استفاده از جداول بخار آب مقدار تغییر حجم را نیز تعیین کنید.

۵-۸۸M  $2 \text{ kg}$  بخار آب بطور آنتروپی ثابت از  $3 \text{ MPa}$  و  $360^\circ\text{C}$  تا  $40 \text{ kPa}$  منبسط می‌شود. با استفاده از نمودار مولیر تغییر انتالپی کلی سیستم را تعیین کنید. همچنین حالت نهایی را مشخص کنید.

۵-۸۹M تغییر آنتروپی را برای هوایی که وارد مخزن مسأله ۴-۴۷M می‌شود محاسبه کنید، اگر کره دارای قطر  $1 \text{ m}$  باشد.

۵-۹۰M مخزن عایقی شامل بخار آب  $8 \text{ MPa}$  و  $400^\circ\text{C}$  می‌باشد. شیری در پهلوی مخزن باز می‌شود و بخار آب از مخزن خارج می‌شود تا بخار آب در مخزن به حالت اشباع برسد. چه کسری از بخار آب برای رسیدن به این حالت باید خارج شود؟

۵-۹۱M سیلندر کوچکی به حجم  $15 \text{ cm}^3$  شامل نیتروژن در  $70 \text{ atm}$  و  $20^\circ\text{C}$  می‌باشد. این سیلندر در یک محفظه عایق به حجم  $10000 \text{ cm}^3$  قرار گرفته و سوراخ می‌شود به طوری که نیتروژن تمام محفظه را پر می‌کند. با فرض اینکه نیتروژن مانند یک گاز کامل ایده آل عمل می‌کند. محاسبه کنید:

(الف) تغییر آنتروپی برای نیتروژن

(ب) تغییر انرژی دسترس پذیر نیتروژن برای  $T_0 = 20^\circ\text{C}$

(ج) کار لازم جهت متراکم کردن نیتروژن به حالت اولیه اش طی یک فرآیند برگشت پذیر در یک مکانیزم سیلندر - پیستون

۵-۹۲M طرح یک موتور حرارتی برگشت پذیر نوظهور بر روی نمودار  $T-S$  به صورت یک دایره

نشان داده شده است. دماهای حداکثر و حداقل بترتیب برابر  $1100\text{ K}$  و  $200\text{ K}$  است. و حداکثر اختلاف آنتروپی در سیکل برابر با  $2000\text{ J/K}$  است. حرارت اضافه شده به سیکل، حرارت دفع شده، کار خالص خروجی و بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید.

**۵-۹۳M** یک کمپرسور جریان دائم برای تراکم هوا از  $1\text{ atm}$ ،  $20^\circ\text{C}$  به  $5\text{ atm}$  و  $210^\circ\text{C}$  به صورت آدیاباتیک کار می‌کند. محاسبه کنید:

(الف) کار لازم به ازای هر کیلوگرم هوا

(ب) تغییر آنتروپی برای این فرآیند

(ج) مقدار برگشت‌ناپذیری جریان دائم برای این فرآیند با فرض  $T_0 = 20^\circ\text{C}$

**۵-۹۴M** مخزن بزرگی به حجم  $15\text{ m}^3$  شامل هوا در  $30\text{ atm}$  و  $30^\circ\text{C}$  می‌باشد. شیری باز می‌شود و هوا به آرامی در  $1\text{ atm}$  و  $25^\circ\text{C}$  در محیط رها می‌شود. مخزن در فضای باز در معرض خورشید قرار دارد و فرآیند آن چنان به آرامی صورت می‌گیرد که دمای مخزن در  $30^\circ\text{C}$  ثابت باقی می‌ماند. هنگامی که فشار مخزن به  $1\text{ atm}$  می‌رسد، شیر بسته می‌شود. تغییر آنتروپی جهان را در نتیجه این فرآیند محاسبه کنید.

## مراجع

- 1 Callen, H. B.: "Thermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1960.
- 2 Lewis, G.N., and Randall, M.: "Thermodynamics," 2d ed. (revised by K. S. Pitzer and L. Brewer), McGraw-Hill Book Company, New York, 1961.
- 3 Reynolds, W. C.: "Thermodynamics," 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.
- 4 Sears, F. W.: "An Introduction to Thermodynamics, The Kinetic Theory of Gases, and Statistical Mechanics." Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1950.
- 5 Hatsopoulos, G. N., and Keenan J. H.: "Principles of General Thermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
- 6 Van Wylen, G. J., and Sonntag, R. E.: "Fundamentals of Classical Thermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
- 7 Tribus, M.: "Thermostatistics and Thermodynamics," D. Van Nostrand Company, Inc., Princeton, N.J., 1961.





## فصل ۶

### معادلات حالت و روابط عمومی ترمودینامیک

#### ۶-۱ مقدمه

اینک می‌خواهیم بعضی روابط عمومی ترمودینامیک را که شاید برای گسترش معادلات حالت مواد مختلف به کار رود تدوین کنیم. خاصیت آنتروپی در این گسترش کاملاً مفید خواهد بود. بدون داده‌های آزمایشی هیچگونه تجزیه و تحلیل ترمودینامیک ماکروسکوپی برای گسترش معادله حالتی واقع بینانه، قابل استفاده نخواهد بود. اگر چه تحلیل را می‌توان به‌طور مؤثری به کار گرفت تا برای یافتن همه خواص مورد نظر به کمترین تعداد اندازه‌گیری نیاز باشد. خواهیم دید که برای چنین کاری کدام اندازه‌گیرهای آزمایشی ضروری است.

#### ۶-۲ بعضی مقدمات ریاضی

بجاست که بعضی از اصول حساب دیفرانسیل جزئی را مرور کنیم تا بتوان در گسترش روابط، مؤثرتر آنها را به کار گرفت. فرض کنید که  $z$  به صورت تابعی از دو متغیر مستقل  $x$  و  $y$  داده شده است:

$$z = z(x, y) \quad (6-1)$$

از حساب دیفرانسیل می توان نوشت :

$$dz = \frac{\partial z}{\partial x} dx + \frac{\partial z}{\partial y} dy \quad (6-2)$$

که  $dz$  دیفرانسیل کامل نامیده می شود. معادله (۶-۱) از نقطه نظر ریاضی کاملاً صحیح است ولی در ترمودینامیک معمولاً مشتقهای جزئی به صورت زیر نوشته می شود :

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)_y = M \quad \frac{\partial z}{\partial y} = \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)_x = N \quad (6-3)$$

در این جا به کمک پرانترها و زیرنویس ها بروشنی نشان داده شده که کدام یک از متغیرهای مشتق گیری ثابت در نظر گرفته می شود. همچنین هریک از این علامات نشان می دهد که دو یا متغیرهای مستقل می باشند. مشتقهای جزئی مختلط مرتبه دوم، باهم برابر می باشند، به طوری که :

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} &= \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} \\ \frac{\partial M}{\partial y} &= \frac{\partial N}{\partial x} \end{aligned} \quad \text{یا} \quad (6-4)$$

البته می دانید که معادله (۶-۲) به صورت زیر نوشته شده است :

$$dz = M dx + N dy \quad (6-5)$$

از معادله (۶-۱) این طور استنباط می شود که در اصل  $x$  یا  $y$  را می توان به طور صریح بر حسب دو متغیر دیگر بیان کرد. یعنی روابطی به شکل زیر موجود می باشد :

$$x = x(y, z) \quad y = y(x, z) \quad (6-6)$$

از این دو رابطه به دست می آوریم که :

$$dx = \left( \frac{\partial x}{\partial y} \right)_z dy + \left( \frac{\partial x}{\partial z} \right)_y dz \quad (6-7)$$

$$dy = \left( \frac{\partial y}{\partial x} \right)_z dx + \left( \frac{\partial y}{\partial z} \right)_x dz \quad (6-8)$$

بعد از یک سلسله عملیات جبری نتیجه می‌گیریم که

$$\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_x \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y = -1 \quad (6-9)$$

از معادله (۶-۹) به عنوان رابطه سیکلی<sup>۱</sup> یاد خواهیم کرد.

هنگامی که در روابط ترمودینامیکی با حاصل ضربهای مشتقات جزئی سروکار داریم باید دقیق تر باشیم. فرض کنید که داریم:

$$r = r(x, y)$$

$$z = z(x, r)$$

می‌توان مشتقات زیر را تشکیل داد:

$$\frac{\partial r}{\partial x} = \left(\frac{\partial r}{\partial x}\right)_y$$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_r$$

اما این نکته قابل توجه است که

$$\frac{\partial r/\partial x}{\partial z/\partial x} \neq \frac{\partial r}{\partial z}$$

البته نوشتن رابطه زیر مجاز است

$$\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y = \frac{1}{(\partial x/\partial z)_y}$$

برای جلوگیری از اشتباه در بحثهای مشتقات جزئی در این جا همیشه پرانتز و زیرنویس به کار گرفته خواهد شد. بدین طریق مشخص کردن متغیر مستقل در هر فرآیند مشتق‌گیری امکان‌پذیر خواهد بود.

### ۶-۳ توابع هلمهولتز (هلموتز) و گیبس<sup>۲</sup>

دو خاصیت جدید را تعریف می‌کنیم: تابع هلمهولتز  $a$

$$a = u - Ts \quad (6-10)$$

و تابع گیس  $g$

$$g = h - Ts \quad (6-11)$$

در این جا کاری به ماهیت فیزیکی این خواص نداریم. فقط می‌گوییم آنها در تجزیه و تحلیل تعادل سیستم اهمیت دارند.

## ۶-۴ معادله انرژی

در فصل سوم نشان داده شده که اصل بقای انرژی را می‌توان برای ماده خالصی که فقط دارای کار تراکمی می‌باشد در فرم دیفرانسیلی به صورت زیر نوشت:

$$d'Q = du + p dv \quad (6-12)$$

حال اگر فرض کنیم که سیستم در طی تغییرات جزئی اشاره شده در معادله (۶-۱۲) در حال تعادل باشد، آن وقت فرض می‌شود که سیستم یک فرآیند برگشت پذیر یا نیمه ساکن (شبه ساکن) را طی می‌کند. بنابراین می‌توان انتقال حرارت  $d'Q$  را بر حسب آنتروپی نوشت یعنی:

$$d'Q_{rev} = T ds = du + p dv \quad (6-13)$$

## ۶-۵ روابط ماکسول<sup>۱</sup>

تعریف انتالپی را می‌توان به یاد آورد که:

$$h = u + pv \quad (6-14)$$

با مشتق‌گیری از معادلات (۶-۱۰)، (۶-۱۱) و (۶-۱۴) و تغییر آرایش معادله (۶-۱۳) داریم

$$du = du - T ds - s dT$$

$$dg = dh - T ds - s dT$$

$$dh = du + p dv + v dp$$

$$du = T ds - p dv$$

یا با استفاده بیشتر از معادله (۶-۱۳)

$$da = -s dT - p dv \quad (۶-۱۵a)$$

$$dg = -s dT + v dp \quad (۶-۱۵b)$$

$$dh = T ds + v dp \quad (۶-۱۵c)$$

$$du = T ds - p dv \quad (۶-۱۵d)$$

شکل هریک از این معادلات نظیر معادله (۶-۵) است. بنابراین برطبق معادله (۶-۴) می‌توان مشتقات جزئی مختلف را مساوی قرار داده بر اساس معادله (۶-۳) ضرایب هر دیفرانسیل را تعریف نماییم. نتایج زیر به دست آمده است :

$$-s = \left(\frac{\partial a}{\partial T}\right)_v \quad -p = \left(\frac{\partial a}{\partial v}\right)_T \quad \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v \quad (۶-۱۶a)$$

$$-s = \left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_p \quad v = \left(\frac{\partial g}{\partial p}\right)_T \quad \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \quad (۶-۱۶b)$$

$$T = \left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_p \quad v = \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_s \quad \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s = \left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)_p \quad (۶-۱۶c)$$

$$T = \left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)_v \quad -p = \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_s \quad \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_s = -\left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_v \quad (۶-۱۶d)$$

چهار دسته رابطه بین مشتقات جزئی که از مساوی قرار دادن مشتقات جزئی مختلف مرتبه دوم بدست آمده است روابط ماکسول نامیده می‌شود.

در این جا دو رابطه دیگر بطور خاص مورد توجه است :

$$T = \left( \frac{\partial u}{\partial s} \right)_v \quad (6-17a)$$

$$T = \left( \frac{\partial h}{\partial s} \right)_p \quad (6-17b)$$

از این روابط می‌توانیم برای تعریف دما برحسب سایر خواص ترمودینامیکی بویژه آنتروپی استفاده کنیم. مثلاً اگر بتوانیم با استفاده از بررسیهای میکروسکپی عباراتی برای  $u$  و  $s$  به دست آوریم، محاسبه دمای سیستم با استفاده از معادله (6-17a) امکان پذیر خواهد بود. این رابطه به عنوان یک عامل ارتباط قطعی بین تحلیل ترمودینامیک ماکروسکپی و میکروسکپی عمل نموده و در حقیقت به دست آوردن تعریفی برای دمای یک سیستم میکروسکپی را ممکن می‌کند. تحلیل میکروسکپی را بعداً مورد بررسی قرار خواهیم داد اما اینک توجه خود را به روی روابط ماکروسکپی متمرکز می‌کنیم.

## ۶-۶ انتالپی، انرژی داخلی، و آنتروپی

اگر انرژی داخلی یک ماده خالص به صورت تابعی از دما و حجم (به بخش ۲-۳، مراجعه شود) بیان گردد. در آن صورت  $u = u(T, v)$  و

$$du = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv \quad (6-18)$$

با یادآوری تعریف:

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

داریم

$$du = c_v dT + \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv$$

از معادله (6-13)

$$\begin{aligned} ds &= \frac{du}{T} + \frac{P}{T} dv \\ &= c_v \frac{dT}{T} + \left[ \frac{1}{T} \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + \frac{P}{T} \right] dv \end{aligned} \quad (6-19)$$

اماممکن است که آنتروپی را به صورت تابعی از دو متغیر مستقل  $T$  و  $v$  بنویسیم بنابراین  $s = s(T, v)$  و

$$ds = \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_v dT + \left( \frac{\partial s}{\partial v} \right)_T dv \quad (6-20)$$

از مساوی قرار دادن ضرایب  $dT$  و  $dv$  در معادلات (۶-۱۹) و (۶-۲۰) نتیجه می شود:

$$\left( \frac{c_v}{T} \right) = \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_v \quad (6-21)$$

$$\left( \frac{\partial s}{\partial v} \right)_T = \frac{1}{T} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right] \quad (6-22)$$

حال از رابطه ماسکول معادله (۶-۱۶a) می توان نوشت :

$$\left( \frac{\partial s}{\partial v} \right)_T = \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v$$

بدین ترتیب معادله (۶-۲۲) را می توان مجدداً به صورت زیر نوشت.

$$\left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \quad (6-23)$$

و رابطه انرژی داخلی [معادله (۶-۱۸)] تبدیل می شود به

$$du = c_v dT + \left[ T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv \quad (6-24)$$

به همین ترتیب می توان برای آنتروپی نوشت

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv \quad (6-25)$$

به دست آوردن روابطی مشابه برای انتالپی نیز امکان پذیر است. نتیجه عبارت است از :

$$dh = c_p dT + \left[ v - T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp \quad (6-26)$$

که تعریف گرمای ویژه در فشار ثابت یادآوری می شود

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (6-27)$$

با در نظر گرفتن آنتروپی به صورت تابعی از دومتغیر مستقل فشار و دما به جای حجم و دما، رابطه زیر به دست می آید:

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp \quad (6-28)$$

معادلات نهایی برای انرژی داخلی، انتالپی و آنتروپی، یعنی معادلات (۶-۲۴)، (۶-۲۶) و (۶-۲۵)، شامل پنج کمیت  $p$ ،  $v$ ،  $T$ ،  $c_p$  و  $c_v$  است. با مساوی قرار دادن دو عبارت آنتروپی یعنی معادلات (۶-۲۵) و (۶-۲۸) می توان رابطه ای بین گرماهای ویژه به صورت زیر به دست آورد.

$$c_v \frac{dT}{T} + \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv = c_p \frac{dT}{T} - \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp$$

با تغییر آرایش داریم

$$c_p - c_v = T \left[ \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \frac{dv}{dT} + \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \frac{dp}{dT} \right] \quad (6-29)$$

برای حجم ثابت و  $dv = 0$  و

$$(c_p - c_v)_v = T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_v$$

یا برای فشار ثابت و  $dp = 0$  و

$$(c_p - c_v)_p = T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

این روابط یکسان است. با استفاده از رابطه سیکنی (۶-۹)،

$$\left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = - \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_T$$

رابطه نهایی زیر را به دست می آوریم

$$c_p - c_v = - T \frac{(\partial v / \partial T)_p^2}{(\partial v / \partial p)_T} \quad (6-30)$$

بدین ترتیب با به دست آوردن معادله (۶-۳۰)، تعیین  $u$ ،  $h$  و  $s$  را تنها به مشخص کردن



چهارخاصیت  $p$ ،  $v$ ،  $T$  و  $c_v$  یا  $c_p$  کاهش داده‌ایم. چون توابع گیس و هلمهولتز بر حسب  $u$ ،  $h$  و  $s$  بیان شده است، اطلاعات لازم برای تعیین آنها را هم مشخص کرده‌ایم.

نتیجه بالا از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا بنیاد آن دسته از اندازه‌گیریهای تجربی است که باید برای تشریح کامل کلیه خواص ترمودینامیکی یک ماده خالص انجام شود. اگر فقط یک فاز از ماده‌ای موردنظر باشد (یعنی فاز مایع یا گاز)، می‌توان فرض نمود معادله حالتی وجود دارد که فشار، حجم، و دما را به یکدیگر مربوط می‌کند:

$$v = v(T, p) \quad (۶-۳۱)$$

با اندازه‌گیری  $p$ ،  $v$ ،  $T$  می‌توان یک رابطه تجربی به شکل معادله (۶-۳۱) به دست آورد. سپس می‌توان از ترکیب این معادله با داده‌های گرمای ویژه سایر خواص ترمودینامیکی را محاسبه نمود. در اینجا باید کاربرد آزمایشهای تویی متخلخل ژول - تامسون<sup>۱</sup> را در تعیین مقادیر  $c_p$  از اندازه‌گیریهای جریان آدیاباتیک و دما ثابت یادآور شویم. این آزمایشها در بخش ۷-۴ تشریح شد.

## ۶-۷ روابط گرمای ویژه

عبارتهای مفید دیگری می‌توان نوشت که گرماهای ویژه را به یکدیگر ارتباط می‌دهد. معادله (۶-۲۸) یک معادله دیفرانسیل کامل به شکل معادله (۶-۵) است. لذا می‌توان مشتقات جزئی مختلط درجه دوم آن را مساوی قرار داد تا رابطه زیر را به دست آوریم.

$$\left[ \frac{\partial(c_p/T)}{\partial p} \right]_T = - \left[ \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right]_p \quad \text{یا}$$

$$\left( \frac{\partial c_p}{\partial p} \right)_T = - T \left( \frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_p \quad (۶-۳۲)$$

با استفاده از معادله (۶-۲۵) به عنوان نقطه شروع، عبارت مشابهی برای تغییر  $c_v$  با حجم مخصوص به دست می‌آوریم. از مساوی قرار دادن مشتقات جزئی مختلط درجه دوم نتیجه می‌گیریم

$$\left[ \frac{\partial(c_v/T)}{\partial v} \right] = \left[ \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \right]_v \quad \text{یا}$$

$$\left( \frac{\partial c_v}{\partial v} \right)_T = T \left( \frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_v \quad (۶-۳۳)$$

معادلات (۶-۳۲)، (۶-۳۳) و (۶-۳۴) را اگر برای یک گاز ایده‌آل به کار بگیریم نتایج بسیار مفیدی به دست خواهد آمد. داریم:

$$v = \frac{RT}{p} \quad p = \frac{RT}{v}$$

با مشتق گرفتن از این عبارتها و جایگزین کردن آنها در معادلات (۶-۳۲)، (۶-۳۳) و (۶-۳۴) نتیجه می‌گیریم که:

$$\left( \frac{\partial c_p}{\partial p} \right)_T = -T(0) = 0$$

$$\left( \frac{\partial c_v}{\partial v} \right)_T = T(0) = 0$$

$$\left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = T \left( \frac{R}{v} \right) - p = 0$$

به عبارتی گرماهای ویژه و انرژی داخلی یک گاز ایده‌آل فقط تابع دماست. این نتیجه قبلاً در فصل دوم برای محاسبه فرآیندهای گازهای ایده‌آل مورد استفاده قرار گرفت.

## ۶-۸ جداول گاز

اشاره کردیم که انتالپی و انرژی داخلی گازی که از معادله  $pv = RT$  حالت پیروی می‌کند فقط تابعی از دماست و بنابر این می‌توان آنها را با روابط مناسبی برای گرمای ویژه همان‌طور که در جدول ۲-۳ ارائه شده، محاسبه کرد. چنین محاسباتی به وسیله کینان و یکی<sup>۱</sup> [3] انجام و در جداول گاز تنظیم شده است. برای این جدولها سطح سنای صفر برای انتالپی و انرژی داخلی در صفر درجه مطلق انتخاب شده است.

برای یک گاز ایده‌آل تغییر در آنتروپی را در یک فرآیند به صورت زیر می‌نویسیم. [معادله

(۵-۳۱) را ببینید]

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (۶-۳۴)$$

حالت مبنا برای آنتروپی را به صورتی انتخاب می‌کنیم که

$$s = 0 \quad T = 0, \quad p = 1 \text{ atm}$$

سپس آنتروپی در هر دما و فشاری برابر است با:

$$s = \int_0^T c_p \frac{dT}{T} - R \ln p \quad (۶-۳۵)$$

که فشار برحسب واحد اتمسفر بیان شده است. در این معادله انتگرال فقط تابعی از دما بوده و در جداول گاز به صورت  $\phi$  جدول‌بندی شده است (جدولهای ۱۷-A و ۱۸-A را ببینید).

$$\phi = \int_0^T c_p \frac{dT}{T} \quad (۶-۳۶)$$

بنابراین تغییر در آنتروپی را بین دو حالت مشخص، معادله (۶-۳۴)، می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$s_2 - s_1 = \phi_2 - \phi_1 - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (۶-۳۷)$$

حال یک فرآیند آدیاباتیک برگشت پذیر را در مورد گازی ایده آل با گرماهای ویژه متغیر در نظر بگیرید. از معادله (۶-۱۵۵) داریم:

$$T ds = dh - v dp = 0$$

یا

$$c_p dT = \frac{RT}{p} dp$$

با جدا کردن متغیرها

$$\frac{dp}{p} = \frac{c_p dT}{RT} \quad (۶-۳۸)$$

حال اگر از این معادله بین یک حالت مبنا در  $T_0$  و  $p_0$  انتگرال گرفته شود نتیجه عبارت است از

$$\ln \frac{P}{P_0} = \frac{1}{R} \int_{T_0}^T \frac{c_p dT}{T} \quad (۶-۳۹)$$

با استفاده از همان دمای مبنای به کار برده شده در جدول گاز نتیجه می‌گیریم:

$$\ln P_r = \frac{\phi}{R} \quad (۶-۴۰)$$

که فشارنسبی<sup>۱</sup> به صورت زیر تعریف شده است:

$$P_r = \frac{P}{P_0}$$

واضح است که برای یک فرآیند آنتروپی ثابت فشارنسبی فقط تابعی از دما است زیرا  $\phi$  تنها به دما بستگی دارد. به علاوه برای فرآیند آنتروپی ثابت داریم:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{P_{r1}}{P_{r2}} \right)_s = \text{const.} \quad (۶-۴۱)$$

به همین ترتیب حجم مخصوص نسبی<sup>۲</sup> را می‌توان برای فرآیند آنتروپی ثابت بیان نمود به طوری که

$$\left( \frac{v_1}{v_2} \right) = \left( \frac{v_{r1}}{v_{r2}} \right)_s = \text{const.} \quad (۶-۴۲)$$

$v_r$  نیز به دما بستگی داشته و به وسیله رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\ln v_r = \ln \frac{v}{v_0} = - \frac{1}{R} \int_{T_0}^T \frac{c_v dT}{T} \quad (۶-۴۳)$$

مقادیر فشارنسبی و حجم مخصوص نسبی برای هوا در جدول A-۱۷ تنظیم شده است.

### مثال ۶-۱ انبساط آنتروپی ثابت

هوا در یک فرآیند آنتروپی ثابت از ۷۰۰ kPa، ۶۵۰ K تا ۲۰۰ kPa منبسط می‌شود. با استفاده از جداول گاز دمای نهایی و تغییر در انتالپی را محاسبه کنید.

1- Relative pressure

2- Relative specific volume

**حل :** با استفاده از جدولهای گاز برای حالت اولیه داریم :

$$T_1 = 650 \text{ K}$$

$$h_1 = 659.84 \text{ kJ/kg}$$

$$P_{r1} = 21.86$$

با استفاده از معادله (۶-۴۱)

$$\begin{aligned} P_{r2} &= P_{r1} \frac{P_2}{P_1} \\ &= 21.86 \left( \frac{200}{700} \right) = 6.246 \end{aligned}$$

با مراجعه مجدد به جدولهای گاز با  $P_{r2} = 6.246$  درمی یابیم که

$$T_2 = 460 \text{ K}$$

$$h_2 = 462.01 \text{ kJ/kg} \quad (198.6 \text{ Btu/lbm})$$

و تغییر در انتالپی برابر است با :

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 462.01 - 659.84 = -197.83 \text{ kJ/kg} \quad (-85 \text{ Btu/lbm})$$

## مثال ۶-۲ انبساط برگشت ناپذیر

فرآیند انبساطی مثال ۶-۱ بین همان دو فشار اتفاق می افتد، با این تفاوت که به علت اثرات برگشت ناپذیری دمای نهایی  $480 \text{ K}$  می باشد. تغییر در آنتروپی را برای فرآیند مذکور محاسبه کنید.

**حل :** با توجه به دمای نهایی  $T_2 = 480 \text{ K}$  می توان مقادیر  $\phi$  را از جداول گاز به دست آورد.

$$\phi_1 = 3.3069$$

$$\phi_2 = 2.9909$$

از معادله (۶-۳۷) تغییر در آنتروپی برابر است با

$$\begin{aligned}
 s_2 - s_1 &= \phi_2 - \phi_1 - R \ln \frac{p_2}{p_1} \\
 &= 2.9909 - 3.3069 - \frac{287.1}{1000} \ln \frac{200}{700} \\
 &= 0.04367 \text{ kJ/kg.K} \quad (0.01043 \text{ Btu/lbm.}^\circ\text{R})
 \end{aligned}$$

### مثال ۶-۳

با استفاده از جداول هوا تغییر در آنتروپی را برای هوا تحت شرایط زیر محاسبه کنید:

- (الف) تراکم از ۱ atm و ۳۰۰ K تا ۱۰ atm و ۵۵۰ K  
 (ب) گرمایش در فشار ثابت ۳۴۰ kPa از ۳۰۰ K تا ۵۵۰ K  
 (ج) فرآیند آدیاباتیک از ۱/۴ MPa و ۴۲۰ K تا ۰/۷ MPa  
 (د) افزایش حرارتی به مقدار ۱۰ kJ به جرم ثابتی از هوا در داخل ظرف صلبی به حجم ۰/۰۵۸ m<sup>3</sup> از ۳۰۰ K و ۱ atm تا حالت نهایی

**حل:** (الف) تغییر در آنتروپی را می‌توان مستقیماً از معادله (۶-۳۷) محاسبه نمود.

$$s_2 - s_1 = \phi_2 - \phi_1 - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (a)$$

با استفاده از جداول هوا (جدول A-۱۷M)

$$T_1 = 300 \text{ K} \quad \phi_1 = 2.5153 \text{ kJ/kg.K}$$

$$T_2 = 550 \text{ K} \quad \phi_2 = 3.1314 \text{ kJ/kg.K}$$

از معادله (a)

$$\begin{aligned}
 s_2 - s_1 &= 3.1314 - 2.5153 - 0.287 \ln \frac{10}{1} \\
 &= -0.04474 \text{ kJ/kg.K}
 \end{aligned} \quad (b)$$

(ب) از معادله (a) باز هم می‌توان استفاده نمود، ولی چون  $p_1 = p_2 = 340 \text{ kPa}$  جمله

نهایی برابر صفر است و

$$s_2 - s_1 = 3.1314 - 2.5153 = 0.6161 \text{ kJ/kg.K} \quad (c)$$

(ج) برای خفگی آدیاباتیک با انرژیهای جنبشی ناچیز  $h_1 = h_2$ ، لذا  $T_1 = T_2$ .  
این بدان معنی است که  $\phi_1 = \phi_2$  و معادله (a) به صورت زیر درمی آید

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= 0 - 287 \ln \frac{0.7}{1.4} \\ &= 198.9 \text{ J/kg.K} = 0.1989 \text{ kJ/kg.K} \end{aligned} \quad (d)$$

(د) جرم هوا از حالت اولیه محاسبه می گردد:

$$p_1 = 1 \text{ atm} = 101.32 \text{ kPa} \quad T_1 = 300 \text{ K} \quad V_1 = 0.058 \text{ m}^3$$

به طوری که بر طبق قانون گاز ایده آل

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{(1.0132 \times 10^5)(0.058)}{(287)(300)} = 0.06825 \text{ kg} \quad (e)$$

چون ظرف مذکور صلب است، هیچ گونه کاری بر روی هوا انجام نشده و قانون اول به صورت زیر درمی آید:

$$Q = U_2 - U_1 = m(u_2 - u_1) \quad (f)$$

با استفاده از جداول هوا (جدول A-۱۷M) در  $300 \text{ K}$  نتیجه می گیریم

$$u_1 = 214.09 \text{ kJ/kg} \quad \phi_1 = 2.5153$$

با جایگزینی عددی در رابطه (f)

$$10 \text{ kJ} = 0.06825(u_2 - 214.09)$$

$$u_2 = 3.0358 \text{ kJ/kg.K} \quad (g)$$

مقدار متناسب  $T_2$  با این مقدار  $u_2$  از جدول A-۱۷M برابر است با

$$T_2 = 511.5 \text{ K} \quad \phi_2 = 3.0358 \text{ kJ/kg.K} \quad (h)$$

چون حجم ثابت باقی می ماند، فشارنهایی از رابطه زیر محاسبه می گردد

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (i)$$

$$p_2 = (1) \left( \frac{511.5}{300} \right) = 1.705 \text{ atm}$$

برای محاسبه تغییر آنتروپی در واحد جرم مجدداً از معادله (a) استفاده می شود

$$s_2 - s_1 = 3.0358 - 2.5153 - \left( 0.287 \ln \frac{1.705}{1} \right) = 0.3674 \quad (j)$$

تغییر آنتروپی کل برابر است با

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= m(s_2 - s_1) = (0.06825)(0.3674) \\ &= 0.02508 \text{ kJ/K} \end{aligned} \quad (k)$$

## مثال ۶-۴ تراکم آنتروپی ثابت

هوا در یک دستگاه جریان دائم به طور آنتروپی ثابت از ۳۰۰ K و ۱۰۰ kPa تا دمای نهایی ۵۳۰ K متراکم می شود. با استفاده از جداول گاز مقدار کار به ازای هر پوند جرم هوا را محاسبه کرده و نتیجه را با مقدار کار به دست آمده اگر گرمای ویژه هوا را ثابت فرض کنیم، مقایسه کنید.

**حل:** داریم:

$$T_1 = 300 \text{ K} \quad T_2 = 530 \text{ K}$$

برای یک فرآیند جریان دائم با انرژی جنبشی ناچیز، کار آدیاباتیک انجام شده بر روی هوا عبارت است از



$$W = h_2 - h_1$$

از جداول گاز

$$h_2 = 533.98 \text{ kJ/kg}$$

$$h_1 = 300.19 \text{ kJ/kg}$$

و

$$W = 533.98 - 300.19 = 233.8 \text{ kJ/kg} \quad (100.5 \text{ Btu/lbm})$$

برای گرمای ویژه ثابت  $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ، تغییر در انتالپی برابر خواهد بود با

$$\begin{aligned} h_2 - h_1 &= c_p(T_2 - T_1) \\ &= (1.005)(530 - 300) \\ &= 231.2 \text{ kJ/kg} \quad (99.4 \text{ Btu/lbm}) \end{aligned}$$

بنابراین در این مثال خطای فرض گرمای ویژه ثابت در حد ۱ درصد خواهد بود.

## ۶-۹ گرمای ویژه در فشارهای بالا

معادله (۶-۳۲) بویژه در یافتن مقادیر عددی خواص برای مواد گوناگون مفید می‌باشد. از این

معادله می‌توان نسبت به فشار انتگرال گرفت.

$$(c_p)_{T,p} - (c_p)_{T,p=0} = \int_{p=0}^p T \left( \frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_p dp_T \quad (6-44)$$

بدین ترتیب وقتی که گرمای ویژه در فشار صفر (خیلی پایین) و معادله حالت ( $p, v, T$ ) معلوم باشد، می‌توانیم گرمای ویژه را در هر فشار و دمایی به دست آوریم. پس از تعیین گرمای ویژه، محاسبه انتالپی، آنترופی و انرژیهای داخلی امکان پذیر خواهد بود. به طور خلاصه وقتی که اطلاعات تجربی به دست آید، محاسبه خواص یک ماده خالص که فقط شامل یک فاز باشد امکان پذیر می‌باشد. این اطلاعات تجربی عبارت است از:

۱ - رفتار گرمای ویژه در فشار صفر

۲ - رفتار  $(p, v, T)$  در محدوده خاصیت موردنظر

گرمای ویژه چندین ماده در فشارهای پایین در جدولهای ۲-۲ و ۲-۳ داده شده است.

### ۱۰-۶ معادله کلاسیوس-کلاپیرون<sup>۱</sup>

روابطی که قبلاً داده شده است مسلماً به وجود آورنده مبنایی برای محاسبه خواص در منطقه‌ای دوفازی نیست. یک رابطه مفید برای چنین محاسبه‌ای معادله کلاسیوس-کلاپیرون است که اینک چگونگی به دست آوردن آن را تشریح خواهیم کرد. برای سادگی کار معادله (۶-۱۶a) را دوباره می‌نویسیم:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T \quad (6-16a)$$

یک ماده خالص ضمن تغییر از حالت مایع اشباع به حالت بخار اشباع فرآیندی را تحت دمای ثابت طی می‌کند. بعلاوه در منطقه اشباع، فشار و دما مستقل از حجم است لذا در معادله (۶-۱۶a) مشتقات را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v &= \frac{dp}{dT} \\ \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T &= \frac{s_g - s_f}{v_g - v_f} = \frac{s_{fg}}{v_{fg}} \end{aligned}$$

همچنین برای حرارت افزوده شده در فرآیند تبخیر فشار ثابت رابطه زیر را داریم:

$$\begin{aligned} Q &= \Delta u - W \\ &= u_g - u_f + p(v_g - v_f) \\ &= h_g - h_f = h_{fg} \end{aligned}$$

اما در فرآیند دمای ثابت  $Q = Ts_{fg}$  است به طوری که

$$s_{fg} = \frac{h_{fg}}{T} \quad (۶-۴۵)$$

با توجه به روابط قبل معادله (۶-۱۶a) به صورت زیر در می آید :

$$\frac{dp}{dT} = \frac{h_{fg}}{Tv_{fg}} \quad (۶-۴۶)$$

معادله (۶-۴۶) معادله کلاسیوس - کلاپیرون نامیده می شود. مشتق  $dp/dT$  نشان دهنده شیب منحنی فشار بخار بوده و کاربرد رابطه مذکور مشهود است. احتمالاً خواص مایع اشباع را می توان از یک معادله حالت مناسب و یک حالت مبنای دلخواه مشخص شده تعیین نمود. انتالپی و آنتروپی آب اشباع در  $0^\circ\text{C}$  برابر صفر در نظر گرفته شده است. داده های آزمایشی ممکن است جهت تشکیل یک معادله تجربی برای منحنی فشار بخار مورد استفاده قرار گیرد، در آن صورت شیب این منحنی را می توان از معادله (۶-۴۶) به دست آورد. سپس  $v_{fg}$  از مقادیر جداگانه  $v_f$  و  $v_g$  تعیین شده و معادله (۶-۴۶) برای محاسبه مقدار  $h_{fg}$  و بالاخره  $h_g$  به کار می رود. پس از تعیین خواص بخار اشباع معادلات گوناگون بخش ۶-۶ برای پیدا کردن خواص بخار داغ به کار گرفته می شود.

### مثال ۶-۵ تعادل جامد - بخار

فشار اشباع برای یک مخلوط در حال تعادل آب شامل فازهای جامد و بخار در  $80^\circ\text{F}$  را محاسبه کنید، اگر  $p_{sat} = 0.0019 \text{ psia}$  در  $40^\circ\text{F}$  و  $h_{ig}$  اساساً در  $1221/2 \text{ Btu/lbm}$  ثابت می باشد.

حل : برای حل این مسئله معادله کلاسیوس - کلاپیرون را به کار خواهیم گرفت، در فشارهای خیلی پایین بخار آب تقریباً رفتار گاز ایده آل را دارد و

$$v_g = \frac{RT}{p} \quad (a)$$

همچنین  $v_i \gg v_g$  بنابراین  $v_{ig} \cong v_g$  و معادله (۶-۴۶) برای خط تعادل جامد - بخار به صورت زیر

در می‌آید:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{ph_{ig}}{RT^2} \quad (b)$$

که  $v_g$  برای معادله (a) جایگزین شده است. می‌توان از معادله (b) بین دو دما انتگرال گرفت

$$\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{h_{ig} dT}{RT^2}$$

یا

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{h_{ig}}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (c)$$

با استفاده از اطلاعات داده شده  $T_2 = 380^\circ \text{R}$ ،  $T_1 = 420^\circ \text{R}$  و

$$\begin{aligned} \ln \frac{p_2}{p_1} &= \frac{(1221.2)(778)}{85.6} \left( \frac{1}{420} - \frac{1}{380} \right) \\ &= -2.78 \end{aligned}$$

یا

$$\frac{p_2}{p_1} = 0.062$$

و

$$p_2 = (0.062)(0.0019) = 1.178 \times 10^{-4} \text{ psia} \quad (0.812 \text{ Pa})$$

## ۶-۱۱ ساخت جداول خواص ترمودینامیکی

اینک ممکن است که نکات عمده روش کلی برای ساخت جدولهای خواص ترمودینامیکی را خلاصه نمود. مطالب ذکر شده به نقاط و ناحیه‌های نشان داده شده در شکل ۶-۱ مربوط می‌شود.

(الف) اطلاعات آزمایشی لازم

- ۱ - اطلاعات گرمای ویژه در فشار پایین برای مایع و بخار
- ۲ - اطلاعات  $p$ - $v$ - $T$  برای مایع، بخار و ناحیه‌گاز فوق بحرانی

۳ - اطلاعات آزمایشی برای تغییرات  $p$ - $T$  منحنی تبخیر

(ب)

روابط تجربی که مستقیماً از نتایج آزمایش بدست می آید

۱ - گرمای ویژه در فشار پایین به صورت تابعی از دما

۲ - معادلات حالت ( $p, v, T$ ) برای مایع، بخار و مناطق فوق بحرانی

۳ - رابطه تجربی برای منحنی تبخیر  $p$ - $T$

۴ - تعیین حالت مبنای دلخواه برای انتالپی و آنترופی

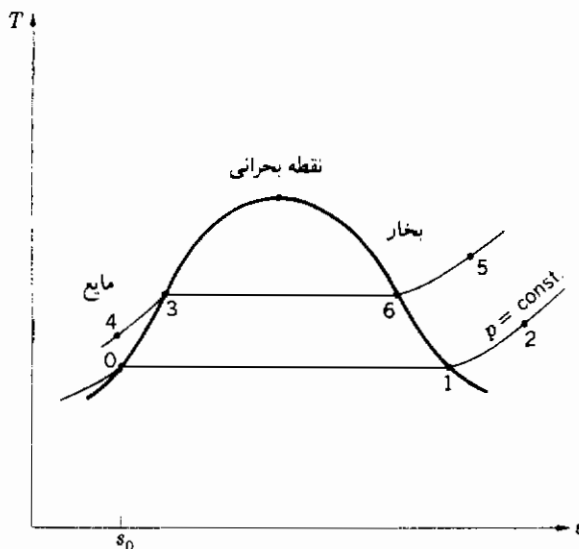
(ج)

روشهای تعیین خواص

۱ - خواص مایع و از جمله خواص مایع اشباع از معادله حالت ( $p$ - $v$ - $T$ ) برای مایع و

گرمای ویژه آن، و حالت مبنای انتخاب شده تعیین می گردد. نقاط ۰، ۳، ۴ را در

شکل ۶-۱ ببینید.



شکل ۶-۱ نمودار ناحیه‌های مختلف برای تعیین خاصیت ترمودینامیکی

۲ - خواص  $p$ - $\hat{v}$ - $T$  بخار شامل  $v_g$  از معادله حالت ( $p, v, T$ ) برای بخار بدست

می آید. نقاط 1، 2، 5 را در شکل ۶-۱ ببینید.

۳ - انتالپیها و انتروپیههای بخار اشباع ( $h_g$  و  $s_g$ ) با استفاده از خواص مایع اشباع،  $v_g$  و معادلات (۶-۴۵) و (۶-۴۶) به همراه اطلاعات منحنی تبخیر، تعیین می گردد. نقاط 1 و 6 را در شکل ۶-۱ ببینید.

۴ - انتالپیها و انتروپیههای بخار از  $h_g$ ،  $s_g$ ، معادله حالت ( $p-v-T$ ) برای بخار و معادله گرمای ویژه برای بخار تعیین می شود. نقاط 2 و 5 را در شکل ۶-۱ ببینید.

۵ - برای ناحیه فوق بحرانی شاید یک معادله حالت جداگانه مورد نیاز باشد.

در این جا لازم به تذکر است که ساخت جداول خواص ترمودینامیکی کار طاقت فرسایی است و خیلی بیش از آنچه از بحثهای قبل استنباط می گردد، به دید فیزیکی نیاز دارد. اندازه گیریهای آزمایشی خواص مواد ممکن است با عدم قطعیت قابل ملاحظه ای همراه باشد و در معادله حالتی که از این اندازه گیریها حاصل می گردد این عدم قطعیت باید به صورت شایسته ای در نظر گرفته شود. منظور از این نکته نگران کردن خواننده نیست، بلکه برعکس تأکید بر این حقیقت است که در عمل باید روش نسبتاً ساده گفته شده با اطلاعات خیلی زیاد آزمایشی، دید فیزیکی، شکیبایی، و کاربرد کامپیوتر توأم باشد تا بتوان یک جدول دقیق خواص ترمودینامیکی برای هر ماده تهیه نمود.

### نمودار مولیر<sup>۱</sup>

نمودار مولیر و یا منحنی انتالپی نسبت به آنترופی نمودار عملی مفیدی است که در شکل ۶-۲ نشان داده شده است. یک نشانه جالب این نمودار آن است که ایزوترمهای (خطوط دمای ثابت) در منطقه دوفازی در نتیجه رابطه داده شده در معادله (۶-۱۷b)، به صورت خطهای راست رسم می شود. واضح است که جمله  $(\partial h / \partial s)_p$  شیب یک خط فشار ثابت در نمودار مولیر است، اما در ناحیه مخلوط مرطوب خط فشار ثابت خط دمای ثابت نیز می باشد لذا معادله (۶-۱۷b) در این منطقه یک شیب ثابت را پیش بینی می کند. همان طور که قبلاً اشاره شد یک نمودار مولیر برای بخار در شکل ۴-A ضمیمه داده شده که در تحلیل سیکل قدرت بخار در فصل ۹ خیلی مفید خواهد بود.

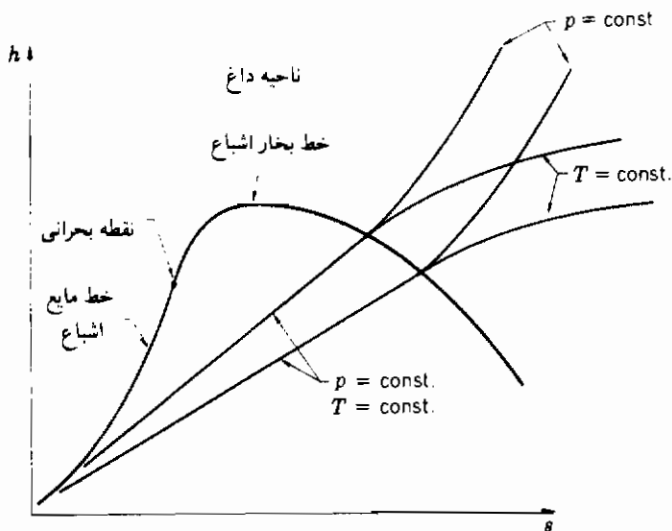
## ۶-۱۲ معادلات حالت

باتوجه به زمینه تئوری اشاره شده در قبل بهتر است که بعضی از شکلهای ویژه معادلات حالت را که در عمل به کار می‌رود مورد بررسی قرار دهیم.

معادله وان دروالز<sup>۱</sup>

بر طبق بحث ساده بخش ۱۴-۱ گاز ایده آل را می‌توان به صورتی در نظر گرفت که در آن:

- ۱ - فاصله فضایی ملکولهای خیلی زیاد است و ملکولها به صورت جرم‌های متمرکز رفتار می‌کنند.



شکل ۶-۲ طرحواره نمودار مولیر

۲ - میدانهای نیروی ملکولی به علت فاصله زیاد ملکولی تأثیر بسیار کمی بر روی فرآیندهای برخورد دارند.

۳ - به علت فاصله زیاد ملکولی حجم اشغال شده به وسیله ملکولها در مقایسه با حجم کل اشغال شده توسط گاز خیلی کم است.

هنگام فشردن یک گاز ملکولها اجباراً به یکدیگر نزدیک شده، در نهایت رفتار گاز غیر ایده آل آشکار می گردد. بالاخره ممکن است عکس العمل داخلی میدان نیروها چنان قوی باشد که گاز به مایع تبدیل گردد. در سال ۱۸۷۹ وان دروالز معادله حالتی پیشنهاد کرد که رفتار گاز غیرایده آل را دربرداشته باشد. این معادله چنین است :

$$(p + \frac{a}{v^2})(\bar{v} - b) = RT \quad (۶-۴۷)$$

$a$  ثابتی است که برای عکس العملهای داخلی میدان نیروی ملکولی منظور شده و ثابت  $b$  حجم اشغال شده توسط ملکولها را جبران می کند. استدلالی که در به دست آوردن عبارت  $a/v^2$  به کار رفته چنین است: وقتی یک گروه از ملکولها به سطحی برخورد می کنند، نیروی فشار وارده متناسب با چگالی ملکولی است (ملکولها بر واحد حجم،  $N/V$ ) زیرا این کمیت تعیین کننده تعداد برخوردهای ملکولی می باشد. برای اثرهای ملکول - ملکول (برخورد دو ملکول بایکدیگر) این طور استدلال شده که نیروی عکس العمل داخلی متناسب با  $(N/V)^2$  می باشد، زیرا اثر اصلی از برخورد دو ملکول بایکدیگر به دست می آید. واضح است که چگالی ملکولی متناسب با چگالی ماکروسکوپی (قابل رؤیت) گاز است که در حقیقت با  $1/v^2$  متناسب می باشد. بدین ترتیب برآیند نیروی عکس العمل داخلی با  $1/v^2$  متناسب و  $a$  ثابت تناسب است. ثابت  $b$  برای حجم مؤثر اشغال شده به وسیله ملکولها در نظر گرفته می شود.

برای استفاده از معادله وان دروالز باید مقادیر ثابتهای  $a$  و  $b$  از طریق آزمایش تعیین شود که خلاصه ای از این مقادیر برای گازهای مختلف در جدول ۶-۱ داده شده است.

یک شیوه قراردادی مورد استفاده برای تخمین ثابتهای وان دروالز، براساس رفتار مواد خالص در نقطه بحرانی استوار می باشد. در نمودار  $p-v$ ، خط دما ثابت عبورکننده از نقطه بحرانی با یک نقطه عطف در  $(T_c, v_c, p_c)$  مواجه می شود. بدین ترتیب :



جدول ۶-۱ ثابتهای وان دروالز

گاز	$a$		$b$		$Z_c = p_c v_c / RT_c$
	$\frac{\text{kN.m}^4}{(\text{kg mol})^2}$	$\frac{\text{atm.ft}^6}{(\text{lbm mol})^2}$	$\frac{\text{m}^3}{(\text{kg mol})}$	$\frac{\text{ft}^3}{\text{lbm mol}}$	
هوا	135.8	343.8	0.0365	0.585	0.284
O <sub>2</sub>	138.0	349.5	0.0318	0.510	0.29
N <sub>2</sub>	136.7	346	0.0386	0.618	0.291
H <sub>2</sub> O	551.7	1397.1	0.0304	0.487	0.23
CH <sub>4</sub>	228.6	578.9	0.0427	0.684	0.29
CO	147.9	374.5	0.0393	0.630	0.293
CO <sub>2</sub>	365.6	926	0.0428	0.686	0.276
NH <sub>3</sub>	424.9	1076	0.0373	0.598	0.242
H <sub>2</sub>	24.8	62.9	0.0266	0.426	0.304
He	3.42	8.66	0.0235	0.376	0.30

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_{T_c} = 0 \quad T = T_c \text{ در} \quad (6-48)$$

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial v^2}\right)_{T_c} = 0 \quad T = T_c \text{ در} \quad (6-49)$$

از حل معادله (۶-۴۷) برای  $p$  به دست می آوریم که

$$p = \frac{\Re T}{\bar{v} - b} - \frac{a}{\bar{v}^2} \quad (6-50)$$

با به کار گرفتن معادلات (۶-۴۸) و (۶-۴۹)

$$\frac{-\Re T_c}{(\bar{v}_c - b)^2} + \frac{2a}{\bar{v}_c^3} = 0 \quad (6-51)$$

$$\frac{2\Re T_c}{(\bar{v}_c - b)^3} - \frac{6a}{\bar{v}_c^4} = 0 \quad (6-52)$$

حال می توان معادلات (۶-۵۱) و (۶-۵۲) را برای ثابتهای  $a$  و  $b$  حل نمود.

$$a = 3p_c \bar{v}_c^2 = \frac{9}{8} \Re T_c \bar{v}_c = \frac{27}{64} \frac{\Re T_c^2}{p_c} \quad (6-53)$$

$$b = \frac{\bar{v}_c}{3} = \frac{\Re T_c}{8p_c} \quad (6-54)$$

بعلاوه برای گاز وان دروالز به دست می آوریم که

$$\frac{p_c \bar{v}_c}{\Re T_c} = \frac{3}{8} \quad (6-55)$$

خواص بحرانی برای چندین گاز که به وسیله اندازه گیریهای آزمایشی تعیین شده، در جدول ۶-۲ داده شده است. دقت عمل معادله وان دروالز را در نقطه بحرانی می توان خیلی سریع با استفاده از این اطلاعات و معادله (۶-۵۵) بررسی نمود. برای آب،

$$T_c = 647.27 \text{ K} \quad p_c = 22.105 \text{ MPa} \quad \bar{v}_c = 0.0568 \text{ m}^3/\text{kg mol}$$

$$\frac{p_c \bar{v}_c}{\Re T_c} = \frac{(22.105 \times 10^6)(0.0568)}{(8314)(647.27)} = 0.233$$

جدول ۶-۲ بعضی ثابتهای بحرانی انتخابی

گاز	$T_c$		$p_c$		$\bar{v}_c$	
	K	°R	MPa	atm	$(\text{m}^3/\text{kg mol}) \times 10^2$	$\text{ft}^3/\text{lbm mol}$
هوا	132.41	238.34	3.774	37.25	8.30	1.33
O <sub>2</sub>	154.78	278.6	5.080	50.14	7.43	1.19
N <sub>2</sub>	126.2	227.16	3.398	33.54	8.99	1.44
H <sub>2</sub> O	647.27	1165.3	22.105	218.167	5.68	0.91
CH <sub>4</sub>	190.7	343.26	4.640	45.8	9.93	1.59
CO	132.91	239.24	3.496	34.53	9.30	1.49
CO <sub>2</sub>	304.20	547.56	7.386	72.90	9.55	1.53
NH <sub>3</sub>	405.4	729.72	11.277	111.3	7.24	1.16
H <sub>2</sub>	33.24	59.83	1.297	12.8	6.49	1.04
He	5.19	9.34	0.229	2.26	5.81	0.93

این مقدار با معادله (۶-۵۵) مغایرت فاحشی دارد و به طور کلی با محاسبه مشابهی در مورد تعداد زیادی از مواد دیگر هم این مغایرت را می بینیم. البته خواننده نباید نسبت به این اختلاف نگرانی داشته باشد. انتظار می رود که رابطه تناسبی ساده در مورد عکس العمل داخلی میدان نیرو  $(a/\bar{v}^2)$  فقط برای انحرافات جزئی از رفتار گاز ایده آل به کار رود (یعنی برای فواصل ملکولی متوسط تا بزرگ). برای فواصل ملکولی نسبتاً نزدیک مثلاً در نقطه بحرانی امکان بیان نیروهای عکس العملی داخلی به وسیله این رابطه ساده وجود ندارد و انتظار نمی رود که معادله وان دروالز نتایج رضایت بخشی در این منطقه به دست دهد.

یک معادله حالت ساده تر، معادله کلاسیوس است که فرم اصلاح شده معادله وان دروالز است و در آن از نیروهای عکس العمل داخلی صرف نظر شده و به صورت زیر نوشته می شود.

$$p(\bar{v} - b) = \Re T \quad (6-56)$$

معادله حالت بتی - بریجمن<sup>۱</sup>

یکی از معادلات حالتی که کاربرد زیاد و دقت خوبی دارد معادله بتی - بریجمن می باشد

$$p = \frac{\Re T}{\bar{v}^2} (1 - e) (\bar{v} + B) - \frac{A}{\bar{v}^2} \quad (6-57)$$

که در آن

$$A = A_0 \left(1 - \frac{a}{\bar{v}}\right)$$

$$B = B_0 \left(1 - \frac{b}{\bar{v}}\right)$$

$$e = - \frac{c}{\bar{v} T^3}$$

پنج ثابت  $a$ ،  $A_0$ ،  $b$ ،  $B_0$  و  $c$  وجود دارد که باید از طریق تجربی تعیین شود. مقادیر این ثابتها برای چندین ماده در جدول ۶-۳ مشخص شده است.

جدول ۳-۶ فائدها برای معادله حالت بنی - بریجمن

	$c \times 10^{-6}$	$B_0$		$b$		$A_0$		$a$		
		$\frac{\text{m}^3 \cdot \text{K}^3 / \text{kg mol}}{\text{ftm mol}}$	$\frac{(\text{m}^3 / \text{kg mol}) \times 10^2}{\text{ftm mol}}$	$\frac{(\text{m}^3 / \text{kg mol}) \times 10^2}{\text{ftm mol}}$	$\frac{\text{ft}^3 / \text{lbm mol}}{(\text{kg mol})^2}$	$\frac{\text{atm} \cdot \text{ft}^6 / \text{lbm mol}}{(\text{kg mol})^2}$	$\frac{(\text{m}^3 / \text{kg mol}) \times 10^2}{\text{ftm mol}}$	$\frac{\text{ft}^3 / \text{lbm mol}}{\text{kg mol}}$		
434	4.05	4.61	0.739	-4.43	-0.716	131.9	334.1	1.93	0.309	$\text{H}_2$
480	4.48	4.63	0.741	0.42	0.0674	151.0	382.5	2.56	0.410	$\text{O}_2$
419.3	3.917	5.04	0.808	-0.692	-0.111	136.2	344.9	2.62	0.419	$\text{N}_2$
1282	11.98	5.59	0.895	-1.58	-0.254	230.8	584.6	1.85	0.297	$\text{CH}_4$
12002	112.12	18.1	2.90	4.29	0.688	120.7	305.8	7.32	1.173	$\text{C}_3\text{H}_8$
35005	327.02	24.62	3.944	9.43	1.51	180.2	456.5	12.16	1.948	$\text{C}_4\text{H}_{10}$
419	3.92	5.04	0.808	-0.069	-0.01105	136.2	344.9	2.62	0.419	$\text{CO}$
6599	61.65	10.48	1.678	7.24	1.159	507.4	1284.9	7.14	1.143	$\text{CO}_2$
47698	445.6	3.41	0.547	19.12	3.062	242.4	613.9	17.04	2.729	$\text{NH}_3$
5.04	0.0471	2.10	0.336	-4.35	-0.698	19.97	50.57	-0.506	-0.0811	$\text{H}_2$
0.399	0.00373	1.40	0.224	0	0	2.19	5.55	5.98	0.958	$\text{He}$

جدول ۳-۶ فائدها برای معادله حالت بندیکت - وِب - راسین (آحاد SI)

فایده	$C_4H_{10}$ (n-butane)	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>
19070	5000	13860	3710	2540	$\text{N} \cdot \text{m}^7/(\text{kg mol})^3, a$
10220	18790	27730	13587	$1.0673 \times 10^5$	$\text{N} \cdot \text{m}^4/(\text{kg mol})^2, A_0$
4000	338	721	263.2	232.8	$\text{m}^6/(\text{kg mol})^3, b$
12440	4260	4991	5454	4074	$\text{m}^3/\text{kg mol}, B_0$
$3.20 \times 10^{10}$	$2.578 \times 10^8$	$1.511 \times 10^9$	$1.054 \times 10^8$	$7.379 \times 10^7$	$\text{N} \cdot \text{m}^7 \cdot \text{K}^2/(\text{kg mol})^3, C$
$1.006 \times 10^{11}$	$2.286 \times 10^9$	$1.404 \times 10^{10}$	$8.673 \times 10^7$	$8.164 \times 10^8$	$\text{N} \cdot \text{m}^4 \cdot \text{K}^2/(\text{kg mol})^3, C_0$
$1.101 \times 10^{-3}$	$1.24 \times 10^{-4}$	$1.35 \times 10^{-4}$	$8.47 \times 10^{-5}$	$1.272 \times 10^{-4}$	$\text{m}^9/(\text{kg mol})^3, a$
0.0340	0.0060	0.00539	0.0060	0.0053	$\text{m}^6/(\text{kg mol})^2, \gamma$

معادله حالت بتی - بریجمن خواص را در ناحیه‌هایی که چگالی آن کمتر از مقدار  $0.8$  ضرب در چگالی بحرانی است، به دقت (با اختلاف ۲ درصد) پیش‌بینی می‌کند.  
دو معادله حالت مورد استفاده دیگر عبارت است از معادله برتولت<sup>۱</sup>:

$$p = \frac{\mathcal{R}T}{\bar{v} - b} - \frac{a}{T \bar{v}^2} \quad (6-58)$$

و معادله دیتیریچی<sup>۲</sup>

$$p = \frac{\mathcal{R}T}{\bar{v} - b} e^{-a/\mathcal{R}T \bar{v}} \quad (6-59)$$

معادله دیتیریچی خواص را در اطراف نقطه بحرانی و بر روی خط دما ثابت بحرانی پیش‌بینی می‌کند، در حالی که در سایر نواحی خیلی کمتر موفق است و در موقع کاربرد در مناطقی دور از نقطه بحرانی، ممکن است خطاهای قابل توجهی ایجاد نماید. به روشی نظیر معادله وان دروالز مقادیر ثابت به صورت زیر به دست آمده است:

$$a = \frac{4\mathcal{R}^2 T_c^2}{p_c e^2} \quad b = \frac{\mathcal{R} T_c}{p_c e^2}$$

به علاوه رابطه زیر را نیز به دست می‌آوریم:

$$\frac{p_c \bar{v}_c}{\mathcal{R} T_c} = 0.271 = \frac{2}{e^2}$$

این مقدار از عدد  $\frac{2}{e^2}$  پیش‌بینی شده به وسیله معادله وان دروالز به مقادیر به دست آمده از طریق آزمایش برای مواد خیلی نزدیکتر است.

معادله برتولت مشابه معادله وان دروالز است به جز این که مخرج جمله دوم شامل دما نیز می‌باشد. خطای این معادله برای فشارهای پایین با استفاده از معادله (6-53) برای  $a$  و رابطه  $b = 9\mathcal{R} T_c$  در حد ۱ درصد است.

یک رابطه تجربی پیچیده برای مناطقی با چگالی بالا تا حدود ۲ برابر چگالی بحرانی، معادله

1- Bertholet

2- Dieterici

بندیکت - وب - رابین<sup>۱</sup> [10] است که حاوی ۸ ثابت مختلف است که از طریق آزمایش تعیین می‌شود (جدول ۶-۴).

$$p = \frac{\Re T}{\bar{v}} + \frac{\Re TB_0 - A_0 - C_0/T^2}{\bar{v}^2} + \frac{\Re Tb - a}{\bar{v}^3} + \frac{a\alpha}{\bar{v}^6} + \frac{c}{\bar{v}^3 T^2} \left(1 + \frac{\gamma}{\bar{v}^2}\right) e \quad (6-60)$$

که  $\alpha, a, C_0, B_0, A_0$  و  $\gamma$  ثابتهای تجربی است. معادله حالت دیگر معادله ردلیک - وانگ<sup>۲</sup> است.

$$p = \frac{\Re T}{\bar{v} - b} + \frac{a}{\bar{v}(\bar{v} + b)T^{1/2}} \quad (6-61)$$

که ثابتهای آن برحسب خواص حالت بحرانی داده شده است.

$$a = 0.42748 \frac{\Re^2 T_c^{5/2}}{P_c} \quad (6-62)$$

$$b = 0.08664 \frac{\Re T_c}{P_c} \quad (6-63)$$

معادله حالت ویریال<sup>۳</sup>

معادله حالت ویریال نشان دهنده بسط حاصل ضرب  $p\bar{v}$  به شکل سری نامحدود است.

$$pv = \Re T \left(1 + \frac{B}{\bar{v}} + \frac{C}{\bar{v}^2} + \frac{D}{\bar{v}^3} + \dots\right) \quad (6-64)$$

ثابت‌های  $B, C, D$  و ... ضرایب ویریال خوانده شده و به‌دما بستگی دارند. لغت ویریال از کلمه لاتین نیرو سرچشمه گرفته و هر جمله در سری مذکور یک تصحیح متوالی نسبت به رفتار گاز ایده‌آل (یا شرایطی که هیچ‌گونه نیروی عکس‌العمل داخلی وجود ندارد) ایجاد می‌کند. در بعضی موارد می‌توان

1- Benedict-Webb-Rubin

2- Redlich-Kwong

3- Virial equation of state

مقادیر ضرایب ویریال را با توجه به نظرات ترمودینامیک آماری همراه با روابط تجربی برای میدانهای نیروی ملکولی محاسبه نمود. اگر چه چنین محاسبه‌ای کاملاً پیچیده به نظر می‌رسد، ولی فرموله کردن به روش ویریال رفتار  $p-v-T$  را برای حوزه وسیعی از چگالی‌ها بدقت پیش‌بینی می‌کند. گاهی ساده‌تر است که معادله ویریال را با در نظر گرفتن فشار به عنوان متغیر مستقل بیان نمود یعنی:

$$p \bar{v} = RT(1 + B'p + C'p^2 + D'p^3 + \dots) \quad (6-65)$$

معادلات حالت دیگری وجود دارد که به طریقی استخراج و اصلاح شده است که در مورد انواع مختلفی از مواد صدق نماید. همان‌طور که در بحث فوق نشان داده شده است هیچ‌گونه معادله حالتی وجود ندارد که به تنهایی برای تمام دماها و فشارها صادق باشد. برای اطلاعات مفصل‌تر درباره قابلیت کاربرد معادلات حالت مختلف می‌توان به منابع [2, 4, 6] رجوع کرد.

### ۶-۱۳ ضریب تراکم‌پذیری عمومی<sup>۱</sup>

چون معادله حالت گاز ایده‌آل خیلی ساده است لذا غیرطبیعی نخواهد بود که وسیله‌ای نیز برای اصلاح آن به منظور بیان رفتار گاز غیرایده‌آل پیدا کنیم. شیوه به کاررفته عبارت است از تعریف یک ضریب  $Z$  به نام ضریب تراکم‌پذیری به طوری که

$$Z = \frac{pv}{RT} \quad (6-66)$$

واضح است که برای یک گاز ایده‌آل  $Z = 1$  است و ضرایب ویریال در معادله (۶-۶۴) تنها سری تصحیحات در مورد رفتار گاز ایده‌آل را ایجاب می‌کنند. می‌توان بعضی اطلاعات عمومی درباره  $Z$  همانند آنچه در پاراگرافهای بعدی آمده، بیان داشت. ابتدا گاز وان دروالز را در نظر گرفته متغیرهای جدیدی به نام فشار کاهش یافته<sup>۲</sup> (ساده -

1- The generalized compressibility factor

2- Reduced pressure

نسبی بحرانی) حجم کاهش یافته و دمای کاهش یافته را تعریف می‌کنیم.

$$p_r = \frac{p}{p_c} = \text{فشار کاهش یافته}$$

$$v_r = \frac{v}{v_c} = \text{حجم مخصوص کاهش یافته}$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} = \text{دمای کاهش یافته}$$

با چند عمل جبری روی معادله وان دروالز، معادله (۶-۴۷)، همراه با روابط ۶-۵۳ و ۶-۵۴ برای ثابتها داریم:

$$Z^3 - \left(\frac{p_r}{8T_r} + 1\right) Z^2 + \left(\frac{27p_r}{64T_r^2}\right) Z - \frac{27p_r^2}{512T_r^3} = 0 \quad (6-67)$$

که  $Z$  ضریب تراکم‌پذیری تعریف شده در معادله (۶-۶۶) است.

واضح است که معادله (۶-۶۷) را می‌توان به‌طور صریح برای  $Z$  برحسب  $p_r$  و  $T_r$  حل نمود و در نتیجه فرض می‌کنیم که رابطه‌ای به‌شکل زیر وجود داشته باشد:

$$Z = f(p_r, T_r) \quad (6-68)$$

معادله (۶-۶۸) اصل حالات متشابه<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. بحثهای قبلی ما نشان داده است که معادله وان دروالز دقیق نیست و لذا در اولین نظر صحت معادله (۶-۶۸) مورد سؤال خواهد بود. اگرچه اندازه‌گیریهای آزمایشی نشان می‌دهد که براستی رابطه‌ای نظیر معادله (۶-۶۸) برای انواع زیادی از مواد وجود دارد ولی شکل تابع کاملاً با حل ارائه شده در مورد معادله (۶-۶۷) متفاوت می‌باشد. شکل ۶-۳ نموداری از داده‌های آزمایشی را ارائه می‌دهد که خود وجود یک رابطه عمومی نظیر معادله (۶-۶۸) را نشان می‌دهد. شکل‌های ۶-۴ تا ۶-۶ منحنی‌های محاسباتی نلسون-اُبرت<sup>۲</sup> را نشان می‌دهد که از اطلاعات تجربی گوناگونی بدست آمده است [2]. به تجربه ثابت شده که ساده‌تر است به‌جای  $v_r$  حجم شبه

1- Law of corresponding states

2- Nelson-Obert



کاهش یافته  $v'_r$  را رسم نمود که به وسیله رابطه زیر تعریف شده است:

$$v'_r = \frac{v}{RT_c p_c} = \text{حجم شبه کاهش یافته} \quad (6-69)$$

که می توان به شکل های دیگری نیز آن را بیان کرد.

$$\begin{aligned} v'_r &= \frac{v}{v_c} \frac{v_c}{RT_c p_c} = v_r Z_c \\ &= \frac{p}{RT} \frac{T/T_c}{p/p_c} = Z \frac{T_r}{p_r} \end{aligned} \quad (6-70)$$

منحنی های ضریب تراکم پذیری عمومی برای تفسیر رفتار گاز ایده آل مبنا و اساس صریح تری نسبت به آنچه که قبلاً در اختیار داشتیم، به وجود می آورند. گاز ایده آل گازی است که در آن  $Z = 1$  می باشد. در نتیجه برای پیش بینی محدوده ای از فشارها و دماهایی که یک ماده تحت آن شرایط رفتار گاز ایده آل را خواهد داشت فقط بررسی شکل ۵ - ۶ مورد نیاز است. دو نظریه عمومی که به دست می آوریم عبارت است از:

رفتار گاز ایده آل موقعی وجود دارد که:

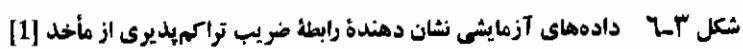
۱ -  $p_r$  در مقایسه با ۱ کوچک گردد یا

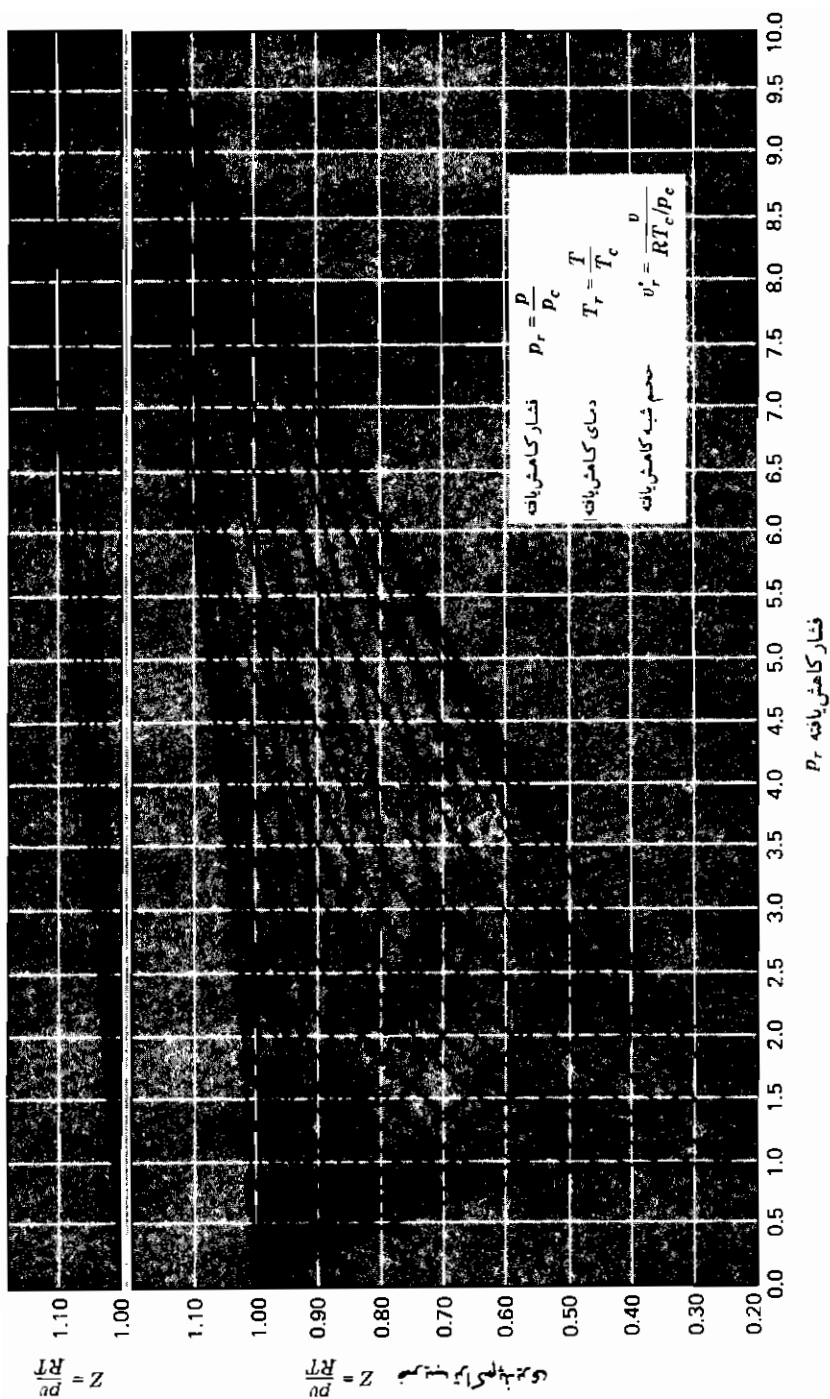
۲ -  $T_r$  در مقایسه با ۱ بزرگ گردد

به عنوان نمونه می توانیم رفتار نیتروژن را در  $300\text{ K}$  و  $100\text{ kPa}$  پیش بینی کنیم. از ثابت های بحرانی در جدول ۶-۲ به دست می آوریم که:

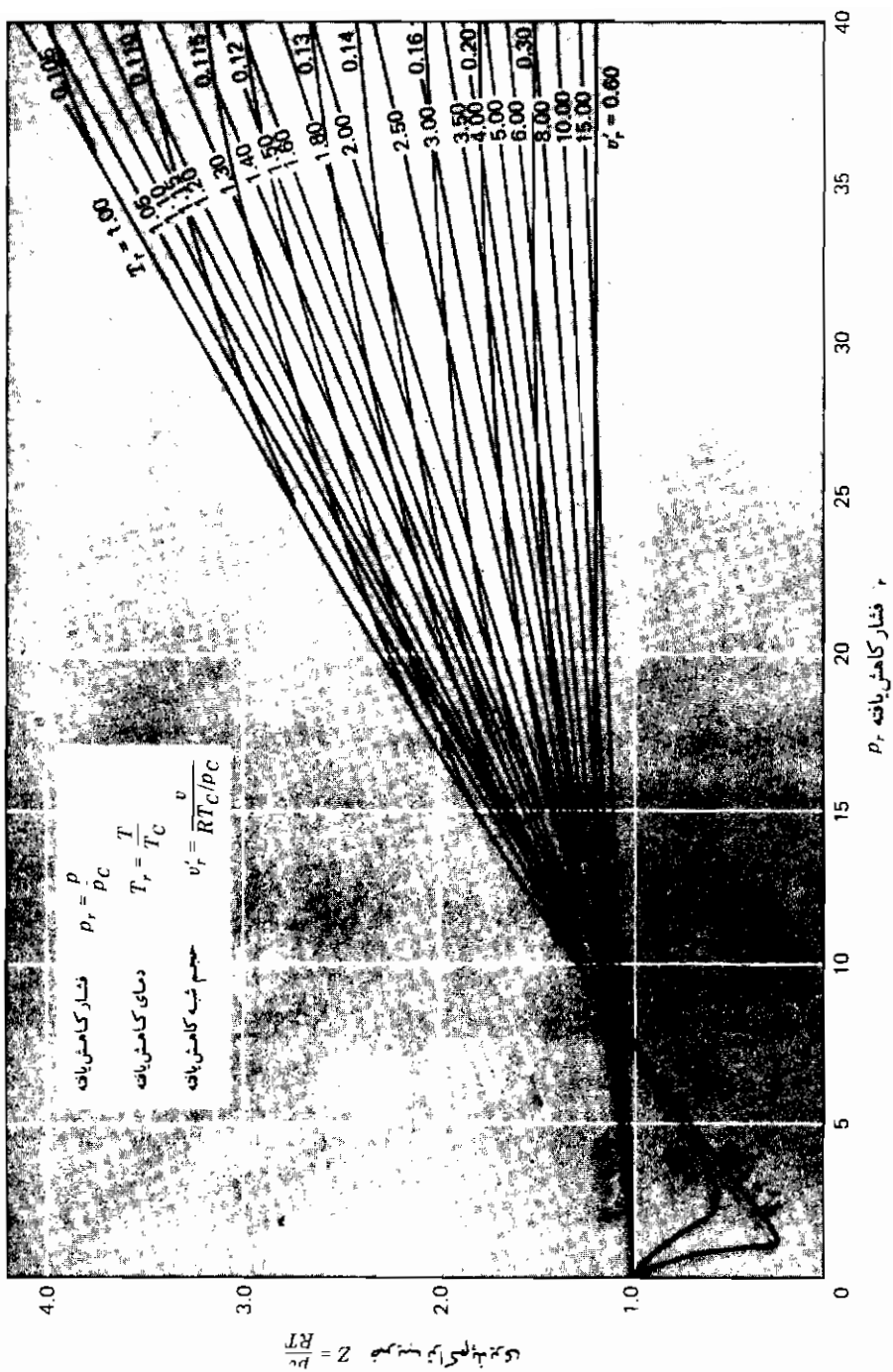
$$p_r = \frac{100}{3398} = 0.0294 \quad T_r = \frac{300}{126.2} = 2.38$$

فشار کاهش یافته خیلی کم است لذا رفتار گاز ایده آل را پیش بینی خواهیم کرد (همان طور که چندین مرتبه در فصل های قبلی فرض کرده ایم).

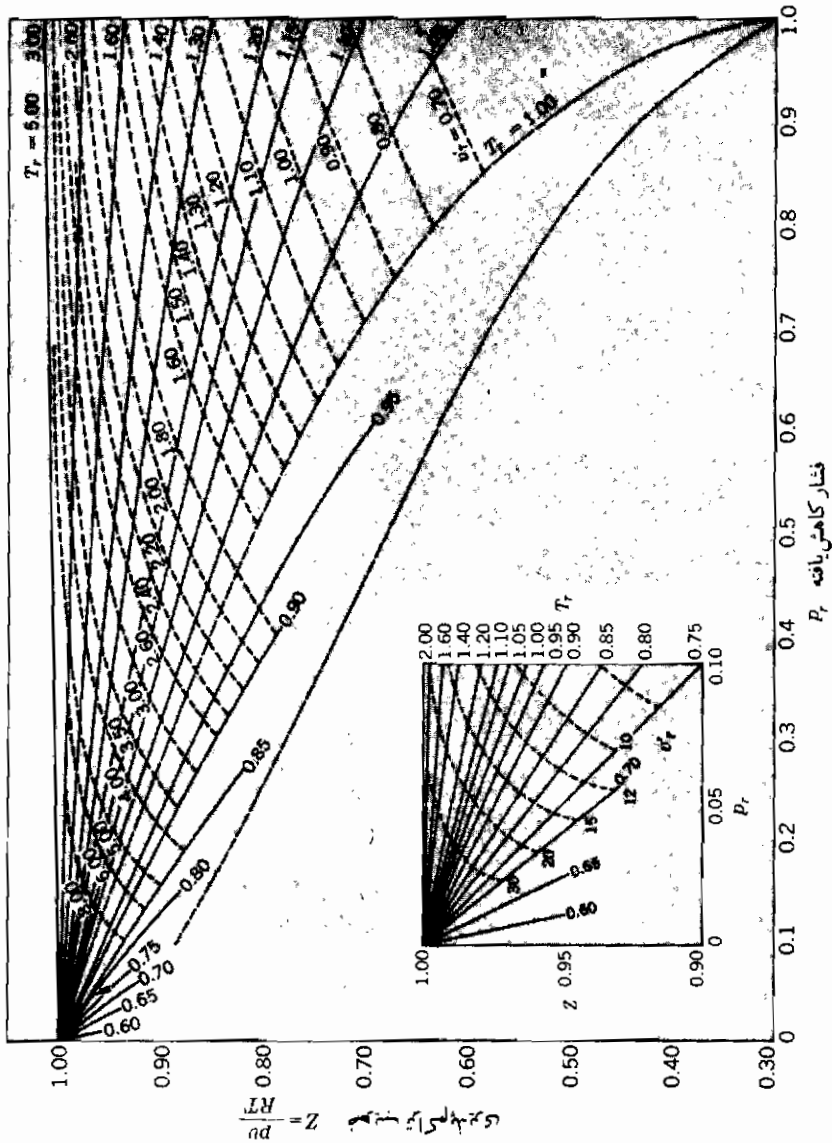




شکل ۶-۴ نمودار ضریب تراکم پذیری عمومی نلسون - اُبرت، بر طبق مأخذ [2]



شکل ۵-۶ نمودار ضریب تراکم پذیری عمومی نلسون - آبرت، بر طبق مأخذ [2]



شکل ۶-۶ نمودار ضریب تراکم پذیری عمومی نلسون - آپرت، منطقه فشار پائین بر طبق مأخذ [2]

## مثال ۶-۶ مقایسه معادلات حالت

مقداری  $\text{CO}_2$  با حجم مخصوص مولی  $2/8 \text{ ft}^3/\text{lbm mol}$  در  $200^\circ\text{F}$  در ظرف صلبی قرار دارد. فشار وارده توسط گاز را با استفاده از (الف) معادله گاز ایده آل (ب) معادله وان دروالز، و (ج) معادله بتی - بریجمن حدس بزنید.

**حل:** داریم:  $T = 200^\circ\text{F} = 600^\circ\text{R}$

$$\bar{v} = 2.8 \text{ ft}^3/\text{lbm.mol} \quad (0.1748 \text{ m}^3/\text{kg.mol})$$

(الف) برای معادله حالت گاز ایده آل

$$p = \frac{\mathcal{R}T}{\bar{v}} = \frac{(1545)(660)}{(2.8)(144)} = 2529 \text{ psia} = 172.1 \text{ atm}$$

(ب) ثابتهای وان دروالز برای  $\text{CO}_2$  از جدول ۶-۱ عبارت است از:

$$a = 926 \text{ atm.ft}^6/(\text{lbm.mol})^2$$

$$b = 0.686 \text{ ft}^3/\text{lbm.mol}$$

با استفاده از معادله (۶-۵۰) فشار را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\begin{aligned} p &= \frac{\mathcal{R}T}{\bar{v} - b} - \frac{a}{\bar{v}^2} \\ &= \frac{(1545)(660)}{(2.8 - 0.686)(144)} - \frac{(926)(14.696)}{(2.8)^2} \\ &= 1614 \text{ psia} = 109.8 \text{ atm} \end{aligned}$$

(ج) بالاخره معادله بتی - بریجمن (۶-۵۷) را با ثابتهای بدست آمده از جدول ۶-۳ به کار

می‌بریم.

$$a = 1.143 \text{ ft}^3/\text{lbm mol} \quad A_0 = 1284.9 \text{ atm.}(\text{ft}^3/\text{lbm mol})^2$$

$$b = 1.159 \text{ ft}^3/\text{lbm mol} \quad B_0 = 1.678 \text{ ft}^3/\text{lbm mol}$$

$$c = 61.65 \times 10^6 \text{ ft}^3 \cdot \text{R}^3/\text{lbm mol}$$

سپس

$$A = A_0 \left(1 - \frac{a}{v}\right) = (1284.9) \left(1 - \frac{1.143}{2.8}\right) = 760.4$$

$$B = B_0 = \left(1 - \frac{b}{v}\right) = 1.678 \left(1 - \frac{1.159}{2.8}\right) = 0.9384$$

$$e = \frac{c}{\bar{v}T^3} = \frac{61.65 \times 10^6}{(2.8)(660)^3} = 0.0766$$

سپس با استفاده از معادله (۶-۵۷)

$$\begin{aligned} p &= \frac{\mathcal{R}T}{\bar{v}^2} (1 - e)(\bar{v} + B) - \frac{A}{\bar{v}^2} \\ &= \frac{(1545)(660)(1 - 0.0766)(2.8 + 0.9384)}{(2.8)^2(144)} - \frac{(760.4)(14.696)}{(2.8)^2} \\ &= 1692 \text{ psia} = 115.2 \text{ atm} \end{aligned}$$

از این طریق محاسبات متوجه می‌شویم که تفاوتهای فاحشی در جوابهای بدست آمده از سه معادله حالت وجود دارد. براساس بحثهای قبلی پیش‌بینی می‌شود که محاسبه بتی - بریجمن دقیقترین آنها باشد و این حقیقت را بزودی ثابت خواهیم کرد.

### مثال ۶-۷ حالات متشابه

فشار وارده به وسیله  $\text{CO}_2$  را در مثال ۶-۶، با استفاده از قاعده حالات متشابه<sup>۱</sup> و نمودارهای ضریب تراکم‌پذیری عمومی محاسبه کنید.

**حل:** ثابتهای بحرانی برای  $\text{CO}_2$  از جدول ۶-۲ عبارت است از:

$$T_c = 548^\circ\text{R} \quad p_c = 72.9 \text{ atm} = 1071 \text{ psia}$$

$$\bar{v}_c = 1.53 \text{ ft}^3/\text{lbm mol}$$

سپس  $\bar{v}_r$  و  $T_r$  را برای استفاده از شکل ۶-۴ محاسبه می‌کنیم.

$$T_r = \frac{T}{T_c} = \frac{600}{548} = 1.204$$

$$\bar{v}_r = \frac{\bar{v}}{RT_c/p_c} = \frac{(2.8)(1071)(144)}{(1545)(548)} = 0.51$$

با استفاده از این مقادیر از شکل ۶-۴ می‌خوانیم

$$p_r = 1.6 \quad Z = 0.67$$

لذا فشار عبارت است از

$$p = p_r p_c = (1.6)(72.9) = 116.6 \text{ atm}$$

با این محاسبه می‌بینیم که در حقیقت محاسبه مثال ۶-۶ از طریق معادله بتی - بریجمن یعنی جواب به‌دست آمده ۱۱۶/۶، در مقایسه با ۱۱۵/۲ اتمسفر کاملاً دقیق بوده است. مطمئناً دقت این اعداد در حد دقت خواندن منحنیهاست. بررسی جوابهای دو روش دیگر مؤید خطای قابل ملاحظه آنهاست:

$$\text{خطای رابطه گاز ایده آل} = \frac{172.1 - 116.6}{116.6} = + 47.6\%$$

$$\text{خطای رابطه وان دروالز} = \frac{109.8 - 116.6}{116.6} = - 5.8\%$$

### مثال ۶-۸ خواص از حالات متشابه

جرم مخصوص نیتروژن را در  $150^\circ\text{F}$  و  $600 \text{ psia}$  حدس بزنید.

**حل:** ثابتهای بحرانی از جدول ۶-۲ عبارت است از:

$$p_c = 33.5 \text{ atm} = 482 \text{ psia}$$



$$T_c = 227^\circ\text{R}$$

$$\bar{v}_c = 1.44 \text{ ft}^3/\text{lbm mol}$$

فشار و دمای کاهش یافته را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$p_r = \frac{600}{482} = 1.245$$

$$T_r = \frac{310}{227} = 1.365$$

با مراجعه به شکل ۶-۳ و یا ۶-۴ پیدا می‌کنیم

$$Z = 0.83$$

حال حجم مخصوص از معادله (۶-۶۶) محاسبه می‌شود.

$$v = \frac{ZRT}{p} = \frac{(0.83)(55.12)(310)}{(600)(144)} = 0.164 \text{ ft}^3/\text{lbm}$$

جرم مخصوص عکس حجم مخصوص است بنابراین:

$$\rho = \frac{1}{0.164} = 6.1 \text{ lbm/ft}^3 \quad (97.7 \text{ kg/m}^3)$$

### مثال ۶-۸M خواص از حالات متشابه

جرم مخصوص نیتروژن را در ۱۷۰ K و ۴ MPa حدس بزنید.

**حل:** ثابتهای بحرانی از جدول ۶-۲ عبارت است از:

$$p_c = 3.398 \text{ MPa}$$

$$T_c = 126.2 \text{ K}$$

$$\bar{v}_c = 0.0899 \text{ m}^3/\text{kg mol}$$

فشار و دمای کاهش یافته را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$p_r = \frac{4}{3.398} = 1.177$$

$$T_r = \frac{170}{126.2} = 1.347$$

با مراجعه به شکل ۶-۳ و یا ۶-۴ پیدا می‌کنیم

$$Z = 0.85$$

حال حجم مخصوص از معادله (۶-۶۶) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} v &= \frac{ZRT}{p} = \frac{(0.85)(296.6)(170)}{(4 \times 10^6)} = 0.0107 \text{ m}^3/\text{kg} \\ &= 0.0107 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

جرم مخصوص عکس حجم مخصوص است بنابراین:

$$\rho = \frac{1}{0.0107} = 93.3 \text{ kg/m}^3 \quad (5.8 \text{ lbm/ft}^3)$$

### مثال ۶-۹M

فشار را برای نیتروژن محاسبه کنید که در آن  $v = 0.004 \text{ m}^3/\text{kg}$  و  $T = 170 \text{ K}$  باشد.

**حل:** ثابتهای بحرانی برای نیتروژن در مثال ۶-۸M داده شده است. با توجه به اطلاعات بالا برای دما و حجم کاهش یافته داریم:

$$T_r = \frac{170}{126.2} = 1.347$$

$$v'_r = \frac{v}{RT_c/p_c} = \frac{0.004}{(296.6)(126.2)/(3.398 \times 10^6)} = 0.363$$

از شکل ۶-۴ نتیجه می‌گیریم

$$p_r = 2.6$$

بنابراین فشار برابر است با

$$p = p_r p_c = (2.6)(3.398) = 8.83 \text{ MPa}$$

#### ۶-۱۴ خواص انرژی گازهای حقیقی

اصل حالات متشابه علاوه بر فراهم ساختن اطلاعات آشکاری درباره خواص  $p$ - $v$ - $T$ ، وسیله‌ای برای محاسبه خواص انرژی مواد مختلف نیز پیشنهاد می‌کند. نمودار رفتار انتالپی را که در شکل ۶-۷ نشان داده شده در نظر بگیرید. چون در فشارهای ساده خیلی پایین گاز از معادله حالت  $pV = RT$  پیروی می‌کند، لذا انتالپی فقط تابعی از دما است. در فشارهای بالاتر انتالپی به مقدار زیادی به فشار بستگی دارد. تغییر انتالپی در مقادیر پایین  $p_r$  را می‌توان به وسیله روشهای محاسبه‌ای اشاره شده در بخشهای گذشته به دست آورد. انتالپی این حالت تحت فشار پایین را به صورت  $\bar{h}^*$  تعریف می‌کنیم، سپس برای فشارهای بالاتر می‌توانیم از معادله (۶-۲۶) انتگرال بگیریم

$$(\bar{h} - \bar{h}^*)_T = \int_{p=0}^p \left[ \bar{v} - T \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial T} \right)_p \right] dp_T \quad (6-71)$$

اما

$$\bar{v} = \frac{ZRT}{p} \quad (6-72)$$

و

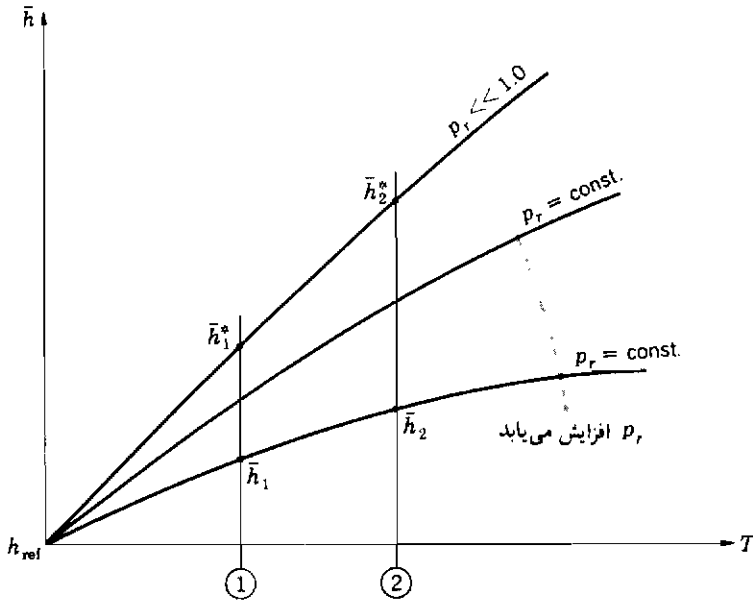
$$\left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial T} \right)_p = \frac{ZR}{p} + \frac{RT}{p} \left( \frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \quad (6-73)$$

با جایگذاری معادلات (۶-۷۲) و (۶-۷۳) در معادله (۶-۷۱) و بیان متغیرها بر حسب خواص کاهش یافته داریم:

$$(\bar{h} - \bar{h}^*)_T = -RT_c \int_0^{p_r} T_r^2 \left( \frac{\partial Z}{\partial T_r} \right)_p \frac{dp_r}{p_r} \quad (6-74)$$

در فرآیند دمای ثابت،  $T_r = \text{const.}$  است و می‌توان نوشت:

$$\left( \frac{\bar{h}^* - \bar{h}}{T_c} \right) = \Re T_c^2 \int_0^{p_r} \left( \frac{\partial Z}{\partial T_r} \right)_{p_r} \frac{dp_r}{p_r} \quad (۶-۷۵)$$



شکل ۶-۷ طرحواره تغییر انتالپی برای ماده خالص

سمت راست معادله (۶-۷۵) تابعی از  $T_r$  و  $p_r$  بوده و می توان آن را از انتگرال گیری عددی نمودارهای ضریب تراکم پذیری عمومی به دست آورد. نتیجه چنین محاسبه ای در شکل ۶-۸ نشان داده شده است.

جهت بدست آوردن نمودارهای عمومی برای آنتروپی می توان از راه مشابه با روش قبلی استفاده نمود. معادله نتیجه شده عبارت است از:

$$\bar{s}_p^* - \bar{s}_p = \Re \int_0^{p_r} \left[ Z - 1 + T_r \left( \frac{\partial Z}{\partial T_r} \right)_{p_r} \right]_{T_r} \frac{dp_r}{p_r} \quad (۶-۷۶)$$

$\bar{s}_p^*$  = آنتروپی گاز ایده آل ( $Z = 1$ ) در  $p$  و  $T$  نسبت به یک حالت مبنا

$\bar{s}_p$  = آنتروپی گاز حقیقی در  $p$  و  $T$  نسبت به همان حالت مبنا

نمودار عمومی برای آنتروپی در شکل ۶-۹ ارائه شده است.

## مثال ۶-۱۰ تراکم دما ثابت

متان ( $\text{CH}_4$ ) در یک فرآیند دما ثابت برگشت پذیر از  $20 \text{ psia}$  و  $100^\circ\text{F}$ ،  $500 \text{ psia}$  و  $t$  متراکم شده است. فرآیند در جریان دائم صورت می گیرد. کار لازم را برای هر پوند جرم متان محاسبه کنید.

**حل:** اگر بتوان از انرژیهای جنبشی صرف نظر کرد، معادله انرژی جریان دائم برای این فرآیند به صورت زیر در می آید:

$$Q + W + h_1 = h_2 \quad (a)$$

که  $Q$  و  $W$  به ترتیب حرارت و کار اضافه شده است. چون این یک فرآیند دما ثابت برگشت پذیر است لذا انتقال حرارت را می توان از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$Q = T(s_2 - s_1) \quad (b)$$

بنابراین کار برابر است با

$$W = h_2 - h_1 - T(s_2 - s_1) \quad (c)$$

لذا به تعیین مقادیر انتالپی و آنتروپی از نمودارهای عمومی نیاز داریم. خواص بحرانی متان عبارتند از:

$$T_c = 334^\circ\text{R} \quad (191.1 \text{ K})$$

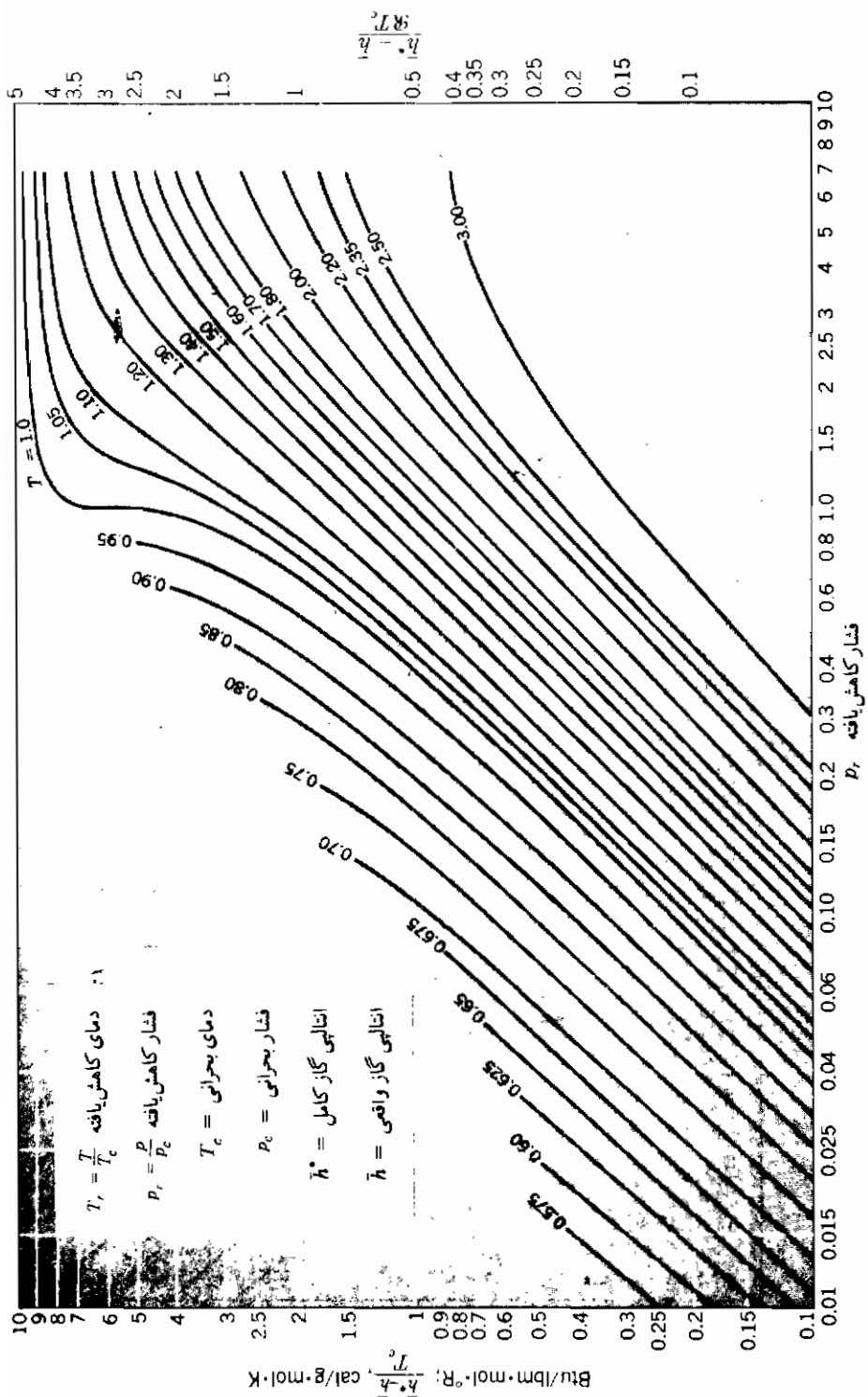
$$p_c = 45.8 \text{ atm} = 673 \text{ psia} \quad (46.42 \text{ bar})$$

خواص کاهش یافته مورد نظر عبارت است از:

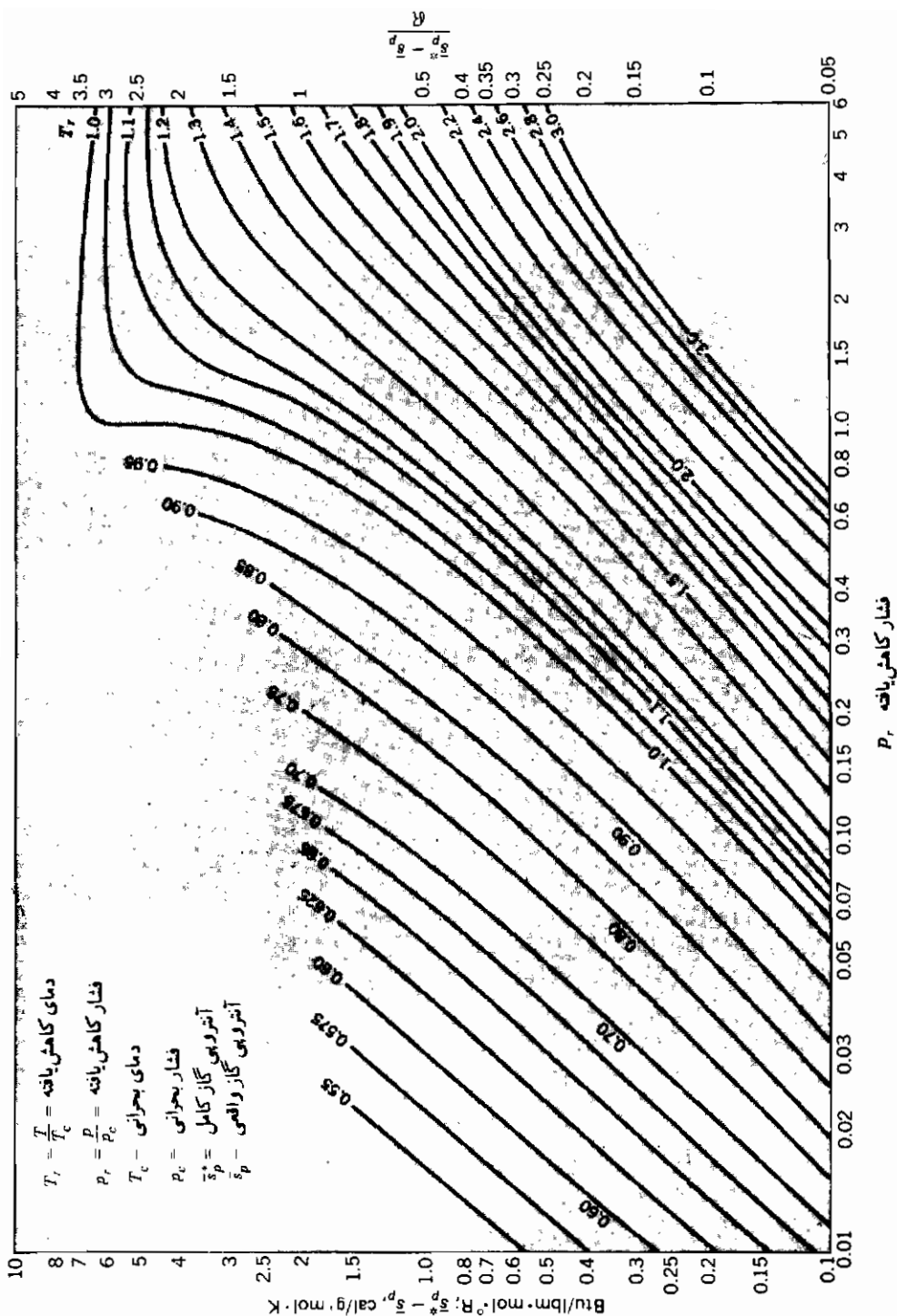
$$P_{r1} = \frac{20}{673} = 0.0297$$

$$P_{r2} = \frac{500}{676} = 0.743$$

$$T_r = \frac{560}{344} = 1.63$$



شکل ۸-۶ نمودار عمومی انتالپی برطبق مأخذ [4]



شکل ۹-۶ نمودار عمومی برای آنترپی بر طبق مآخذ [4]

از شکل ۶-۸، داریم:

$$\left( \frac{\bar{h}_1^* - \bar{h}_1}{T_c} \right) \approx 0.03 \quad \text{به وسیله برون یابی}$$

$$\left( \frac{\bar{h}_2^* - \bar{h}_2}{T_c} \right) = 0.68 \text{ Btu/lbm.mol.}^\circ\text{R}$$

چون  $T_1 = T_2$  لذا  $\bar{h}_1^* = \bar{h}_2^*$  و داریم

$$\begin{aligned} \bar{h}_2 - \bar{h}_1 &= (0.03 - 0.68)T_c \\ &= - (0.65)(344) = - 233 \text{ Btu/lbm.mol} \quad (- 519 \text{ kJ/kg.mol}) \end{aligned}$$

از شکل ۶-۹ داریم

$$\bar{s}_{p1}^* - \bar{s}_{p1} \approx 0.018 \quad \text{به وسیله برون یابی}$$

$$\bar{s}_{p2}^* - \bar{s}_{p2} = 0.35 \text{ Btu/lbm mol.}^\circ\text{R} \quad (1.456 \text{ kJ/kg.mol.K})$$

به طور کلی برای تغییر آنتروپی گاز ایده آل می نویسیم:

$$\bar{s}_{p2}^* - \bar{s}_{p1}^* = \bar{\phi}_2 - \bar{\phi}_1 - \Re \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (d)$$

در این فرآیند  $T_1 = T_2$  لذا  $\bar{\phi}_2 = \bar{\phi}_1$  و فقط نسبت فشار باقی می ماند. داریم

$$\begin{aligned} \bar{s}_{p2} - \bar{s}_{p1} &= (\bar{s}_{p1}^* - \bar{s}_{p1}) - (\bar{s}_{p2}^* - \bar{s}_{p2}) + (\bar{s}_{p2}^* - \bar{s}_{p1}^*) \\ &= 0.018 - 0.35 - \Re \ln \frac{P_2}{P_1} \\ &= - 0.332 - \frac{1545}{778} \ln \frac{500}{20} \\ &= - 6.71 \text{ Btu/lbm.mol.}^\circ\text{R} \quad (- 28.09 \text{ kJ/kg.mol.K}) \end{aligned}$$

حال می توان این خواص را در معادله (c) وارد کرد تا کار را به دست آوریم.

$$W = - 223 - (560)(- 6.71)$$



$$= 3537 \text{ Btu/lbm.mol} \quad (8227 \text{ kJ/kg.mol})$$

چون برای متان  $M = 16$ ، کار به ازای هر پوند جرم برابر است با

$$W = \frac{3537}{16} = 221 \text{ Btu/lbm} \quad (514 \text{ kJ/kg})$$

### مثال ۶-۱۰ تراکم دماثابت

متان ( $\text{CH}_4$ ) در یک فرآیند دماثابت برگشت پذیر از  $140 \text{ kPa}$ ،  $300 \text{ K}$  تا  $5 \text{ MPa}$  متراکم شده است. فرآیند جریان دائم صورت می گیرد. کار لازم به ازای هر کیلوگرم متان را محاسبه کنید.

**حل:** اگر بتوان از انرژی های جنبشی صرف نظر کرد، معادله انرژی جریان دائم برای این فرآیند به صورت زیر در می آید.

$$Q + W + h_1 = h_2 \quad (a)$$

که  $Q$  و  $W$  به ترتیب حرارت و کار اضافه شده است. چون فرآیند مذکور دماثابت برگشت پذیر است، لذا انتقال حرارت را می توان از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$Q = T(s_2 - s_1) \quad (b)$$

بنابراین کار برابر است با

$$W = h_2 - h_1 - T(s_2 - s_1) \quad (c)$$

لذا احتیاج به تعیین مقادیر انتالپی و آنتروپی از نمودارهای عمومی داریم. خواص بحرانی متان عبارت است از:

$$T_c = 190.7 \text{ K} \quad (343 \text{ }^\circ\text{R})$$

$$p_c = 4.640 \text{ MPa} \quad (673 \text{ psia})$$

خواص کاهش یافته مورد نظر عبارت است از :

$$p_{r1} = \frac{140}{4640} = 0.0302$$

$$p_{r2} = \frac{3.5}{4.640} = 0.754$$

$$T_r = \frac{300}{190.7} = 1.57$$

از شکل ۶-۸ داریم

$$\left( \frac{\bar{h}_1^* - \bar{h}_1}{\Re T_c} \right) \approx 0.016 \quad \text{به وسیله برون یابی}$$

$$\left( \frac{\bar{h}_2^* - \bar{h}_2}{\Re T_c} \right) = 0.39$$

چون  $T_1 = T_2$ ، لذا  $\bar{h}_1^* = \bar{h}_2^*$  و داریم

$$\begin{aligned} \bar{h}_2 - \bar{h}_1^* &= (0.016 - 0.39)\Re T_c \\ &= -(0.374)(8.314)(190.7) \\ &= -593 \text{ kJ/kg.mol} \quad (-255 \text{ Btu/lbm.mol}) \end{aligned}$$

از شکل ۶-۹ داریم

$$\frac{\bar{s}_{p1}^* - \bar{s}_{p1}}{\Re} \approx 0.011 \quad \text{به وسیله برون یابی}$$

$$\frac{\bar{s}_{p2}^* - \bar{s}_{p2}}{\Re} = 0.13$$

در حالت کلی برای تغییر در آنتروپی گاز ایده آل می نویسیم

$$\bar{s}_{p2}^* - \bar{s}_{p1}^* = \bar{\phi}_2 - \bar{\phi}_1 - \Re \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (d)$$

در این فرآیند  $T_1 = T_2$  لذا  $\bar{\phi}_2 = \bar{\phi}_1$  و فقط نسبت فشار باقی می ماند.

$$\bar{s}_{p2} - \bar{s}_{p1} = (\bar{s}_{p1}^* - \bar{s}_{p1}) - (\bar{s}_{p2}^* - \bar{s}_{p2}) + (\bar{s}_{p2}^* - \bar{s}_{p1}^*)$$

$$\begin{aligned}
 \bar{s}_{p2} - \bar{s}_{p1} &= R \left( 0.011 - 0.13 - \ln \frac{P_2}{P_1} \right) \\
 &= (8.314) \left( -0.119 - \ln \frac{3500}{140} \right) \\
 &= -27.75 \text{ kJ/kg.mol.K} \quad (-6.63 \text{ Btu/lbm.mol.}^\circ\text{R})
 \end{aligned}$$

حال می‌توان این خواص را در معادله (c) جایگزین کرد تا کار را به دست آوریم

$$\begin{aligned}
 W &= -593 - (300)(-27.75) \\
 &= 7732 \text{ kJ/kg mol} \quad (3324 \text{ Btu/lbm.mol})
 \end{aligned}$$

چون برای متان  $M = 16$ ، کار به ازای هر کیلوگرم برابر است با

$$W = \frac{7732}{16} = 483.3 \text{ kJ/kg} \quad (208 \text{ Btu/lbm})$$

### مثال ۶-۱۱ گرمایش در فشار ثابت

دی اکسید کربن ( $\text{CO}_2$ ) در یک فرآیند جریان دائم در فشار ثابت ۱۰۰۰ psia از  $100^\circ\text{F}$  تا  $800^\circ\text{F}$  گرم شده است. گرمایش لازم را برای هر پوند جرم  $\text{CO}_2$  محاسبه کنید.

**حس:** اگر از انرژیهای جنبشی صرف نظر بشود، انتقال حرارت برای این فرآیند برابر است با

$$Q = h_2 - h_1 \quad (a)$$

و مسأله عبارت است از تعیین تغییر در انتالپی از نمودارهای عمومی. ثابتهای بحرانی برای  $\text{CO}_2$  از جدول ۶-۲ عبارت است از:

$$p_c = 72.9 \text{ atm} = 1070 \text{ psia}$$

$$T_c = 548^\circ\text{R} \quad (304 \text{ K})$$

بنابراین خواص کاهش یافته مورد نظر عبارت است از:

$$p_{r1} = p_{r2} = \frac{1000}{1070} = 0.935$$

$$T_{r1} = \frac{560}{548} = 1.02$$

$$T_{r2} = \frac{1260}{548} = 2.3$$

از شکل ۶-۸ داریم

$$\left( \frac{\bar{h}_1^* - \bar{h}_1}{T_c} \right) = 3.5 \text{ Btu/lbm.mol.}^\circ\text{R}$$

$$\left( \frac{\bar{h}_2^* - \bar{h}_2}{T_c} \right) = 0.48 \text{ Btu/lbm.mol.}^\circ\text{R}$$

مقدار  $\bar{h}_2^* - \bar{h}_1^*$  را با انتگرال‌گیری از رابطه گرمای ویژه جدول ۲-۳ و یا با مراجعه به جدولهای گاز ارزیابی می‌کنیم. در این جا روش استفاده از جدولهای گاز را انتخاب کرده و مقادیر زیر را به دست می‌آوریم:

$$\bar{h}_1^* = 4235.8 \text{ Btu/lbm.mol}$$

$$\bar{h}_2^* = 11661.0 \text{ Btu/lbm.mol}$$

لذا داریم

$$\begin{aligned} \bar{h}_2 - \bar{h}_1 &= T_c(3.5 - 0.48) + \bar{h}_2^* - \bar{h}_1^* \\ &= (548)(3.5 - 0.48) + 11661 - 4235.8 \\ &= 9081 \text{ Btu/lbm.mol} \end{aligned}$$

چون وزن ملکولی  $\text{CO}_2$  برابر ۴۴ می‌باشد لذا انتقال حرارت به ازای هر پوند جرم برابر است با:

$$Q = h_2 - h_1 = \frac{9081}{44} = 207 \text{ Btu/lbm} \quad (481.5 \text{ kJ/kg})$$

جالب است که این مقدار را با عددی که از فرض رفتار گاز ایده آل با گرمای ویژه ثابت به دست خواهد آمد مقایسه کنیم. از جدول ۲-۲ داریم:

$$c_p (\text{برای } \text{CO}_2) = 0.202 \text{ Btu/lbm.}^\circ\text{F} \quad (0.846 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C})$$

انتقال حرارت را با فرض گرمای ویژه ثابت به صورت زیر محاسبه خواهیم کرد:

$$Q = c_p(T_2 - T_1) = (0.0202)(800 - 100) = 141 \text{ Btu/lbm} \quad (328 \text{ kJ/kg})$$

خطای این جواب تقریباً ۳۰ درصد است.

### مثال ۶-۱۱ گرمایش در فشار ثابت

دی اکسید کربن ( $\text{CO}_2$ ) در یک فرآیند جریان دائم در فشار ثابت ۷ MPa از ۳۰۰ K تا ۷۰۰ K گرم شده است. گرمایش لازم را برای هر کیلوگرم  $\text{CO}_2$  محاسبه کنید.

**حل:** اگر از انرژیهای جنبشی صرف نظر بشود، انتقال حرارت برای این فرآیند برابر است با

$$Q = h_2 - h_1$$

و مسأله عبارت است از تعیین تغییر در انتالپی از نمودارهای عمومی. ثابتهای بحرانی برای  $\text{CO}_2$  از جدول ۶-۲ عبارت است از:

$$p_c = 7.386 \text{ MPa}$$

$$T_c = 304.20 \text{ K} \quad (548^\circ\text{R})$$

بنابراین خواص کاهش یافته مورد نظر عبارت است از:

$$p_{r1} = p_{r2} = \frac{7}{7.386} = 0.948$$

$$T_{r1} = \frac{300}{304.2} = 0.986$$

$$T_{r2} = \frac{700}{304.2} = 2.30$$

از شکل ۶-۸ داریم

$$\left( \frac{\bar{h}_1^* - \bar{h}_1}{\Re T_c} \right) = 2.35$$

$$\left( \frac{\bar{h}_2^* - \bar{h}_2}{RT_c} \right) = 0.23$$

مقدار  $\bar{h}_2^* - \bar{h}_1^*$  را به وسیله انتگرال گیری از رابطه گرمای ویژه جدول ۶-۳ و یا با مراجعه به جدولهای گاز ارزیابی می کنیم. در این جا استفاده از جدولهای گاز را انتخاب نموده به دست می آوریم

$$\begin{aligned} \bar{h}_2^* - \bar{h}_1^* &= (\bar{h}_{700} - \bar{h}_{298}) - (\bar{h}_{300} - \bar{h}_{298}) \\ &= 17761 - 67 = 17694 \text{ kJ/kg.mol} \end{aligned}$$

سپس داریم:

$$\begin{aligned} (\bar{h}_2 - \bar{h}_1) &= RT_c (2.35 - 0.23) + \bar{h}_2^* - \bar{h}_1^* \\ &= (8.314)(304.2)(2.12) \\ &= 23056 \text{ kJ/kg.mol} \end{aligned}$$

چون وزن ملکولی  $\text{CO}_2$  برابر ۴۴ می باشد لذا انتقال حرارت به ازای هر کیلو گرم برابر است با:

$$Q = h_2 - h_1 = \frac{23056}{44} = 524 \text{ kJ/kg} \quad (225 \text{ Btu/lbm})$$

جالب است که این مقدار را با عددی که از فرض رفتار گاز ایده آل با گرمای ویژه ثابت به دست خواهد آمد، مقایسه کنیم. از جدول ۲-۲ داریم

$$c_p (\text{برای } \text{CO}_2) = 0.846 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C} \quad (0.202 \text{ Btu/lbm.}^\circ\text{F})$$

انتقال حرارت را با فرض گرمای ویژه ثابت به صورت زیر محاسبه می کنیم:

$$Q = c_p(T_2 - T_1) = (0.846)(700 - 300) = 338.4 \text{ kJ/kg} \quad (145 \text{ Btu/lbm})$$

خطای این جواب تقریباً ۳۵ درصد است.

## مثال ۶-۱۲ خفگی آدیاباتیک

نیترژن در دستگاه توی متخلخل ژول - تامسون به طور آدیاباتیک از ۵۰۰ psia و

$^{\circ}\text{F}$  ۱۰۰ - تا  $\text{psia}$  ۵۰ به طور آزاد منبسط می شود. دمای نهایی را محاسبه کرده و ضریب ژول - تاسون را در این ناحیه تخمین بزنید.

**حل:** همان طور که در بخش ۴-۷ بحث گردید فرض می کنیم که هیچ گونه انرژی جنبشی یا کار خارجی قابل ملاحظه ای در این فرآیند وجود نداشته باشد. بنابراین

$$h_1 = h_2$$

اگر نیتروژن رفتار گاز ایده آل را می داشت بدان معنی بود که دماهای اولیه و نهایی برابر است زیرا برای یک گاز ایده آل انتالپی فقط تابعی از دما است. ثابتهای بحرانی از جدول ۲-۶ عبارت است از:

$$p_c = 33.5 \text{ atm} = 492.5 \text{ psia}$$

$$T_c = 227^{\circ}\text{F}$$

لذا

$$p_{r1} = \frac{500}{492.5} = 1.015$$

$$T_{r1} = \frac{360}{227} = 1.586$$

$$p_{r2} = \frac{50}{492.5} = 0.1015$$

فرض می کنیم که در این محدوده دما، انتالپی در فشار پایین یا انتالپی گاز ایده آل  $\bar{h}^*$  را می توان با گرمای ویژه ثابت از جدول ۲-۲ محاسبه نمود. لذا برای نیتروژن:

$$c_p = 0.248 \text{ Btu/lbm. } ^{\circ}\text{F} \quad (1.038 \text{ kJ/kg. } ^{\circ}\text{C})$$

$$\bar{c}_p = 6.944 \text{ Btu/lbm.mol. } ^{\circ}\text{F}$$

با در نظر گرفتن انتالپی مبنا برابر صفر در صفر درجه رانکین

$$\bar{h}^* = 6.944T$$

و

$$\bar{h}_1^* = (6.944)(360) = 2500 \text{ Btu/lbm.mol}$$

با استفاده از مقادیر  $p_{r1}$  و  $T_{r1}$  از شکل ۶-۸ به دست می آوریم که

$$\frac{\bar{h}_1^* - \bar{h}_1}{T_c} = 1.05$$

بنابراین :

$$\bar{h}_1 = 2500 - (1.05)(227) = 2262 \text{ Btu/lbm.mol}$$

متأسفانه در شکل ۶-۸ هیچ گونه خطوط انتالپی ثابت وجود ندارد لذا برای به دست آوردن  $T_r$  ناگزیر از قبول یک روش تکراری هستیم به طوری که  $\bar{h}_1 = \bar{h}_2 = 2262$  باشد. با به کار بردن  $p_{r2} = 0.1015$  و شکل ۶-۸، تکرارها به صورت زیر است :

$T_2$	$\bar{h}_2^*$	$T_{r2}$	$\frac{\bar{h}_2^* - \bar{h}_2}{T_c}$	$\bar{h}_2$
360	2500	1.586	0.11	2475
340.5	2364	1.5	0.12	2336
317.8	2206	1.4	0.13	2177
329.8	2290	1.453	0.13	2261

البته لازم به تذکر است که نیتروژن در فشار پایین ۵۰ psia تقریباً نظیر گاز ایده آل رفتار خواهد کرد. از این محاسبه مشاهده می گردد که در فرآیند خفگی حدود ۳۰° کاهش دما (۳۶۰ - ۳۲۹/۸) صورت گرفته و دمای نهایی برابر است با

$$T_2 = 329.8^\circ\text{R} = -130.2^\circ\text{F} \quad (-90.1^\circ\text{C})$$



ضریب ژول - تامسون را می‌توان از رابطه زیر تخمین زد.

$$\begin{aligned}\mu_J &= \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \approx \left( \frac{\Delta T}{\Delta p} \right)_h = \frac{329.8 - 360}{50 - 500} \left( \frac{14.7 \text{ psia}}{\text{atm}} \right) \\ &= 0.987 \text{ }^\circ\text{F/atm} \quad (0.548 \text{ }^\circ\text{C/atm})\end{aligned}$$

از این مثال نتیجه می‌گیریم که برای محاسبات خفگی منحنی‌های ضریب ژول - تامسون مفید خواهد بود.

### ۶-۱۵ ترمودینامیک اثرات مغناطیسی

در بحث خواص ترمودینامیکی در فصل ۳ و این فصل به‌طور عمده تأکید بر ماده خالص یا واضح‌تر بگوییم ماده ساده تراکم‌پذیر بوده است. حال می‌خواهیم رفتار یک ماده مغناطیسی ساده را بررسی کنیم. به عبارتی ماده‌ای که برای مشخص کردن حالت ترمودینامیکی آن فقط احتیاج به دو خاصیت است. انرژی داخلی و گشتاور دوقطبی مغناطیسی  $M$  را به‌عنوان دو متغیر مستقل در نظر می‌گیریم. فرض می‌گردد که برای این ماده ساده کار از نوع  $p dv$  صرف‌نظر می‌شود (حجم ثابت) و تنها دو خاصیت برای تعیین حالت ترمودینامیکی سیستم لازم است. چگالی فلوی مغناطیسی  $B$  به‌وسیله رابطه زیر داده شده است:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (6-77)$$

$H$  شدت مغناطیسی میدان مغناطیسی خارجی،  $M$  گشتاور دوقطبی مغناطیسی یا بردار مغناطیسی در جهت میدان به کار رفته، و  $\mu_0$  ضریب نفوذپذیری فضای آزاد (خلأ) است. برطبق معادله (۶-۱۱) برای کار مغناطیسی بر واحد جرم می‌نویسیم:

$$\begin{aligned}d'W &= vH dB \\ &= \mu_0 vH dH + \mu_0 vH dM\end{aligned} \quad (6-78)$$

جمله اول نشان‌دهنده کار انجام شده بر روی فضای آزاد و جمله دوم بیانگر کار انجام شده به‌وسیله ماده

مغناطیسی است. معادله انرژی را می توان به صورت زیر نوشت :

$$du = d'Q + d'W = T ds + \mu_0 \nu H dM \quad (۶-۷۹)$$

کار انجام شده بر روی فضای آزاد را در نظر نمی گیریم زیرا ماده مغناطیسی را به عنوان سیستم ترمودینامیکی تحلیل می کنیم. در معادله (۶-۷۹) انرژی داخلی بر حسب متغیرهای مستقل  $ds$  و  $dM$  بیان شده است لذا می توان نوشت :

$$du = \left( \frac{\partial u}{\partial s} \right)_M ds + \left( \frac{\partial u}{\partial M} \right)_s dM \quad (۶-۸۰)$$

از مقایسه معادله (۶-۷۹) با (۶-۸۰) نتیجه می گیریم :

$$\left( \frac{\partial u}{\partial s} \right)_M = T \quad (۶-۸۱)$$

$$\left( \frac{\partial u}{\partial M} \right)_s = \mu_0 \nu H \quad (۶-۸۲)$$

معادله (۶-۸۱) را می توان به عنوان تعریف دما برای ماده مغناطیسی ساده در نظر گرفت.

در این جا لازم به تذکر است که جمله  $\mu_0 \nu H dM$  نقشی مشابه  $p dv$  برای یک ماده ساده تراکم پذیر دارد، همچنین شدت مغناطیسی  $H$  مشابه فشار و  $\mu_0 \nu dM$  مشابه یک تغییر حجم است. گرمای ویژه برای ماده مغناطیسی ساده را می توان به طور تقریبی با نوشتن مجدد معادله (۶-۷۹) به صورت زیر تعریف کرد :

$$d'Q = du - \mu_0 \nu H dM \quad (۶-۸۳)$$

فرآیندی را با  $H$  و  $M$  ثابت در نظر بگیرید.

$$d'Q_H = c_H dT_H = du_H - \mu_0 \nu H dM_H \quad (۶-۸۴)$$

اگر یک انتالپی مغناطیسی  $h_m$  به صورت زیر تعریف کنیم :

$$h_m = u - \mu_0 \nu H M \quad (۶-۸۵)$$

معادله (۶-۸۴) تبدیل می شود به

$$c_H dT_H = (dh_m)_H$$

یا

$$c_H = \left( \frac{\partial h_m}{\partial T} \right)_H \quad (6-86)$$

برای فرآیندی با  $M$  ثابت

$$c_M dT_M = du_M$$

و

$$c_M = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_M \quad (6-87)$$

بنابراین  $c_H$  و  $c_M$  نظیر گرماهای ویژه در فشار ثابت و در حجم ثابت برای یک ماده تراکم پذیر ساده است.

مواد مغناطیسی ساده نظیر مواد تراکم پذیر ساده دارای معادلات حالت بوده و به شکل زیر بیان

شده است :

$$f(H, M, T) = 0$$

ماده کوری<sup>۱</sup> ماده ای است که دارای معادله حالت بسیار ساده ای است.

$$M = C \frac{H}{T} \quad (6-88)$$

$C$  ثابت کوری نامیده می شود. با نوشتن مجدد معادله (۶-۷۹) و جایگزین کردن  $H = MT/C$  داریم :

$$ds = \frac{1}{T} du - \frac{\mu_0 \nu M}{C} dM \quad (6-89)$$

چون رابطه بالا یک معادله دیفرانسیل کامل است لذا می توان مشتقات جزئی مختلط مرتبه دوم را مساوی

قرارداد تا رابطه زیر رابه دست آوریم.

$$\left[ \frac{\partial(1/T)}{\partial M} \right]_u = \frac{-\mu_0 v}{C} \left( \frac{\partial M}{\partial u} \right)_M = 0 \quad (6-90)$$

لذا به این نتیجه می‌رسیم که دما فقط تابعی از  $u$  می‌باشد یا  $u = f(T)$ . این نتیجه نظیر آن حقیقت است که انرژی داخلی یک گاز ایده‌آل فقط تابع دما می‌باشد. بنابراین رفتار این نوع ماده مغناطیسی ویژه کاملاً ساده است، همان‌طور که گاز ایده‌آل یک نوع خیلی ابتدایی ماده تراکم‌پذیر می‌باشد. بالاخره باتوجه به نتیجه‌ای که از معادله (6-90) به دست می‌آید برای یک ماده کوری می‌توان معادلات زیر را نوشت:

$$du = c_M dT \quad (6-91)$$

$$ds = c_M \frac{dT}{T} - \frac{\mu_0 v}{C} M dM \quad (6-92)$$

## ۶-۱۶ اثر ماگنتو کالریک

بسط تئوری فوق نشان می‌دهد که آنتروپی یک ماده مغناطیسی ساده را می‌توان برحسب  $T$  و  $H$  بوسیله رابطه زیر بیان نمود:

$$ds = \frac{c_H}{T} dT + \mu_0 v \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_H dH \quad (6-93)$$

آزمایش‌ها نشان می‌دهد که برای مواد پارامغناطیسی  $(\partial M / \partial T)_H$  همیشه منفی است. در نتیجه از معادله (6-93) درمی‌یابیم که:

- ۱ - یک افزایش برگشت‌پذیر دما ثابت در میدان مغناطیسی باعث دفع حرارت می‌شود یعنی وقتی که  $dH$  مثبت است  $T ds$  منفی می‌باشد.
- ۲ - یک کاهش برگشت‌پذیر دما ثابت در میدان مغناطیسی باعث جذب حرارت می‌گردد، یعنی وقتی که  $dH$  منفی است  $T ds$  مثبت می‌باشد.

از معادله (۹۳-۶) واضح است که برای یک فرآیند آدیاباتیک برگشت پذیر کاهش در میدان مغناطیسی باعث افت دما می گردد. این پدیده اثر ماگنتوکالریک نامیده شده و معمولاً برای رسیدن به دماهای خیلی پایین (حدود ۱ K) مورد استفاده قرار می گیرد. این فرآیندهای تحت دمای پایین نسبتاً ساده است: یک نمک پارامغناطیس به وسیله هلیوم مایع تا چند درجه کلوین سرد شده، تحت اثر یک میدان مغناطیسی قوی قرار می گیرد. انرژی حاصله از میدان نتیجتاً در هلیوم مایع پخش می شود. بعد از رسیدن به حالت تعادل ماده مغناطیسی منزوی شده و میدان مغناطیسی به صفر کاهش داده می شود، در نتیجه دمای ماده مذکور تا مقدار بسیار کوچکی پایین می آید.

### خودآزمایی (سؤالات مروری)

- ۱ - چرا خاصیت ترمودینامیکی تابع نقطه ای است؟
- ۲ - توابع هلمهولتز و گیبس را تعریف کنید .
- ۳ - کمترین اطلاعات لازم برای تشکیل یک جدول خواص ترمودینامیکی برای ماده ای خالص چیست؟
- ۴ - چرا آزمایش ژول - تامسون در تعیین خواص ترمودینامیکی مفید است؟
- ۵ - درباره رفتار گرمای ویژه و انرژی داخلی برای یک گاز ایده آل چه اطلاعاتی در دست است؟
- ۶ - تشکیل جدولهای گاز شامل چه فرضهای اساسی است؟
- ۷ - معنی  $P_r$ ،  $v_r$  و  $\phi$  به کار رفته در جداول گاز چیست؟
- ۸ - رابطه کلاسیوس - کلاپرون چه ارزش عملی دارد؟
- ۹ - چرا در منطقه مخلوط - مرطوب در نمودار مولیر خط فشار - ثابت یک خط مستقیم است؟
- ۱۰ - معمولاً تحت چه شرایطی (بر حسب فشار بحرانی و در دمای بحرانی) رفتاری نزدیک به رفتار گاز ایده آل مشاهده می گردد؟
- ۱۱ - اصل حالات متشابه چیست؟
- ۱۲ - ماده مغناطیسی ساده را تشریح کنید. تفاوت آن با ماده تراکم پذیر ساده چگونه است؟
- ۱۳ - اثر ماگنتوکالریک را تشریح کنید.
- ۱۴ - از چه رابطه خواص ترمودینامیک برای ارتباط بین تحلیل ترمودینامیک میکروسکوپی و

ماکروسکپی استفاده می‌شود؟

۱۵ - چه اندازه گیریهای تجربی برای تعیین خواص ترمودینامیکی لازم است؟

۱۶ - گاز واندروالز چیست؟ مدل فیزیکی آن چیست؟

۱۷ - ضریب تراکم پذیری عمومی چیست؟

### مسائل (آحاد انگلیسی)

۶-۱ هوا به طور آنتروپی ثابت از یک سرعت پایین و  $50 \text{ psia}$  تا فشار اتمسفر منبسط می‌شود.

سرعت نهایی را برای دماهای اولیه (الف)  $1000^\circ\text{F}$  (ب)  $100^\circ\text{F}$  محاسبه کنید. نتیجه را با سرعت نهایی به دست آمده در صورتی که هواگرماهای ویژه ثابت می‌داشت مقایسه کنید.

۶-۲ فرض کنید که تغییر در آنتروپی برای دو فرآیند انبساطی مسئله ۶-۱ برابر  $0.08 \text{ Btu/lbm}^\circ\text{R}$  باشد. سرعت خروجی را با فرض این که فرآیند مذکور هنوز آدیاباتیک ولی برگشت‌ناپذیر باشد محاسبه کنید.

۶-۳ سطح مقطع خروجی شیوره را برای شرایط مسائل ۶-۱ و ۶-۲ محاسبه کنید در صورتی که دبی جرمی  $1 \text{ lbm/s}$  باشد.

۶-۴ هوا از  $10^\circ\text{F}$  و  $15 \text{ psia}$  تا  $500^\circ\text{F}$  و  $60 \text{ psia}$  متراکم شده است. تغییر در آنتروپی را محاسبه کنید.

۶-۵ هوا در یک توربین از  $55 \text{ psia}$ ،  $2000^\circ\text{F}$  تا  $20 \text{ psia}$  منبسط می‌شود. سرعت اولیه جریان  $200 \text{ ft/s}$  و سرعت خروجی  $800 \text{ ft/s}$  است. اگر فرآیند به طور آنتروپی ثابت صورت پذیرد، کار خروجی توربین را محاسبه کنید.

۶-۶  $100 \text{ lbm}$  دی‌اکسیدکربن در  $100^\circ\text{F}$  و  $1500 \text{ psia}$  در ظرف صلبی که ممکن است با محیط اطراف تبادل حرارت داشته باشد وجود دارد. شیر موجود در کنار ظرف باز شده و  $\text{CO}_2$  به آرامی خارج می‌شود تا وقتی که فشار تا  $700 \text{ psia}$  پایین بیاید، در این لحظه شیر بسته می‌شود. در خاتمه فرآیند دمای داخل مخزن برابر  $70^\circ\text{F}$  می‌باشد. جرم دی‌اکسیدکربنی را که از مخزن خارج می‌شود محاسبه کرده و انتقال حرارت از محیط به مخزن را با استفاده از (الف) روابط گاز ایده آل و (ب) نمودارهای ضریب تراکم پذیری

عمومی به دست آورید.

۶-۷ اگر مخزن مسأله ۶-۶ کاملاً عایق می‌بود، چقدر جرم خارج می‌شد و دمای نهایی داخل مخزن چقدر بود؟

۶-۸ اتان ( $C_2H_6$ ) به‌طور آدیاباتیک از ۸۵۰ psia و ۷۵۰ °F تا ۱۰۰ psia، خفه می‌شود. دمای نهایی و تغییر در آنتروپی برواحد جرم را محاسبه کنید.

۶-۹ دی‌اکسیدکربن در ۱۰۰۰ psia و ۸۰۰ °F به‌طور آنتروپی ثابت در یک شیبوره تا فشار ۵۰۰ psia منبسط می‌شود. سرعت ورودی به‌شیبوره پایین بوده و می‌توان جریان را دائم فرض نمود. دمای خروجی و سرعت خروجی را با استفاده از (الف) گاز ایده‌آل با گرماهای ویژه ثابت و (ب) نمودارهای عمومی تراکم‌پذیری محاسبه کنید.

۶-۱۰ فرض کنید که دی‌اکسیدکربن با شرایط اولیه یکسانی با مسأله ۶-۹ در یک شیبوره آیزنتروپیک تا سرعت ۱۲۰۰ ft/s منبسط شود. برای دبی جرمی ۰/۴ lbm/s چه سطح مقطعی برای جریان خروجی لازم خواهد بود؟

۶-۱۱ فشار بخار آب را در ۱۰۰۰ °F و  $v = 0.1143 \text{ ft}^3/\text{lbm}$  با استفاده از (الف) قانون گاز ایده‌آل، (ب) معادله وان در والز (ج) معادله بتی-بریدجن، و (د) جدولهای بخار آب محاسبه کنید.

۶-۱۲ فشارپیش‌بینی شده به وسیله معادله دیتریچی را با جدولهای بخار آب برای (الف)  $T = 700 \text{ °F}$  و  $v = 0.287 \text{ ft}^3/\text{lbm}$  و (ب)  $T = 1400 \text{ °F}$ ،  $v = 1/0.893 \text{ ft}^3/\text{lbm}$  مقایسه کنید. چرا نتایج این مقایسه با بحثهای موجود در کتاب درباره قابلیت کاربرد معادله دیتریچی مطابقت دارد؟

۶-۱۳ معادله گاز ایده‌آل، معادله وان در والز، و معادله برتولت را با مقادیر جدول‌بندی شده برای آمونیاک در (الف) ۲۰۰ °F،  $v = 13/73 \text{ ft}^3/\text{lbm}$ ، و (ب) ۳۶۰ °F و  $v = 2/265 \text{ ft}^3/\text{lbm}$  مقایسه کنید.

۶-۱۴ معادله گاز ایده‌آل و معادله دیتریچی را با مقادیر جدول‌بندی شده برای فریون ۱۲ در ۲۴۰ °F و  $v = 0.27323 \text{ ft}^3/\text{lbm}$  مقایسه کنید.

۶-۱۵ نشان دهید که رفتار دی‌اکسیدکربن و نیتروژن را در فشار و دمای اطاق (۲۰ °C، ۱ atm)

- می‌توان به صورت گاز ایده آل در نظر گرفت.
- ۶-۱۶ جرم هیدروژنی را که ممکن است در ظرفی به حجم  $1000 \text{ cm}^3$  در  $3700 \text{ psia}$  و  $60^\circ\text{C}$  وجود داشته باشد محاسبه کنید.
- ۶-۱۷ با استفاده از نمودارهای ضریب تراکم پذیری، حجم مخصوص هریک از مواد زیر را در شرایط داده شده محاسبه نمایید:
- (الف) هوادر  $70^\circ\text{F}$  و  $500 \text{ psia}$
- (ب) بوتان ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) در  $100 \text{ psia}$  و  $900^\circ\text{F}$
- (ج) دی اکسید کربن در  $500 \text{ K}$  و  $50 \text{ atm}$
- (د) اکسید ازت ( $\text{NO}$ ) در  $100 \text{ atm}$  و  $200 \text{ K}$
- (ه) آب در  $800 \text{ K}$  و  $50 \text{ atm}$
- ۶-۱۸ با استفاده از مقادیر جدول بندی شده فشار بخار برای آب، انتالپی تبخیر برای آب را در  $100 \text{ psia}$  محاسبه کنید. این محاسبه را با مقدار داده شده در جدولهای بخار آب مقایسه کنید.
- ۶-۱۹ فشار بخار فریون ۱۲ را در  $150^\circ\text{F}$  تخمین بزنید.
- ۶-۲۰ فشار بخار آمونیاک را در  $100^\circ\text{F}$  و  $140^\circ\text{F}$  تخمین بزنید.
- ۶-۲۱ بخار آب به طور آنتروپی ثابت از  $500 \text{ psia}$ ،  $500^\circ\text{F}$  تا  $10 \text{ psia}$  متبسط می‌گردد. با استفاده از نمودار مولیر اولاً تغییر در انتالپی و دمای نهایی را به دست آورید در صورتی که بخار داغ باشد. ثانیاً اگر بخار اشباع باشد کیفیت نهایی را محاسبه کنید.
- ۶-۲۲ مسأله ۶-۲۱ را برای انبساط از  $100 \text{ psia}$ ،  $100^\circ\text{F}$  تا  $2 \text{ psia}$  تکرار کنید.
- ۶-۲۳ بخار آب در فشار ثابت  $20 \text{ psia}$  از حالت بخار اشباع تا  $500^\circ\text{F}$  گرم شده است. با استفاده از نمودار مولیر حرارت لازم در یک فرآیند جریان دائم را محاسبه کنید.
- ۶-۲۴ برای گرم کردن  $1 \text{ lbm}$  هوا از  $200^\circ\text{F}$  تا  $1500^\circ\text{F}$  در فشار ثابت  $20 \text{ psia}$  چقدر انرژی لازم است؟ اگر محاسبه با فرض گرمای ویژه ثابت انجام می‌گرفت خطای حاصل چند درصد بود؟
- ۶-۲۵ ظرف صُلبی به حجم  $10 \text{ ft}^3$  با هوای  $100^\circ\text{F}$  و  $15 \text{ psia}$  پُر شده است. به آن حرارت می‌دهیم تا وقتی که دما به  $1800^\circ\text{F}$  برسد. فشار نهایی و تغییر در آنتروپی چیست؟ چقدر



انرژی اضافه شده است؟

۶-۲۶ انرژی لازمی را که باید به هوای مسأله ۶-۲۵ افزوده شود تا فشار آن به  $100 \text{ psia}$  برسد، محاسبه کنید. دمای نهایی چیست؟

۶-۲۷ وقتی که هوادر پشت پیستون یک سیلندر به طور آنتروپی ثابت از  $1500^\circ\text{F}$ ،  $100 \text{ psia}$  تا  $30 \text{ psia}$  منبسط می شود، کار به ازای هر پوند جرم را محاسبه کنید. با فرض رفتار گرمای ویژه ثابت خطای حاصل چند درصد است؟

۶-۲۸ با استفاده از خواص بخار آب اشباع در  $40^\circ\text{F}$ ، فشار بخار را در  $35^\circ\text{F}$  محاسبه کنید.

۶-۲۹ انتالپی گداز<sup>۱</sup> برای آب در  $32^\circ\text{F}$  برابر  $143/3 \text{ Btu/lbm}$  می باشد. دمای ذوب یخ را در فشار  $3000 \text{ psia}$  حدس بزنید.

۶-۳۰ عبارتی برای  $(u_2 - u_1)_T$  در مورد گاز وان دروالز به دست آورید. چگونه این جواب با نتیجه به دست آمده در مورد گاز ایده آل تفاوت دارد؟ آیا می توانید توضیحی برای این اختلاف بر مبنای فیزیکی ارائه کنید.

۶-۳۱ حجم مخصوص اکسیژن و نیتروژن را در  $500 \text{ atm}$  و  $1500^\circ\text{F}$  تخمین بزنید.

۶-۳۲ عبارتی برای ضریب ژول - کلوین در مورد گاز وان دروالز به دست آورید.

۶-۳۳ با استفاده از اطلاعات حالت بحرانی داده شده در ضمیمه برای اتان ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )، جرم مخصوص آن را در  $300^\circ\text{F}$  و  $500 \text{ psia}$  محاسبه کنید.

۶-۳۴ کار لازم برای متراکم کردن متان از  $50 \text{ psia}$ ،  $200^\circ\text{F}$  تا  $700 \text{ psia}$  را در یک فرآیند برگشت پذیر دما ثابت محاسبه نمایید.

۶-۳۵ نیتروژن یک فرآیند خفگی آدیاباتیک را از  $2000 \text{ psia}$  و  $150^\circ\text{F}$  - تا  $20 \text{ psia}$  طی می کند. دمای نهایی در فرآیند مذکور را محاسبه کنید.

۶-۳۶ دی اکسید کربن در یک فرآیند جریان دائم آنتروپی ثابت از  $100 \text{ psia}$  تا  $1500 \text{ psia}$  متراکم شده است. دمای اولیه  $70^\circ\text{F}$  می باشد. کار لازم برای انجام عمل تراکم و دمای نهایی را محاسبه کنید. نتایج را با جوابهایی که از فرض رفتار  $\text{CO}_2$  به صورت یک گاز ایده آل با گرماهای ویژه ثابت به دست می آید مقایسه کنید.

- ۶-۳۷ مخزنی حاوی اکسیژن در  $1000 \text{ psia}$  و  $150^\circ\text{F}$  - می باشد. اگر حجم مخزن  $1 \text{ gal}$  ( $231 \text{ in}^3$ ) باشد جرم اکسیژن موجود در آن را محاسبه نمایید.
- ۶-۳۸ مخزن مسأله ۶-۳۷ آن قدر گرم می شود تا دمایش به  $100^\circ\text{F}$  - برسد. مقدار انتقال حرارت را محاسبه کنید.
- ۶-۳۹ چه مقدار حرارت باید به مخزن مسأله ۶-۳۷ داده شود تا این که فشارش تا  $1500 \text{ psia}$  بالا رود؟
- ۶-۴۰ بخار آب در شرایط  $1500 \text{ psia}$  و  $650^\circ\text{F}$  در یک فرآیند جریان دائم به طور آنتروپی ثابت تا فشار  $5500 \text{ psia}$  تراکم می شود. با استفاده از نمودارهای عمومی کار به ازای هر پوند جرم را محاسبه کرده و با جواب به دست آمده از جدولهای بخار آب مقایسه کنید.
- ۶-۴۱ پروپان (جدول  $A-5$ ،  $\text{C}_3\text{H}_8$ ) به طور آدیاباتیک از  $25 \text{ psia}$ ،  $150^\circ\text{F}$  تا  $750^\circ\text{F}$ ،  $500 \text{ psia}$  متراکم شده است. با در نظر گرفتن یک فرآیند جریان دائم، کار ورودی و تغییر در آنتروپی برپوند جرم را با استفاده از (الف) گاز ایده آل، گرماهای ویژه ثابت و (ب) نمودارهای عمومی ضریب تراکم پذیری محاسبه نمایید.
- ۶-۴۲ آمونیاک در  $280 \text{ psia}$  و  $360^\circ\text{F}$  در ظرف صلبی به حجم  $15 \text{ ft}^3$  قرار دارد. گرمایی را که باید از آن گرفته شود تا دما به  $180^\circ\text{F}$  برسد یا استفاده از (الف) روابط گاز ایده آل (ب) نمودارهای عمومی ضریب تراکم پذیری و (ج) جدولهای آمونیاک محاسبه کنید.
- خطا در هر کدام از این روشها چقدر است؟
- ۶-۴۳ بخار آب در یک توربین به طور آنتروپی ثابت در یک فرآیند جریان دائم از  $5000 \text{ psia}$  و  $1600^\circ\text{F}$  تا  $500 \text{ psia}$  منبسط می شود. کار خروجی و دمای نهایی بخار آب را با استفاده از (الف) روابط گاز ایده آل با گرماهای ویژه ثابت (ب) نمودارهای عمومی ضریب تراکم پذیری و (ج) جدولهای بخار آب محاسبه نمایید.

### مسائل (آحاد متریک)

- ۶-۱M جرم مخصوص و ضریب تراکم پذیری را برای سیالهای زیر در  $p = 10 \text{ MPa}$  و  $T = 650 \text{ K}$  تعیین کنید:

(الف) آمونیاک

(ب) نیتروژن

(ج) اکسیژن

(د) هپتان

۶-۲M با استفاده از نمودارهای تراکم پذیری عمومی فشاری را به دست آورید که در آن فشار، جرم مخصوص محاسبه شده از رابطه گاز ایده آل برای نیتروژن در  $45^{\circ}\text{C}$  حدود ۵ درصد خطا داشته باشد.

۶-۳M متان با دبی حجمی  $4/5 \text{ m}^3/\text{s}$  در فشار  $p = 4 \text{ MPa}$  و  $T = 30^{\circ}\text{C}$  در لوله ای جریان دارد. با استفاده از رابطه گاز ایده آل و ضریب تراکم پذیری دبی جرمی آن را تعیین کنید.

۶-۴M مقدار  $0/5 \text{ m}^3$  نیتروژن در  $p = 60 \text{ MPa}$  و  $T = 450 \text{ K}$  در مخزنی قرار دارد. مقدار جرم آن را با استفاده از (الف) معادله گاز ایده آل (ب) معادله وان دروالز و (ج) ضرایب تراکم پذیری محاسبه کنید.

۶-۵M مقدار  $h - h^*$  را برای بخار آب در  $3 \text{ MPa}$  و  $360^{\circ}\text{C}$  با استفاده از نمودار عمومی و جداول بخار آب محاسبه کنید.

۶-۶M مسأله ۶-۵M را برای فشار  $10 \text{ MPa}$  تکرار کنید.

۶-۷M انتالپی نیتروژن را در  $200 \text{ K}$  و  $7 \text{ MPa}$  محاسبه کنید. انتالپی گاز ایده آل را در  $0 \text{ K}$  برابر صفر در نظر بگیرید.

۶-۸M آنتروپی مطلق نیتروژن را در  $200 \text{ K}$  و  $7 \text{ MPa}$  با استفاده از نمودارهای انحراف آنتروپی محاسبه کنید.

۶-۹M نیتروژن به طور آدیاباتیک از شرایط  $20 \text{ MPa}$  و  $200 \text{ K}$  تا  $1/5 \text{ MPa}$  خفه می شود. دمای نهایی، تغییر در آنتروپی و برگشت ناپذیری را برای  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$  محاسبه نمایید.

۶-۱۰M با استفاده از نمودار عمومی تراکم پذیری، انرژی لازم جهت گرم نمودن بخار آب را در فشار ثابت  $20 \text{ MPa}$  از حالت بخار اشباع تا دمای  $640^{\circ}\text{C}$  محاسبه نموده آن را با مقادیر به دست آمده از جداول بخار آب مقایسه کنید.

۶-۱۱M  $1 \text{ kg}$  متان در یک فرآیند فشار ثابت از  $20^{\circ}\text{C}$  تا  $100^{\circ}\text{C}$  در فشار  $6 \text{ MPa}$  حرارت می یابد.

مقدار گرمایش لازم را محاسبه کنید.

۶-۱۲M نشان دهید که خطوط فشار ثابت در ناحیه مخلوط تر یک نمودار مولیر، خطوط مستقیم و غیر موازی می باشد.

۶-۱۳M اتان به طور آدیاباتیک در یک توربین گازی از  $200^{\circ}\text{C}$  و  $30\text{ MPa}$  تا  $70^{\circ}\text{C}$  و  $6\text{ MPa}$  منبسط می شود. جریان حجمی در ورود  $1\text{ m}^3/\text{s}$  است. با استفاده از گرمای مخصوص در فشار پایین از جدول ۲-۲، قدرت خروجی توربین را محاسبه کنید.

۶-۱۴M  $1\text{ kg/s}$  متان در یک فرآیند جریان دائم از  $1/5\text{ MPa}$  و  $60^{\circ}\text{C}$  تا  $20\text{ MPa}$  و  $300^{\circ}\text{C}$  متراکم می شود. با استفاده از نمودارهای عمومی، تغییر انتالپی و تغییر آنتروپی را محاسبه کنید.

۶-۱۵M انتالپی تبخیر آب در  $100^{\circ}\text{C}$ ،  $120^{\circ}\text{C}$  و  $180^{\circ}\text{C}$  را با استفاده از معادله کلاسیوس - کلاپیرون تخمین زده مقدار آن را با مقادیر جداول بخار آب مقایسه کنید.

۶-۱۶M نیتروژن به طور دما ثابت از  $300\text{ K}$  و فشار کم تا  $6\text{ MPa}$  متراکم می شود. مقدار  $h^* - h$  را به کمک نمودارهای عمومی محاسبه کنید.

۶-۱۷M بخار آب به طور آدیاباتیک و برگشت پذیر در یک توربین از  $24\text{ MPa}$  و  $480^{\circ}\text{C}$  تا  $10\text{ MPa}$  منبسط می شود. با استفاده از نمودارهای عمومی برای جریان  $1/5\text{ kg/s}$ ، کار خروجی را محاسبه کنید. محاسبه را با جداول بخار آب مقایسه کنید.

۶-۱۸M  $2\text{ kg}$  دی اکسید کربن ( $\text{CO}_2$ ) به طور آنتروپی ثابت در یک دستگاه جریان دائم از  $500\text{ kPa}$  و  $300\text{ K}$  تا  $3/5\text{ MPa}$  متراکم می شود. کار ورودی را محاسبه کنید.

۶-۱۹M نشان دهید که برای گاز وان دروالز روابط زیر صادق می باشد.

$$(\bar{h}_2 - \bar{h}_1)_T = P_2 \bar{v}_2 - P_1 \bar{v}_1 + a \left( \frac{1}{\bar{v}_1} - \frac{1}{\bar{v}_2} \right)$$

$$(\bar{s}_2 - \bar{s}_1)_T = R \ln \frac{\bar{v}_2 - b}{\bar{v}_1 - b}$$

۶-۲۰M رابطه زیر را به دست آورید:

$$\frac{c_p}{c_v} = \frac{(\partial p / \partial v)_s}{(\partial p / \partial v)_T}$$

۶-۲۱M عبارتی برای  $(\partial u / \partial p)_T$  به دست آورید که فقط شامل  $p$  و  $v$  و  $T$  باشد.

۶-۲۲M عبارتی برای  $(\partial h / \partial v)_T$  به دست آورید که فقط شامل  $p$  و  $v$  و  $T$  باشد.

۶-۲۳M نشان دهید که برای گاز وان دروالز

$$\beta = \frac{\Re \bar{v}^2 (\bar{v} - b)}{\Re T \bar{v}^3 - 2a(\bar{v} - b)^2}$$

$$\kappa = \frac{\bar{v}^2 (\bar{v} - b)^2}{\Re T \bar{v}^3 - 2a(\bar{v} - b)^2}$$

۶-۲۴M نشان دهید که برای یک گاز وان در والز که یک فرآیند برگشت پذیر آدیاباتیک را طی می کند روابط زیر صادق است :

$$T(\bar{v} - b)^{\Re/c_v} = \text{const.}$$

$$\left(p + \frac{a}{\bar{v}^2}\right)(\bar{v} - b)^{1 + (\Re/c_v)} = \text{const.}$$

۶-۲۵M نشان دهید که برای گاز وان دروالز

$$\bar{c}_p - \bar{c}_v = \frac{\Re}{1 - 2a(v - b)^2 / \Re T \bar{v}^3}$$

۶-۲۶M نشان دهید که ضریب ژول - تامسون برای گاز وان دروالز برابر است با:

$$\mu_J = \frac{\bar{v}}{\bar{c}_p} \frac{2a(\bar{v} - b)^2 - \Re T b \bar{v}^2}{\Re T \bar{v}^3 - 2a(\bar{v} - b)^2}$$

در نتیجه نشان دهید که منحنی معکوس روی یک نمودار  $p-v$  ممکن است به شکل عمومی زیر بیان شود :

$$p = \frac{a}{b \bar{v}} \left(2 - \frac{3b}{\bar{v}}\right)$$

۶-۲۷M نشان دهید که معادله وان دروالز ممکن است به شکل عمومی زیر بیان گردد :

$$p_r = \frac{T_r}{\bar{v}_r - (1/8)} - \frac{27/64}{\bar{v}_r^2}$$

از روی این رابطه نشان دهید که ضریب تراکم پذیری ممکن است به صورت زیر به دست آید:

$$Z = \frac{\bar{v}}{\bar{v}_r - (1/8)} - \frac{27/64}{T_r \bar{v}_r}$$

در نتیجه نشان دهید که ترم  $[\bar{v}_r - 1/8]^{-1}$  را می توان به صورت سری نهایی بسط داد به طوری که معادله وان دروالز را می توان به شکل ویرال بیان کرد.

$$Z = 1 + \left( \frac{1}{8} - \frac{27/64}{T_r} \right) \frac{1}{\bar{v}_r} + \frac{1}{64 \bar{v}_r^2} + \frac{1}{512 \bar{v}_r^3} + \dots$$

۶-۲۸M نشان دهید که

$$c_p = T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_s \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

۶-۲۹M نشان دهید که

$$c_v = - T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_s$$

۶-۳۰M با استفاده از معادله ۶-۱۶a و رابطه سیکلی معادله (۶-۹) سه رابطه دیگر ماکسول را به دست آورید.

۶-۳۱M نشان دهید که مقدار انتقال حرارت برواحد جرم در یک فرآیند دما ثابت ماده کوری برابر است با

$$Q_T = \frac{\mu_0 C_v}{2T} (H_2^2 - H_1^2)$$

$H_1$  و  $H_2$  بترتیب شدتهای مغناطیس اولیه و نهایی است.

۶-۳۲M نشان دهید که رابطه زیر برای یک تغییر آنتروپی ثابت میدان مغناطیسی برای ماده کوری به کار می رود.

$$T_2^2 = T_1^2 - \frac{2Q_{T_1} T_1}{C_H}$$

$T_1$  و  $T_2$  بترتیب دماهای اولیه و نهایی و  $Q_{T_1}$  مقدار انتقال حرارت برای یک فرآیند دما ثابت با همان تغییر میدان در دمای  $T_1$  می باشد. مقدار  $Q_{T_1}$  در مسأله ۶-۳۱M داده

شده است.

۶-۳۳M نشان دهید که ضریب ژول - تامسون را می‌توان به صورت زیر بیان نمود

$$\mu = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_h = (T\beta - 1) \frac{v}{c_p}$$

۶-۳۴M با استفاده از رابطه داده شده در مسئله ۶-۳۳M، ضریب ژول - تامسون را برای (الف) یک گاز ایده‌آل و (ب) گاز وان دروالز تعیین کنید.

۶-۳۵M با استفاده از روابط کلی مناسب نشان دهید که روابط زیر برای گاز وان دروالز حاصل می‌شود:

$$d \bar{s} = \bar{c}_v \frac{dT}{T} + \frac{R dv}{\bar{v} - b}$$

$$d \bar{u} = \bar{c}_v dT + \frac{a dv}{v^2}$$

۶-۳۶M اکسیژن از ۱۰ MPa و ۲۵۰ K تا ۱۶۰ K در یک فرآیند جریان دائم فشار ثابت خنک می‌شود. با استفاده از نمودارهای عمومی، سرمایش لازم، تغییر آنتروپی و حجم مخصوص نهایی اکسیژن را محاسبه کنید.

۶-۳۷M متان در شرایط ۲۰ MPa و ۰ °C در ظرف صُلبی قرار دارد. مخزن سرد می‌شود تا این‌که فشار آن به ۱۰ MPa کاهش می‌یابد. سرمایش لازم را به ازای هر واحد جرم متان محاسبه کنید.

۶-۳۸M اکسیژن فرآیند تراکم آدیاباتیک و جریان دائم را از ۵/۰۸ MPa، ۲۰۰ K تا ۲۵/۴ MPa، ۳۶۰ K طی می‌کند. کار لازم و مقدار برگشت‌ناپذیری را به ازای هر واحد جرم و برای  $T_0 = ۲۰$  °C محاسبه کنید.

۶-۳۹M فشار اشباع را برای مخلوط یخ - آب در حال تعادل در ۲ °C محاسبه کنید.

۶-۴۰M اتیلن (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>، جدول A-۵) به داخل مخزنی به حجم ۱۰ m<sup>3</sup> تخلیه می‌گردد (مخزن در ابتدا خالی است). اتیلن مذکور از خط لوله فشار بالا در ۱۲۵ atm و ۳۲۵ K وارد مخزن می‌گردد. فرآیند پر شدن به طور آهسته صورت گرفته و مخزن طوری سرد می‌گردد که دمای گاز داخل آن در ۳۰۰ K ثابت باقی می‌ماند. اگر فشار داخل مخزن به

۱۰ atm برسد، جرم گاز داخل آن را محاسبه کنید. حرارت دفع شده از مخزن را تا این لحظه به دست آورید.

۶-۴۱M هوا در فشار ۱ atm در یک فرآیند فشار ثابت از ۳۰۰ K تا ۸۰۰ K گرم می‌شود. گرمایش لازم را برای جرم ۴ kg محاسبه کنید. همچنین تغییر در انرژی داخلی را تعیین کنید.

## مراجع

- 1 Gouq-Jen Su: Modified Law of Corresponding States for Real Gases, *Ind. Engr. Chem.*, vol. 38, p. 803, 1946.
- 2 Obert, E. F.: "Concepts of Thermodynamics," McGraw-Hill Book Company, New York, 1960.
- 3 Keenan, J.H., and J.Kaye: "Gas Tables," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1948.
- 4 Hougen, O.A., K.M. Watson, and R.A. Ragatz: "Chemical Process Principles," pt. II, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1947.
- 5 Keenan, J.H., and F.G. Keyes: "Thermodynamic Properties of Steam," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1936.
- 6 Lewis, G.N., and M. Randall: "Thermodynamics," 2d ed. (revised by K.S. Pitzer and L. Brewer), McGraw-Hill Book Company, New York, 1961.
- 7 Van Wylen, G.J., and R.E. Sonntag: "Fundamentals of Classical Thermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
- 8 Hilsenrath, J., et al.: Tables of Thermal Properties of Gases, *Natl. Bur. Std. Circ. 564*, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1955.
- 9 Beattie, J.A., and O.C. Bridgeman: A New Equation of State for Fluids, *Proc. Am. Acad. Arts Sci.*, vol. 63, P. 229, 1928.
- 10 Benedict, M., G. Webb, and L. Rubin: An Empirical Equation for the Thermodynamic Properties of Light Hydrocarbons and Their Mixtures, *J. Chem. Physics*, vol. 8, P. 334, 1940.
- 11 Nelson, L. C., and E.F. Obert: Generalized pvT Properties of Gases, *Trans. ASME*, p. 1057, October 1954.



## فصل ۷

### مخلوطهای گازی

#### ۷-۱ مقدمه

در فصلهای گذشته دیدیم که برای محاسبه و کاربرد خواص ترمودینامیکی برخی از مواد و تعریف حالت ترمودینامیکی آنها فقط دو خاصیت ترمودینامیکی لازم است. در این فصل رفتار مخلوط گازهای ایده آل و مخلوطهای ایده آل گاز-بخار را بررسی خواهیم کرد، که برای تعیین حالت ترمودینامیکی آنها اطلاع از ترکیب نسبی مخلوط نیز مورد نیاز است. این بررسی مبنایی است برای مطالعه تعادل شیمیایی و واکنشهای احتراق که در فصل هشتم به تفصیل خواهد آمد. محاسبات مربوط به مخلوطهای گاز-بخار، بویژه در فرآیندهای تهویه مطبوع کاربرد داشته و بدین ترتیب ارزش بررسی در این فصل را خواهد داشت. پس از ارائه مخلوط گازهای ایده آل، روشهایی را برای محاسبه خواص مخلوط گازهای حقیقی مورد بررسی قرار داده و آنها را به بحثهای معادله حالت در فصل ۶ ربط می دهیم.

#### ۷-۲ قانون گیبس-دالتون<sup>۱</sup>

بحث خود را با در نظر گرفتن تعاریفی بنیادی که برای مخلوط گازهای ایده آل کاربرد دارد، شروع می کنیم. واضح است که جرم کل مخلوط برابر با جمع جرم هر یک از اجزای آن می باشد، به طوری که :

$$m = m_1 + m_2 + \dots + m_i = \sum_{i=1} m_i \quad (۷-۱)$$

کسر مولی یک جزء  $x_i$  توسط رابطه زیر تعریف شده است

$$x_i = \frac{n_i}{n} \quad (۷-۲)$$

که  $n_i$  عبارت از تعداد مولهای جزء  $i$  و  $n$  عبارت از تعداد کل مولهای مخلوط است. جمع کسرها برابر با کل است یا

$$\sum x_i = 1.0 \quad (۷-۳)$$

جرم هر یک از اجزا را می توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$m_i = n_i M_i \quad (۷-۴)$$

که  $M_i$  وزن ملکولی جزء  $i$  است. حال اگر معادله (۷-۴) در معادله (۷-۱) جایگزین شود، به دست می آوریم که

$$m = \sum_i n_i M_i \quad (۷-۵)$$

وزن ملکولی معادل برای مخلوط معینی را می توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$M = \frac{m}{n} = \sum \frac{n_i}{n} M_i$$

یا

$$M = \sum x_i M_i \quad (۷-۶)$$

و ثابت گاز معادل مخلوط معینی را می توان از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$R = \frac{\Re}{M} \quad (۷-۷)$$

در مطالعه رفتار گازهای ایده آل فرض بر این است که هرکدام از اجزای گازی مخلوط به گونه‌ای رفتار می‌کنند که گویی آن جزء در دمای مخلوط بوده و به تنهایی تمامی حجم مخلوط را پر نموده است. این فرض بیانی از قانون گیبس - دالتون است. از نظر فیزیکی گاز ایده آل گازی است که در مورد آن می‌توان از تأثیر میدانهای نیروی ملکولی صرف نظر کرد؛ بنابراین در مخلوطی از گازهای ایده آل، انتظار تداخل قابل ملاحظه بین ملکولهای اجزای مختلف را نخواهیم داشت.

فشار جزئی<sup>۱</sup> جزء  $i$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$p_i = \frac{n_i RT}{V} \quad (۷-۸)$$

به عبارت دیگر این فشار وارده از سوی جزء مورد نظر است اگر تمام حجم مخلوط  $V$  را در دمای مخلوط  $T$  اشغال می‌نمود. فشار کل مخلوط به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$p = \frac{nRT}{V} \quad (۷-۹)$$

از تقسیم معادله (۷-۸) بر معادله (۷-۹)

$$\frac{p_i}{p} = \frac{n_i}{n} = x_i \quad (۷-۱۰)$$

با به کار بردن معادله (۷-۳)

$$\sum p_i = \sum x_i p = p \quad (۷-۱۱)$$

یا جمع فشارهای جزئی برابر فشار کل است.

حال تصور کنید که مخلوطی از گازهای ایده آل را به اجزاء مستقل آن جدا نموده و هر جزء را در ظرفی قرار دهیم به طوری که هرکدام در فشار و دمای کل مخلوط باقی بمانند. این فرآیند جدایی در شکل ۷-۱ نشان داده شده است. در این مورد حجم اشغال شده به وسیله هر جزء عبارت است از

$$V_i = \frac{n_i RT}{p} \quad (۷-۱۲)$$

حجم کل مخلوط در شرایط  $p$  و  $T$  برابر است با

$$V = \frac{nRT}{p} \quad (۷-۱۳)$$

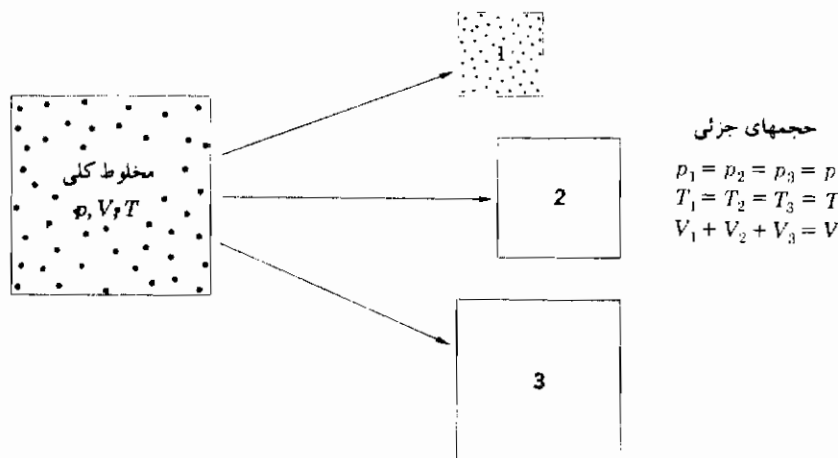
از تقسیم معادله (۷-۱۲) بر معادله (۷-۱۳)

$$\frac{V_i}{V} = \frac{n_i}{n} = x_i \quad (۷-۱۴)$$

با به کار بردن معادله (۷-۳)

$$\sum V_i = \sum x_i V = V \quad (۷-۱۵)$$

معادله (۷-۱۵) قانون جمع حجمهای آمگات - لِدوگ<sup>۱</sup> خوانده شده است. به این معنی که حجم کل مخلوطی از گازهای ایده آل، برابر با مجموع حجم‌هایی است که هرکدام از اجزاء گازی اشغال می‌کرد اگر در فشار و دمای مخلوط می‌بود. معمولاً  $V_i$  حجم جزئی جزء  $i$  نامیده می‌شود. غلظت اجزاء یک مخلوط ممکن است بر مبنای جرمی یا مولی بیان شود. فشارهای جزئی یا حجم‌های جزئی با به کار بردن مبنای مولی به سادگی از معادله (۷-۱۰) یا معادله (۷-۱۴) به دست می‌آید.



شکل ۷-۱ نمایش قانون جمع حجمهای آمگات - لِدوگ

گاهی غلظتها در یک مخلوط بر مبنای حجمی بر حسب حجم‌های جزئی بیان می‌شود. بنابراین تعریف مبنای حجمی، یا کسر حجمی مفهومی نظیر مبنای مولی، یا کسر مولی بر طبق معادله (۷-۱۴) دارد.

### مثال ۷-۱

مخزن ضلّبی حاوی ۲ lbm نیتروژن در ۳۰۰ psia و ۱۰۰ °F است. اکسیژن آنقدر اضافه می‌گردد تا فشار به ۴۰۰ psia افزایش یابد در حالی که دمای آن در ۱۰۰ °F ثابت باقی می‌ماند. جرم اکسیژن افزوده شده را محاسبه کنید.

**حل:** در این فرآیند تعداد مولهای نیتروژن ثابت باقی مانده و برابر است با:

$$n_{N_2} = \frac{m}{M} = \frac{2}{28} = 0.0714$$

فشار جزئی نیتروژن پس از افزودن اکسیژن ۳۰۰ psia خواهد بود، زیرا حجم تغییری نمی‌کند. بدین ترتیب داریم:

$$\begin{aligned} p_{O_2} &= p_{\text{کل}} - p_{N_2} \\ &= 400 - 300 \\ &= 100 \text{ psia} \quad (6.89 \times 10^5 \text{ Pa}) \end{aligned}$$

با استفاده از معادله (۷-۸) و انجام یک نسبت می‌توان نوشت:

$$\frac{n_{O_2}}{n_{N_2}} = \frac{p_{O_2}}{p_{N_2}}$$

با استفاده از مقادیر عددی که داده شده

$$n_{O_2} = \frac{(0.0714)(100)}{300} = 0.0238$$

بالاخره جرم اکسیژن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$m_{O_2} = M_{O_2} n_{O_2} = (32)(0.0238) = 0.761 \text{ lbm} \quad (0.345 \text{ kg})$$

## مثال ۷-۲

حجم‌های اشغال شده توسط اکسیژن و نیتروژن را در مثال ۷-۱ محاسبه کنید در صورتی که هرکدام از گازها به‌طور جداگانه در فشار و دمای مخلوط یعنی  $100^{\circ}\text{F}$  و  $400\text{ psia}$  نگهداشته شود.

**حل:** حجم نیتروژن از قانون گاز ایده آل (معادله ۷-۸) محاسبه می‌گردد

$$V_{\text{N}_2} = \frac{nRT}{p} = \frac{(0.0714)(1545)(560)}{(400)(144)}$$

$$= 1.071\text{ ft}^3 \quad (0.0303\text{ m}^3)$$

برای اکسیژن،

$$V_{\text{O}_2} = \frac{(0.0238)(1545)(560)}{(400)(144)}$$

$$= 0.357\text{ ft}^3 \quad (0.0101\text{ m}^3)$$

حجم کل مخلوط برابر خواهد بود با

$$V = 1.071 + 0.357$$

$$= 1.428\text{ ft}^3 \quad (0.0404\text{ m}^3)$$

باید دانست که حجم هر یک از اجزاء در تناسب مستقیم با تعداد مولهای آن جزء است.

## ۷-۳ خواص انرژی مخلوطها

اصول و تعاریف بخش فوق‌الذکر را می‌توان برای ساده کردن محاسبه خواص انرژی مخلوطها به‌راحتی به‌کار برد. انرژی داخلی را در نظر بگیرید. می‌توان نوشت:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots = \sum U_i = \sum m_i u_i \quad (7-16)$$

یا در مبنای مولی

$$U = \sum n_i \bar{u}_i \quad (7-17)$$

$u_i$  نشان دهنده انرژی داخلی بر واحد مول برای جزء  $i$  است. انرژی داخلی ویژه برای مخلوط با رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$u = \frac{1}{m} \sum m_i u_i \quad (7-18)$$

و یا انرژی داخلی ویژه مولی عبارت است از:

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum n_i \bar{u}_i = \sum x_i \bar{u}_i \quad (7-19)$$

روابطی برای انتالپی و آنتروپی مخلوط به طریق مشابهی بدست آمده که نتایج آنها به صورت زیر است:

$$H = \sum H_i = \sum m_i h_i \quad (7-20a)$$

$$H = \sum n_i \bar{h}_i \quad (7-20b)$$

$$\bar{h} = \sum x_i \bar{h}_i \quad (7-21)$$

$$S = \sum S_i = \sum m_i s_i \quad (7-22a)$$

$$S = \sum n_i \bar{s}_i \quad (7-22b)$$

$$\bar{s} = \sum x_i \bar{s}_i \quad (7-23)$$

گرمای ویژه برای مخلوط با به کار بردن تعاریف زیر

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v, \quad c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

روابط بالا برای انرژی داخلی و انتالپی به دست می‌آید. برای گرمای ویژه در حجم ثابت داریم:

$$c_v = \left[ \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{1}{m} \sum m_i u_i \right) \right]_v$$

$$\begin{aligned}
 c_v &= \frac{1}{m} \sum m_i \left( \frac{\partial u_i}{\partial T} \right)_v \\
 &= \frac{1}{m} \sum m_i c_{v_i}
 \end{aligned}
 \quad (7-24)$$

در مبنای مولی

$$\begin{aligned}
 \bar{c}_v &= \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial T} \right)_v = \sum x_i \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial T} \right)_{v_i} \\
 \bar{c}_v &= \sum x_i \bar{c}_{v_i}
 \end{aligned}
 \quad (7-25)$$

گرمای ویژه در فشار ثابت به طریق مشابهی با نتیجه زیر به دست می آید

$$c_p = \frac{1}{m} \sum m_i c_{p_i} \quad (7-26)$$

$$\bar{c}_p = \sum x_i \bar{c}_{p_i} \quad (7-27)$$

در مطالعه فرآیندهای ترمودینامیکی مخلوط گازهای ایده آل، محاسبه تغییرات انرژی مخلوط مورد توجه است. چنین محاسبه ای بر مبنای نظریه بنیادی بیان شده در قانون گیبس-دالتون انجام می گیرد که می گوید هرکدام از اجزاء مخلوط در دمای مخلوط تمام حجم مخلوط را اشغال می کند. تغییر در انرژی داخلی مخلوط توسط رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\Delta U = \sum \Delta U_i = \sum m_i \Delta u_i = \sum m_i c_{v_i} \Delta T \quad (7-28)$$

یا با استفاده از معادله (7-24)

$$\Delta U = m c_v \Delta T \quad (7-29)$$

که در این جا  $c_v$  گرمای ویژه مخلوط در مبنای جرمی است.  $\Delta U$  را می توان از رابطه زیر هم محاسبه کرد.

$$\Delta U = n \bar{c}_v \Delta T \quad (7-30)$$

به این ترتیب تغییر در انتالپی برای مخلوط را می توان به صورت زیر نوشت.



$$\Delta H = \sum \Delta H_i = \sum m_i \Delta h_i = \sum m_i c_{pi} \Delta T \quad (۷-۳۱)$$

$$\Delta H = mc_p \Delta T \quad (۷-۳۲)$$

$$\Delta H = n \bar{c}_p \Delta T \quad (۷-۳۳)$$

محاسبه تغییر در آنتروپی یک مخلوط اندکی پیچیده تر است زیرا آنتروپی فقط تابع دما نیست. تغییر در آنتروپی برای گاز ایده آل با گرماهای ویژه ثابت از معادله (۵-۳۲) عبارت است از

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (۷-۳۴)$$

زیر نویس های ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به حالات اولیه و نهایی است. تغییر در آنتروپی برای مخلوط گازهای ایده آل از طریق کاربرد معادله (۷-۳۴) برای هر کدام از اجزاء، و جمع نتایج حاصله محاسبه می گردد. بدین ترتیب،

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \sum m_i c_{pi} \ln \frac{T_2}{T_1} - \sum m_i R_i \ln \frac{P_{i2}}{P_{i1}} \quad (۷-۳۵)$$

که  $P_{i1}$  و  $P_{i2}$  به ترتیب فشارهای جزئی اولیه و نهایی جزء  $i$  است. می توان عبارت دیگری برای تغییر در آنتروپی بر مبنای مولی نوشت. بدین ترتیب،

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \sum n_i \bar{c}_{pi} \ln \frac{T_2}{T_1} - \sum n_i R_i \ln \frac{P_{i2}}{P_{i1}} \quad (۷-۳۶)$$

مثال زیر روش استفاده از این روابط را نشان می دهد.

### مثال ۷-۳

برای تشکیل مخلوطی در فشار نهایی ۱۰ psia، مقدار ۲ lbm دی اکسید کربن در  $100^\circ\text{F}$  و ۲۰ psia با ۵ lbm نیتروژن در  $300^\circ\text{F}$  و ۱۵ psia مخلوط شده است. فرآیند مذکور بطور آدیاباتیک در دستگاهی با جریان دائم صورت می گیرد. دمای نهایی مخلوط و تغییر در آنتروپی را محاسبه کنید.

**حل:** فرآیند مورد نظر در شکل همراه نشان داده شده است:

موازنه انرژی جریان دائم عبارت است از:

$$\begin{aligned}(mh_1)_{N_2} + (mh_1)_{CO_2} &= (mh_2)_{\text{مخلوط}} \\ &= (mh_2)_{N_2} + (mh_2)_{CO_2}\end{aligned}$$

با فرض رفتار گاز ایده آل با گرماهای ویژه ثابت، معادله بالا به صورت زیر در می آید

$$[mc_p(T_1 - T_2)]_{N_2} + [mc_p(T_1 - T_2)]_{CO_2} = 0$$

با جایگزین کردن مقادیر عددی مناسب،

$$(5)(0.248)(300 - T_2) + (2)(0.203)(100 - T_2) = 0$$

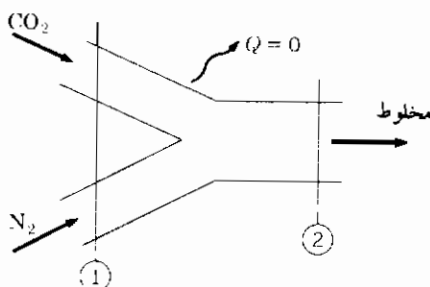
چون دمای نهایی برای هر دو جزء یکسان و برابر دمای مخلوط است، از این معادله نتیجه می گیریم که

$$T_2 = 250^\circ\text{F} = 710^\circ\text{R} \quad (394\text{ K})$$

تغییر در آنتروپی از معادله (۷-۳۵) یا (۷-۳۶) محاسبه می شود. برای هر کدام از این معادلات

فشارهای جزئی نهایی باید محاسبه گردد. کمیت های مولی عبارت است از:

$$n_{CO_2} = \frac{2}{44} = 0.0455$$



شکل مثال ۷-۳

$$n_{N_2} = \frac{5}{28} = 0.1785$$

$$n_{\text{کل}} = 0.1785 + 0.0455 = 0.224$$

حال فشارهای جزئی نهایی را می‌توان از معادله (۷-۱۰) محاسبه کرد:

$$(p_2)_{CO_2} = \frac{(10)(0.0455)}{0.224} = 2.03 \text{ psia} \quad (14 \text{ kPa})$$

$$(p_2)_{N_2} = \frac{(10)(0.1785)}{0.224} = 7.97 \text{ psia} \quad (55 \text{ kPa})$$

تغییر در آنتروپی بوسیله معادله (۷-۳۵) محاسبه می‌شود.

$$S_2 - S_1 = \left( mc_p \ln \frac{T_2}{T_1} - mR \ln \frac{p_2}{p_1} \right)_{CO_2} + \\ \left( mc_p \ln \frac{T_2}{T_1} - mR \ln \frac{p_2}{p_1} \right)_{N_2}$$

با جایگزین کردن مقادیر عددی مناسب

$$S_2 - S_1 = (2) \left( 0.203 \ln \frac{710}{560} - \frac{35.1}{778} \ln \frac{2.03}{20} \right) \\ + (5) \left( 0.248 \ln \frac{710}{760} - \frac{55.2}{778} \ln \frac{7.97}{15} \right) \\ = 0.443 \text{ Btu/}^\circ\text{R} \quad (841 \text{ J/K})$$

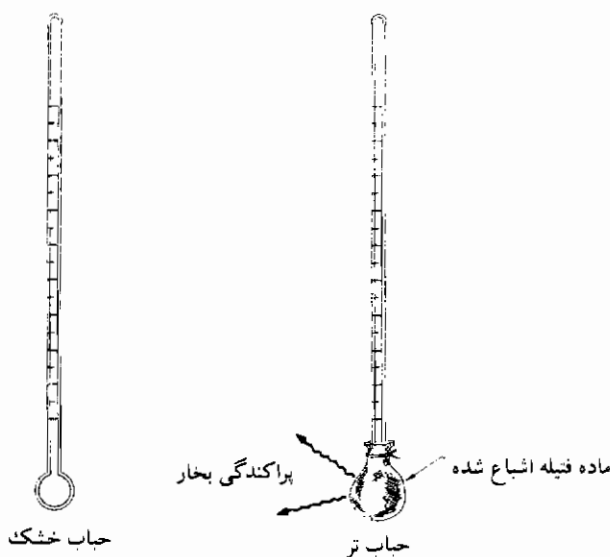
#### ۷-۴ مخلوطهای گاز ایده‌آل و بخار

حال نوعی مخلوط گازی مهم، یعنی مخلوط گازی ایده‌آل و بخار میعان پذیر را در نظر می‌گیریم. این نوع مخلوط روزانه در هوایی که تنفس می‌کنیم و در فرآیندهای گرمایش و تهویه مطبوع وابسته به آن، مشاهده می‌گردد. تشکیل شبنم بر روی سبزه در یک شب آرام، خشک کردن و رطوبت زنی گازها برای کاربردهای مختلف، و تمام محاسبات تهویه مطبوع به فهم و درک رفتار مخلوطهای گاز-بخار بستگی دارد.

ما فقط به مخلوطهایی با یک بخار میعان پذیر می‌پردازیم و به مخلوطهای هوا-بخار آب توجه می‌کنیم زیرا چنین مخلوطهایی در مسائل عملی فراوان مشاهده می‌گردد.

دماهای نقطه شبنم، حباب خشک و حباب تر

نقطه شبنم<sup>۱</sup> مخلوط، دمای است که در موقع سرد نمودن مخلوط در فشار ثابت، بخار در آن شروع به میعان می‌کند. دمای حباب خشک<sup>۲</sup> مخلوط، دمای است که به وسیله یک دماسنج معمولی نشان داده می‌شود. دمای حباب تر<sup>۳</sup> عبارت از دمای نشان داده شده به وسیله دماسنجی است که با فتیله‌ای اشباع شده از آب پوشیده گردد و مجموعه مذکور از لحاظ تبخیر به تعادل رسیده باشد. این دماها در شکل ۷-۲ نمایش داده شده است.



شکل ۷-۲ اندازه‌گیری دمای حباب خشک و دمای حباب تر

1- Dew point

2- Dry-bulb temperature

3- Wet-bulb temperature

مخلوط گاز - بخار هنگامی اشباع می‌شود که کاهشی جزئی در دمای آن باعث میعان قسمتی از بخار گردد. بنابراین یک مخلوط اشباع شده در نقطه شبنم قرار دارد و فشار جزئی بخار در چنین مخلوطی عبارت است از فشار اشباع بخار در دمای مخلوط.

رطوبت نسبی<sup>۱</sup>  $\phi$  نسبت جرم واقعی بخار است به جرم بخار لازم برای ایجاد مخلوطی اشباع شده در همان دما. اگر بخار مانند گاز ایده آل رفتار کند، می‌توان نوشت

$$\phi = \frac{m_v}{m_{sat}} = \frac{p_v V/R_v T}{p_g V/R_v T} = \frac{p_v}{p_g} \quad (۷-۳۷)$$

$p_v$  فشار جزئی واقعی بخار و  $p_g$  فشار اشباع بخار در دمای مخلوط (دمای حباب خشک) است.

#### رطوبت مخصوص یا رطوبت مطلق

رطوبت مخصوص<sup>۲</sup> یا نسبت رطوبت،  $\omega$ ، نسبت جرم بخار است به جرم گاز میعان ناپذیر. توجه اصلی ما در این فصل به مخلوطهای هوا - بخار آب خواهد بود بنابراین،

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (۷-۳۸)$$

که  $m_a$  مشخص کننده جرم هوای خشک است، اگر فرض شود که بخار نظیر گاز ایده آل رفتار می‌کند، می‌توان نوشت.

$$\omega = \frac{p_v VM_v RT}{p_a VM_a RT} = \frac{M_v}{M_a} \frac{p_v}{p_a} \quad (۷-۳۹)$$

این عبارت برای مخلوطهای هوا - بخار آب به صورت زیر ساده می‌گردد:

$$\omega = 0.622 \frac{p_v}{p_a} = 0.622 \frac{p_v}{p - p_v} \quad (۷-۴۰)$$

از معادله (۷-۳۷) نیز می‌توان استفاده نمود تا به دست آوریم

1- Relative humidity

2- Specific humidity

$$\phi = \frac{\omega P_a}{0.622 p_g} \quad (۷-۴۱)$$

کمیت دیگر مورد توجه درجه اشباع<sup>۱</sup>،  $\mu$ ، است که به صورت نسبت رطوبت مخصوص واقعی به رطوبت مخصوص هوای اشباع در دمای حباب خشک تعریف شده است:

$$\mu = \frac{\omega}{\omega_{sat}} \bigg|_T \quad (۷-۴۲)$$

این رابطه را برای رفتار گاز ایده آل می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\mu = \frac{0.622 p_v / (p - p_v)}{0.622 p_g / (p - p_g)} = \frac{p_v (p - p_g)}{p_g (p - p_v)} = \phi \frac{p - p_g}{p - p_v} \quad (۷-۴۳)$$

درجه اشباع با تقریب نزدیکی برابر با رطوبت نسبی برای مخلوطهای هوا - بخار آب در دما و فشارهای معمولی است، زیرا  $p_v$  و  $p_g$  هر دو در مقایسه با فشار کل،  $p$ ، کوچک است.

بر اساس بحثهایی که تاکنون داشته ایم فرآیندی که به مخلوط رطوبت اضافه نکند یا رطوبت را از آن نگیرد، در رطوبت مخصوص ثابت صورت می گیرد. اگر فرآیند در فشار کل ثابت نیز انجام شود، فشار جزئی بخار نیز باید با توجه به معادله (۷-۴۰) ثابت باقی بماند. بنابراین می توان نقطه شبنم مخلوط را به طریق ویژه ای پیش بینی نمود. با یادآوری این که نقطه شبنم دمایی است که در موقع سرد نمودن مخلوط در فشار ثابت، میعان بخار شروع می گردد، لذا فشار جزئی بخار در نقطه شبنم باید برابر با فشار اشباع در آن دما باشد. اما این مقدار برابر با فشار بخار واقعی قبل از سرد نمودن مخلوط است، بنابراین:

$$p_v = p_g \quad (\text{ارزیابی شده در دمای نقطه شبنم})$$

موقعی که مخلوط کاملاً اشباع شود ( $\phi = 100\%$ ) دماهای حباب خشک، حباب تر و نقطه شبنم یکسان است.

#### مثال ۷-۴ مخلوط هوا - بخار آب

مخلوطی از هوا - بخار آب در  $25 \text{ psia}$ ،  $140^\circ\text{F}$  با رطوبت نسبی ۵۰ درصد وجود دارد.

کسر جرمی بخار آب را در مخلوط محاسبه کنید.

**حل:** در این مسأله ابتدا رطوبت مخصوص کمیت مورد نظر است. فشار اشباع در  $140^{\circ}\text{F}$  برابر است با

$$p_g = 2.892 \text{ psia} \quad (1.994 \times 10^4 \text{ Pa})$$

از معادله (۷-۳۷) فشار بخار واقعی برابر است با

$$\begin{aligned} p_v &= \phi p_g \\ &= (0.5)(2.892) = 1.446 \text{ psia} \quad (9970 \text{ Pa}) \end{aligned}$$

بنابراین فشار جزئی هوا عبارت است از

$$p_a = 25 - 1.446 = 23.554 \text{ psia} \quad (1.624 \times 10^5 \text{ Pa})$$

حال رطوبت مخصوص را می توان از معادله (۷-۴۰) محاسبه کرد:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{(0.622)(1.446)}{23.554} \\ &= 0.0382 \text{ lbm بخار/lbm هوای خشک} \end{aligned}$$

کسر جرمی بخار آب برابر است با

$$\begin{aligned} \frac{m_v}{m_{\text{کل}}} &= \frac{m_v}{m_a + m_v} = \frac{\omega}{1 + \omega} \\ &= 0.0368 \text{ lbm بخار/lbm مخلوط} \end{aligned}$$

## ۷-۵ اشباع آدیاباتیک<sup>۱</sup>

چون تعداد زیادی از فرآیندهای هوا-بخار آب شامل مفاهیم رطوبت و اشباع است، لذا

بررسی موازنه انرژی موجود در یک فرآیند اشباع آدیاباتیک ساده، مهم و جالب توجه است. سیستمی که مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت در شکل ۷-۳ نشان داده شده است.

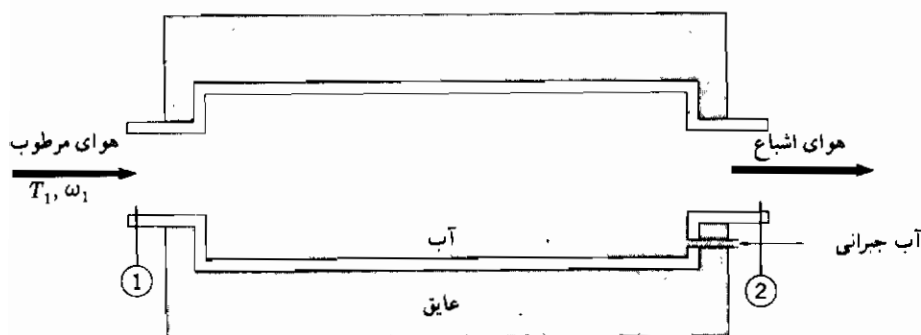
مخلوطی از هوا-بخار آب بر روی استخری از آب دمیده می‌شود تا جایی که ظرف را در حالت اشباع ترک نماید. برای جبران آبی که بوسیله هوا در فرآیند اشباع شدن جذب می‌شود، بطور مداوم آب تازه در دمای خروجی تأمین می‌گردد. ظرف مورد نظر عایق شده و هیچ گونه تبادل حرارتی با محیط اطراف در طی فرآیند صورت نمی‌گیرد.

حال یک موازنه انرژی جریان دائم می‌تواند در مورد فرآیند مذکور بکار رود. داریم:

انتالپی مخلوط خروجی = انتالپی مایع اضافه شده + انتالپی مخلوط ورودی

یا

$$m_a h_{a1} + m_{v1} h_{v1} + (m_{v2} - m_{v1}) h_{f2} = m_a h_{a2} + m_{v2} h_{v2}$$



شکل ۷-۳ فرآیند اشباع آدیاباتیک

از تقسیم بر شدت جریان هوا  $m_a$  نتیجه می‌گیریم:

$$h_{a1} + \omega_1 h_{v1} + (\omega_2 - \omega_1) h_{f2} = h_{a2} + \omega_2 h_{v2} \quad (7-44)$$

اگر رفتار گاز ایده آل فرض شود

$$h_{a1} - h_{a2} = c_{pa}(T_1 - T_2)$$



بعلاوه

$$h_{v2} - h_{f2} = h_{fg2}$$

به طوری که معادله (۷-۴۴) می تواند برای  $\omega_1$  حل گردد تا رابطه زیر به دست آید.

$$\omega_1 = \frac{c_{pa}(T_2 - T_1) + \omega_2 h_{fg2}}{h_{v1} - h_{f2}} \quad (7-45)$$

معادله (۷-۴۵) معادله مفیدی است، چون رطوبت مخصوص یک مخلوط را می توان به وسیله اندازه گیری  $T_1$  و  $T_2$  و محاسبه با معادله (۷-۴۵) تعیین کرد. دمای حباب تر یک مخلوط با تقریب نزدیکی برابر با دمای اشباع آدیاباتیک است. تفاوت جزئی آن به علت فرآیندهای نفوذ جرمی که در سطح «فتیله» انجام می گیرد و همچنین گرادیان دمای همراه آن است.

بحث بالا به این نتیجه منجر می شود که مشخصات دماهای حباب تر و حباب خشک یک مخلوط، معرف میزان رطوبت مخلوط است. این اطلاعات ممکن است برای محاسبه خواص انرژی مخلوط مورد استفاده قرار گیرد.

فشار جزئی بخار آب در مورد بیشتر مخلوطهای رطوبت سنجی پایین بوده و می توان از روابط ساده ای برای محاسبه خواص ترمودینامیکی استفاده نمود. بخار آب در فشارهای پایین تقریباً رفتار گاز ایده آل را داشته و انتالپی و انرژی داخلی آن فقط تابع دماست. با استفاده از سطح مبنایی برای بخار آب نظیر جداول بخار آب ( $0^\circ\text{C}$ ، مایع اشباع)، ارائه خلاصه ای از خواص آب در فشار پایین همان طور که در جدول ۷-۱ نشان داده شده، امکان پذیر است. بعضی از این روابط برای ناحیه اشباع جامد-بخار در فصل ۳ قبلاً ارائه شده است.

البته پایین تر از دماهای انجماد، تشکیل برفک یا یخ بر روی کویل های سرمایش امکان پذیر است و در یک موازنه انرژی بر روی سیستم، انرژی لازم برای تغییر فاز از بخار آب به یخ جامد باید بدقت در نظر گرفته شود. جالب توجه است که انتالپی تصعید<sup>۱</sup> بین  $40^\circ\text{C}$  تا  $0^\circ\text{C}$  تقریباً ثابت و برابر است با:

$$h_g - h_i = h_{ig} = 2838 \text{ kJ/kg} = 1220 \text{ Btu/lbm} \quad (7-52)$$

جدول ۷-۱ بعضی فرمولهای تقریبی برای خواص آب در فشارهای پایین

شماره معادله	محدوده دما	واحد	خاصیت
7-46a	32 to 100°F	$T$ in °F	$h_f = u_f = T - 32$ Btu/lbm
7-46b	0 to 40°C	$T$ in °C	$h_f = u_f = 4.19T$ kJ/kg
7-47a	-40 to 100°F	$T$ in °F	$h_g = 1061 + 0.445T$ Btu/lbm
7-47b	-40 to 40°C	$T$ in °C	$h_g = 2501 + 1.863T$ kJ/kg
7-48a	-40 to 100°F	$T$ in °F	$u_g = 1010.3 + 0.335T$ Btu/lbm
7-48b	-40 to 40°C	$T$ in °C	$u_g = 2374.9 + 1.403T$ kJ/kg
7-49a	-40 to 32°F	$T$ in °F	$u_i = h_i = -158.9 + 0.467T$ Btu/lbm
7-49b	-40 to 0°C	$T$ in °C	$u_i = h_i = -334.6 + 1.96T$ kJ/kg
7-50a	-40 to 32°R	$T$ in °R	$p_g = 5.103 \exp \left( 18.42 - \frac{11\,059}{T} \right)$ psia
7-51a	32 to 100°F	$T$ in °R	$\ln \frac{p_g}{0.3390} = 12\,221 \left( \frac{1}{527.67} - \frac{1}{T} \right) - 5.031 \ln \frac{T}{527.67}$
7-50b	-40 to 0°C	$T$ in K	$p_g = 35.18 \exp \left( 18.42 - \frac{6144}{T} \right)$ kPa
7-51b	0 to 40°C	$T$ in K	$\ln \frac{p_g}{2337} = 6789 \left( \frac{1}{293.15} - \frac{1}{T} \right) - 5.031 \ln \frac{T}{293.15}$
		$p_g$ in Pa	

با استفاده از رابطه‌ای نظیر معادله (۷-۴۷)، معادله (۷-۴۵) را می‌توان اصلاح کرد تا محاسبه فشار بخار واقعی مستقیماً از دماهای حباب خشک و حباب تر میسر گردد. رابطه بدست آمده معادله کاربر [6] خوانده شده و به صورت زیر داده شده است.

$$p_v = p_{g,w} - \frac{(p - p_{g,w})(T_{DB} - T_{WB})}{K_w - T_{WB}} \quad (7-53)$$

که  $p_v =$  فشار بخار واقعی

$p_{g_w} =$  فشار اشباع مربوط به دمای حباب تر

$p =$  فشار کل مخلوط

$T_{DB} =$  دمای حباب خشک، °F یا °C

$T_{WB} =$  دمای حباب تر، °F یا °C

$K_w = 2800^\circ\text{F}$  یا  $1537/8^\circ\text{C}$

برای دماهای حباب تر پایین تر از  $32^\circ\text{F}$ ، دولیتل<sup>۱</sup> [1] استفاده از رابطه زیر را پیشنهاد می‌کند:

$$p_v = p_{g_w} - \frac{p(T_{DB} - T_{WB})}{K_L} \quad (7-54)$$

$$K_L = 1756^\circ\text{C} \text{ یا } 3160^\circ\text{F}$$

### مثال ۷-۵ سیستم بسته سرمایش مخلوط هوا - بخار آب

مخلوطی از هوا - بخار آب در  $30^\circ\text{F}$  و  $30^\circ\text{psia}$  در مخزنی به حجم  $400\text{ft}^3$  قرار دارد. رطوبت نسبی ۸۰ درصد است. چقدر سرمایش جهت کاهش دما تا  $40^\circ\text{F}$  لازم است و فشار نهایی مخلوط هوا - بخار آب چیست؟

**حل:** در  $100^\circ\text{F}$ ،  $p_g = 0.9503^\circ\text{psia}$  لذا فشار بخار اولیه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\phi_1 = \frac{p_{v1}}{p_{g1}}, \quad p_{v1} = (0.9503)(0.8) = 0.7602^\circ\text{psia} \quad (5241^\circ\text{Pa})$$

در  $40^\circ\text{F}$ ،  $p_g = 0.1217^\circ\text{psia}$  لذا حالت نهایی باید اشباع باشد. فشار جزئی اولیه هوا برابر است با

$$p_{a1} = p_1 - p_{v1} = 20 - 0.7602 = 19.2398^\circ\text{psia} \quad (1.327 \times 10^5^\circ\text{Pa})$$

حجم در طی فرآیند سرمایش ثابت باقی‌مانده و فشار جزئی نهایی هوا از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\frac{p_{a2}}{p_{a1}} = \frac{T_2}{T_1} \quad p_{a2} = \frac{(19.2398)(460 + 40)}{460 + 100}$$

$$= 17.178 \text{ psia} \quad (1.184 \times 10^5 \text{ Pa})$$

بنابراین فشار کل نهایی برابر است با

$$p_2 = p_{a2} + p_{v2} = 17.178 + 0.1217 = 17.3 \text{ psia} \quad (1.193 \times 10^5 \text{ Pa})$$

جرم هوا از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$m_a = \frac{p_{a1} V}{RT_1} = \frac{(19.2398)(144)(4000)}{(53.35)(560)} = 371 \text{ lbm} \quad (168 \text{ kg}) \quad (a)$$

و رطوبتهای مخصوص عبارت است از:

$$\omega = 0.622 \frac{p_v}{p_a}$$

$$\omega_1 = \frac{(0.622)(0.7602)}{19.2398} = 0.0246 \quad (b)$$

$$\omega_2 = \frac{(0.622)(0.1217)}{17.178} = 0.00441$$

چون مخزن مذکور سیستمی بسته است لذا سرمایش از رابطه زیر محاسبه می‌گردد

$$Q = U_1 - U_2$$

$$= m_a (u_{a1} + \omega_1 u_{v1}) - m_a (u_{a2} + \omega_2 u_{v2}) - m_a (\omega_1 - \omega_2) u_{f2} \quad (c)$$

مقدار  $u_{f2}$  از جدول A-۷ به دست می‌آید:

$$u_{f2} = 8.02 \text{ Btu/lbm} \quad (\text{مایع اشباع در } 40^\circ \text{F})$$

و انرژیهای داخلی بخار از معادله (۷-۴۸)

$$u_{v1} = 1010.3 + 0.335(100) = 1043.8 \text{ Btu/lbm}$$

$$u_{v2} = 1010.3 + 0.335(40) = 1023.7 \text{ Btu/lbm}$$

حال مقادیر عددی را در معادله (c) جایگزین کرده به دست می آوریم

$$\begin{aligned} Q &= (371)[(0.1715)(100 - 40) + (0.0246)(1043.8) - (0.00441)(1023.7) \\ &\quad - (0.0246 - 0.00441)(8.02)] \\ &= (371)(10.29 + 25.68 - 4.51 - 0.16) \\ &= 11612 \text{ Btu} \quad (12251 \text{ kJ}) \end{aligned}$$

## مثال ۷-۶

رطوبت نسبی جریان هوایی را محاسبه کنید که دارای  $T_{DB} = 100^\circ\text{F}$ ،  $T_{WB} = 80^\circ\text{F}$  و فشار کل  $14.696/696 \text{ psia}$  است.

**حل:** معادله (۷-۵۳) را برای محاسبه فشار جزئی بخار به کار گرفته سپس  $\phi$  را تعیین می کنیم. کمیت‌های لازم عبارت است از:

$$\begin{aligned} P_{g_w} &= 0.5073 \text{ psia} \quad (3498 \text{ Pa}) \\ p &= 14.696 \text{ psia} \quad (1.0132 \times 10^5 \text{ Pa}) \end{aligned}$$

سپس از معادله (۷-۵۳)

$$\begin{aligned} p_v &= 0.5073 - \frac{(14.696 - 0.5073)(100 - 80)}{2800 - 80} \\ p_v &= 0.403 \text{ psia} \quad (2778 \text{ Pa}) \end{aligned}$$

فشار اشباع در  $100^\circ\text{F}$  برابر است با

$$p_g = 0.9503 \text{ psia} \quad (6552 \text{ Pa})$$

به طوری که از معادله (۷-۳۷) داریم

$$\phi = \frac{P_v}{P_g} = \frac{0.403}{0.9503} = 42.4 \text{ درصد}$$

### مثال ۷-۷ مخلوط هلیوم-بخار آب

مخلوطی از هلیوم و بخار آب در فشار کل ۱ atm و دمای حباب خشک  $35^\circ\text{C}$  دارای نقطه شبنم  $20^\circ\text{C}$  می‌باشد. رطوبت نسبی و رطوبت مخصوص مخلوط را محاسبه کنید.

**حل:** با فرض رفتار گاز ایده آل، فشار بخار واقعی عبارت از فشار اشباع تعیین شده در نقطه شبنم است یا

$$p_v = p_g(20^\circ\text{C} \text{ در}) = 2.339 \text{ kPa} \quad (a)$$

فشار اشباع در دمای حباب خشک عبارت است از

$$p_g = 5.628 \text{ kPa} \quad 35^\circ\text{C} \text{ در}$$

لذا رطوبت نسبی برابر است با

$$\phi = \frac{p_v}{p_g} = \frac{2.339}{5.628} = 41.6 \text{ درصد} \quad (b)$$

رطوبت مخصوص را می‌توان از معادله (۷-۳۹) با جایگزین نمودن وزن ملکولی و فشار جزئی برای هوا با مقادیر مربوطه هلیوم محاسبه کرد.

$$\omega = \frac{M_v}{M_{\text{He}}} \frac{p_v}{p_{\text{He}}} \quad (c)$$

فشار جزئی هلیوم برابر است با

$$p_{\text{He}} = p - p_v = 101.32 - 2.339 = 98.981 \text{ kPa}$$

با استفاده از  $M_{\text{He}} = 4$  و جایگزینی مقادیر در (c) نتیجه می‌گیریم

$$\omega = \frac{(18)(2.339)}{(4)(98.981)} = 0.106 \text{ kg هلیوم خشک / kg بخار}$$

## مثال ۷-۸ محاسبه تکراری

مخلوطی از هوا-بخار آب در فشار کل ۱۵۰ kPa دارای دمای حباب خشک  $35^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۶۰ درصد است. دمای حباب تر و نقطه شبنم را محاسبه کنید.

**حل:** فشار اشباع در  $35^{\circ}\text{C}$  برابر است با

$$p_g = 5.628 \text{ kPa}$$

لذا فشار بخار واقعی را می‌توان از معادله (۷-۳۷) محاسبه نمود

$$p_v = \phi p_g = (0.6)(5.628) = 3.3768 \text{ kPa}$$

نقطه شبنم عبارت از دمای اشباع مطابق با این فشار است یا

$$T_{DP} = 25.96^{\circ}\text{C}$$

جهت تعیین دمای حباب تر باید رابطه کاربر معادله (۷-۳۵) را با یک روش تکراری به کار گیریم. دوباره

نویسی معادله (۷-۳۵) به صورت

$$p_v - p_{g_w} + \frac{(p - p_{g_w})(T_{DB} - T_{WB})}{1537.8 - T_{WB}} = 0 = f(T_{WB})$$

مشاهده می‌شود که با معلوم بودن  $p_v$  و  $T_{DB}$ ، معادله فقط شامل یک مجهول  $T_{WB}$  می‌باشد زیرا  $p_{g_w}$  تابعی از  $T_{WB}$  است. این رابطه تابعی غیر خطی بوده لذا باید از روش تکراری استفاده نمود تا  $f(T_{WB}) = 0$  بشود. تکرارها در زیر نشان داده شده است.

$T_{WB} [^{\circ}\text{C}]$	$p_{g_w} [\text{kPa}]$	$f(T_{WB})$
۲۰	۲/۳۳۹	۲۴۹۷/۱
۲۵	۳/۱۶۹	۱۱۷۸/۴
۳۰	۴/۲۴۶	- ۳۸۵/۹
۲۸/۷۷		

لذا نتیجه می‌گیریم  $T_{WB} = 28.77^{\circ}\text{C}$

۷-۶ نمودار رطوبت سنجی<sup>۱</sup>

اگرچه معادلات بخشهای فوق مبنای مناسبی برای محاسبات مخلوطهای هوا-بخار آب به دست می‌دهد ولی داشتن نموداری محاسباتی در مواردی با دقتی نه چندان زیاد ولی با سرعت عمل بیشتر، مطلوب به نظر می‌رسد. نمودار مورد نظر نمودار رطوبت سنجی خوانده شده و در شکل ۷-۴ نشان داده شده است.

سه منحنی بزرگ رسم شده به مقیاس در قسمت ضمیمه ارائه شده است:

۱- آحاد انگلیسی برای دماهای حباب خشک بین ۲۰ تا ۱۱۰°F

۲- آحاد انگلیسی برای دماهای حباب خشک بین ۲۰ تا ۵۰°F

۳- آحاد SI برای دماهای حباب خشک بین ۱۰ تا ۵۵°C

هر سه این منحنیها برای فشار کل ۱ atm می‌باشد. در منحنیهای با آحاد انگلیسی رطوبت مخصوص بر حسب پوند جرم بخار به ازای هر پوند جرم هوای خشک و همچنین گرین<sup>۲</sup> بخار به ازای هر پوند جرم هوای خشک داده شده است. ضریب تبدیل برابر است با

$$1 \text{ lbm} = 7000 \text{ grains}$$

خطوط حجم بر روی این نمودار، حجم مخلوط هوا - بخار آب را به ازای هر پوند جرم هوای خشک خشک موجود در مخلوط به دست می‌دهد. این کمیت را با علامت  $v_a$  مشخص خواهیم نمود.

$$v_a = \frac{\text{حجم مخلوط}}{\text{جرم هوای خشک موجود در مخلوط}} = \frac{V}{m_a} \quad (۷-۵۵)$$

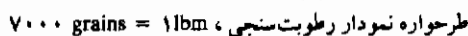
حجم مخصوص واقعی مخلوط از معادله (۷-۵۵) و رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$m = m_a + m_v = m_a(1 + \omega) \quad (۷-۵۶)$$

1- Psychometric chart

2- Grain





حجم مخصوص واقعی عبارت است از  $v = V/m$  به طوری که

باید دقت کنیم که  $m_a$  در بیشتر فرآیندهای هوا - بخار آب کمیت ثابتی بوده و بدین ترتیب  $v_a$  دارای بیشترین کاربرد در حل مسائل است. بنابراین تعجب آور نیست که در ترسیم نمودار رطوبت سنجی از کمیت حجمی استفاده شده است.

**سطوح مینا برای نمودارهای رطوبت سنجی**

مقادیر انتالپی های مخلوط بر واحد جرم هوای خشک موجود در مخلوط نیز مشخص شده است. سطوح مبنای صفر به صورت زیر فرض شده است:

## آحاد انگلیسی

انتالی، هوای خشک = °F در °

انتالی آب مایع اشباع = ۰ در  $32^{\circ}\text{F}$

آحاد SI

انتالی هوای خشک = ۰ در  $^{\circ}\text{C}$

انتالی آب مایع اشباع = ۰ در  $^{\circ}\text{C}$

انتالی مخلوط به ازای واحد جرم هوای خشک در مخلوط به صورت زیر تعریف می شود

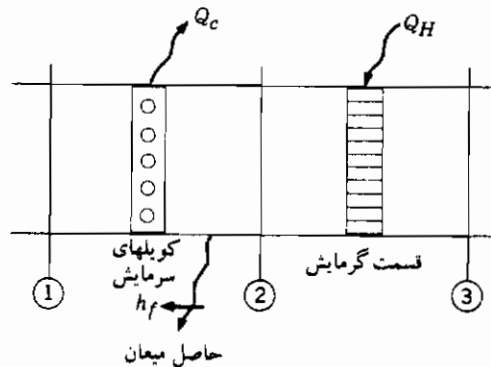
$$h_m = h_{mix} = h_a + \omega h_v \quad (7-58)$$

با تقریب بسیار نزدیکی خطوط دمایی حباب تر ثابت با خطوط انتالی مخلوط ثابت یکی است و به همین صورت هم بر روی نمودار نشان داده شده است برای مخلوطهایی در فشار ۱ atm، خطای تقریب معمولاً کمتر از ۱ درصد است.

جهت اجتناب از این تقریب، نمودارهای ضمیمه دارای مقیاسی برای انتالی مخلوط در حالت اشباع است. به عبارتی در رطوبت نسبی صد در صد، خط چین ها نشان دهنده انحراف از این انتالیهها در رطوبتهای کمتر ولی در دماهای حباب تر یکسان می باشد. به عنوان مثال مخلوطی را در دمای حباب خشک  $90^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۳۰ درصد در نظر بگیرید. انتالی مخلوط در حالت اشباع برابر ۳۱/۸ بی تی یو به ازای هر پوند جرم هوای خشک است در حالی که انحراف از این مقدار در رطوبت نسبی ۳۰ درصد برابر ۰/۱۹ - بی تی یو به ازای هر پوند جرم هوای خشک می باشد، یا به عبارتی خطا تنها برابر با ۰/۶ درصد است.

فشار جزئی بخار آب در مورد مخلوطی با فشار کل معین، مستقیماً تابع رطوبت مخصوص است [از طریق معادله (۷-۴۰)]، و لذا یک خط  $\omega$  ثابت همچنین خط  $p_v$  ثابت و خط نقطه شبنم ثابت هم می باشد. نقطه شبنم از طریق قرار دادن نقطه مورد سؤال و سپس تعقیب خط  $\omega$  ثابت (خط افقی) تا رسیدن به رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد پیدا می شود. وقتی به حالت اشباع برسیم درجه حرارت، دمای نقطه شبنم است.

توجه به این نکته بسیار مهم است که یک نمودار رطوبت سنجی معین، فقط در همان فشار که برای آن مشخص شده کاربرد دارد. در نمودارهای ضمیمه فشار کل ۱ atm است.



شکل ۷-۵ فرآیند سرمایش و بازگرم ساده برای مخلوط هوا - بخار آب

## ۷-۷ فرآیندهای تهویه مطبوع

حال برای ارائه کاربرد اصول بخشهای فوق بعضی فرآیندهای تهویه مطبوع متعارف را بررسی می‌کنیم و آنها را بر روی نمودار رطوبت سنجی نشان می‌دهیم. اگرچه چند کاربرد گوناگون را بررسی خواهیم کرد، اما روش تجزیه و تحلیل معمولاً به ترتیب زیر است:

- ۱ - رسم طرح سیستم و مشخص نمودن اطلاعات معلوم
- ۲ - رسم فرآیند(ها) بر روی نمودار رطوبت سنجی
- ۳ - نوشتن موازنه جرم برای آب (مایع، بخار یا یخ)
- ۴ - نوشتن موازنه جرم برای جریان (جریانهای) هوای خشک
- ۵ - نوشتن موازنه انرژی برای سیستم
- ۶ - تعیین خواص برای استفاده در موازنه جرم و انرژی یا از طریق محاسبه و یا اگر در  $1 \text{ atm}$  است با به کار بردن نمودارهای رطوبت سنجی
- ۷ - حل برای کمیت‌های لازم

رطوبت زدایی به وسیله سرمایش

ابتدا فرآیند سرمایش ساده در شکل ۷-۵ را در نظر بگیرید. جریان هوای مرطوب از میان

کویل‌های سرد عبور کرده و دمای مخلوط را از نقطه شبنم پایین می‌آورد. قسمتی از بخار در اثر فرآیند سرمایش بر روی کویلها تقطیر شده به صورت مایع خارج می‌شود. فرآیند مذکور بر روی نمودار رطوبت سنجی شکل ۷-۶ نشان داده شده است. جریان هوا برای سرمایش در فشار ثابت ابتدا در رطوبت مخصوص ثابت از نقطه ۱ تا ۲ سرد می‌شود. در این نقطه میعان بخار آب شروع می‌گردد. سرمایش بیشتر رطوبت مخصوص را تا نقطه ۲ کاهش می‌دهد. از موازنه انرژی برای سیستم نتیجه می‌گیریم

$$Q_c = m_a(h_{a1} - h_{a2} + \omega_1 h_{v1} - \omega_2 h_{v2}) - m_a(\omega_1 - \omega_2)h_f \quad (7-59)$$

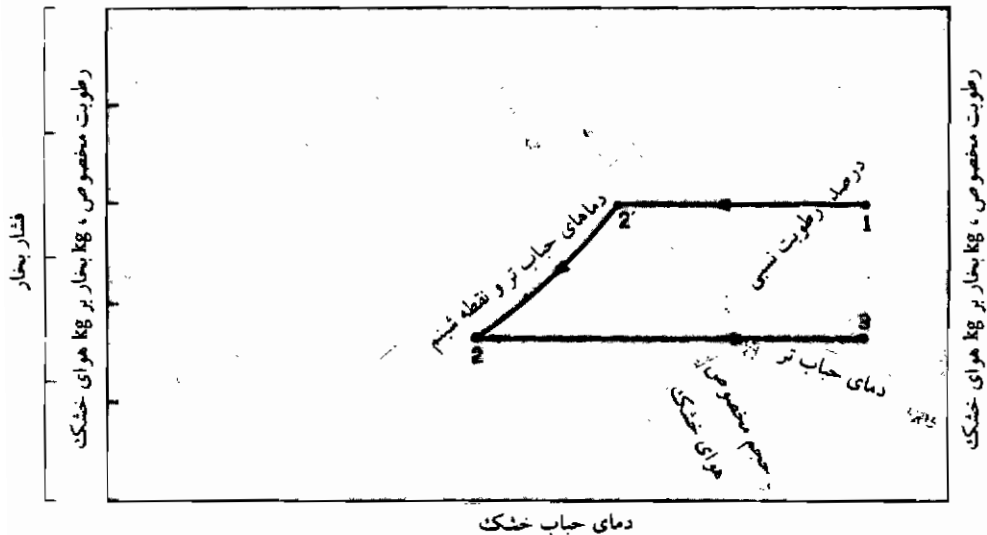
یا بر حسب انتالپهای مخلوط

$$Q_c = \dot{m}_a(h_{m1} - h_{m2}) - \dot{m}_a(\omega_1 - \omega_2) h_f \quad (7-59a)$$

ضریب  $h_f$  از موازنه جرم برای مایع و بخار آب حاصل می‌شود به طوری که:

$$\dot{m}_{v1} = \dot{m}_{v2} + \dot{m}_f$$

$$\dot{m}_f = \dot{m}_{v1} - \dot{m}_{v2} = \dot{m}_a(\omega_1 - \omega_2)$$



شکل ۷-۶ نمودار رطوبت سنجی برای فرآیند شکل ۷-۵

$Q_c$  عبارت از حرارت کسب شده به وسیله کویل‌های سرمایش می‌باشد. در صورت لزوم هوای خشک می‌تواند مجدداً تا دمای حباب خشک اولیه باز گرم شود. فرآیند باز گرم کردن تا نقطه ۳ در شکل‌های ۷-۵ و ۷-۶ ادامه خواهد داشت و حرارت لازم برابر است با

$$Q_H = \dot{m}_a(h_{a_3} + \omega_3 h_{v_3}) - \dot{m}_a(h_{a_2} + \omega_2 h_{v_2})$$

یا

$$Q_H = \dot{m}_a(h_{m_3} - h_{m_2})$$

#### سرمایش تبخیری

یکی از شیوه‌های سرمایش که استفاده قابل ملاحظه‌ای در آب و هوای کوبیری دارد، سرمایش تبخیری است که در شکل ۷-۷ نشان داده شده است. هوای نسبتاً خشک در نقطه ۱ به محفظه وارد و یا آب در آن پاشیده می‌شود و یا از میان لایه‌های مرطوبی عبور می‌کند که دائماً با آب خیس می‌شوند. فرآیند مذکور در نمودار رطوبت سنجی شکل ۷-۸ نمایش داده شده است و فرض می‌گردد که به‌طور آدیاباتیک انجام می‌شود به‌طوری که کاهش در دما در اثر فرآیند تبخیر صورت گیرد.

موازنه جرم برای بخار و مایع عبارت است از

$$\dot{m}_{v_1} + \dot{m}_f = \dot{m}_{v_2}$$

یا

$$\dot{m}_f = \dot{m}_{v_2} - \dot{m}_{v_1} = \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1)$$

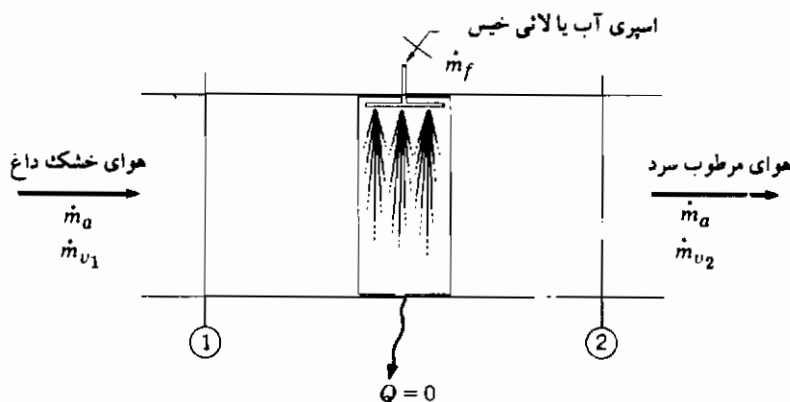
و موازنه انرژی عبارت است از

$$m_a(H_{a_1} + \omega_1 h_{v_1}) + m_a(\omega_2 - \omega_1)h_f = m_a(h_{a_2} + \omega_2 h_{v_2}) \quad (7-60)$$

یا بر حسب انتالپیهای مخلوط

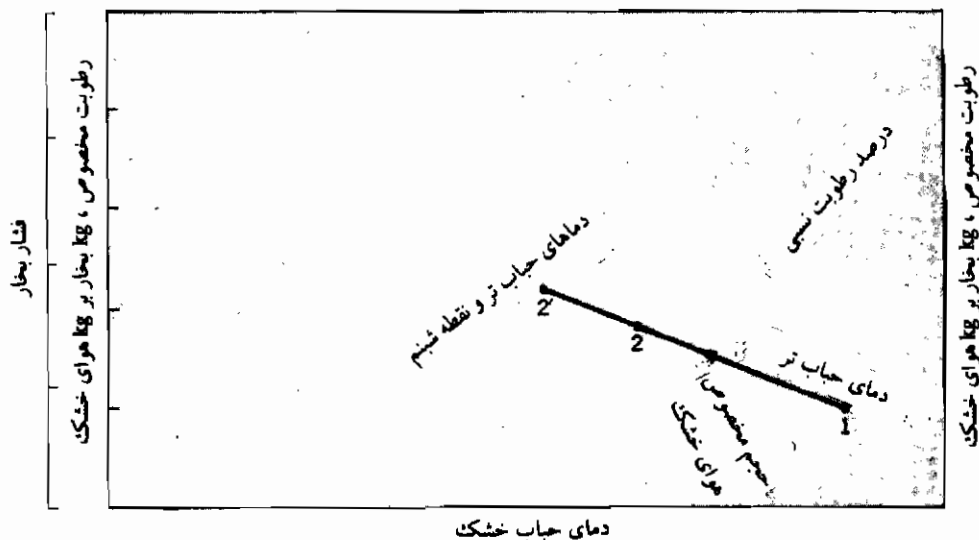
$$\dot{m}_a h_{m_1} + \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1)h_f = \dot{m}_a h_{m_2}$$

به این معنی که انتالپی مخلوط ورودی با تقریب بسیار نزدیکی برابر انتالپی مخلوط خروجی است.



شکل ۷-۷ رطوبت زنی آدیاباتیک یا فرآیند سرمایش تبخیری

البته از طریق این فرآیند می‌توان به دمای حداقل رسید که با نقطه ۲ در شکل ۷-۸ مشخص شده است. درک این مطلب نسبتاً ساده است که فرآیند سرمایش تبخیری یک فرآیند اشباع آدیاباتیک

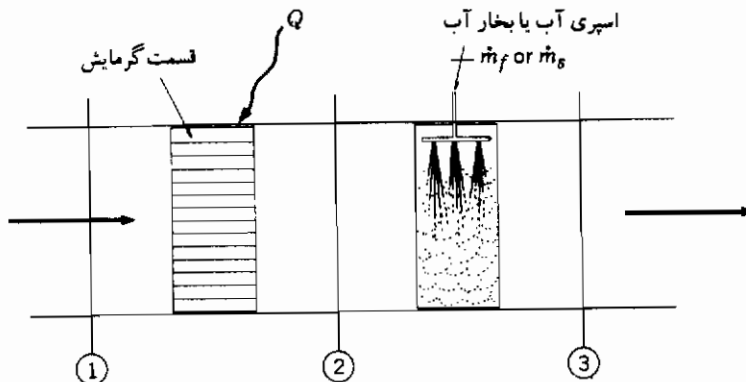


شکل ۷-۸ نمودار رطوبت سنجی برای فرآیند شکل ۷-۷

است که کم و بیش تا به آخر انجام شده و بنابراین خط ثابتی از دمای حباب تر را دنبال می‌کند. مقدار آبی که در اثر تبخیر از دست رفته و باید تأمین گردد، خیلی کم بوده و دمای آن بر روی فرآیند مورد نظر تأثیر محسوسی می‌گذارد.

### رطوبت زنی همراه با گرمایش

موقعی که هوای سرد در رطوبت مخصوص ثابت گرم می‌شود، رطوبت نسبی کاهش می‌یابد و در نتیجه هوای نسبتاً "خشک" تولید می‌شود. اگر فرآیند گرمایش در محدوده دمای قابل توجهی صورت گیرد، جهت گرمایش در هوای بسیار سرد از این فرآیند استفاده می‌شود. هوای خیلی خشک ممکن است باعث ناراحتی، مثلاً خشکی و ترک خوردن لبها و غیره گردد، بنابراین بسیاری از سیستمهای گرمایش و سائلای برای رطوبت زنی نیز دارند. سیستم گرمایش برای اطاق عمل بیمارستان یا سالن زایشگاه مورد بخصوصی از این مبحث است. نمونه‌ای از فرآیند رطوبت زنی در شکل ۷-۹ نشان داده شده است. بخار آب اضافی با پاشیدن آب یا بخار تأمین می‌گردد. مزیت بخار در این است که علاوه بر بالا بردن درصد بخار موجود در سیستم گرما تولید نموده، گرمایی را که باید از یک منبع خارجی برای فرآیند تأمین شود کاهش می‌دهد. اشکال رطوبت زنی با بخار در این است که بوی زننده دارد مگر این که خلوص بخار بدقت کنترل گردد. فرآیند رطوبت زنی همراه گرمایش بر روی نمودار رطوبت سنجی



شکل ۷-۹ فرآیند رطوبت زنی به وسیله گرمایش

شکل ۷-۱۰ نمایش داده شده است.  
بین نقاط ۱ و ۳ موازنه جرم بخار عبارت است از

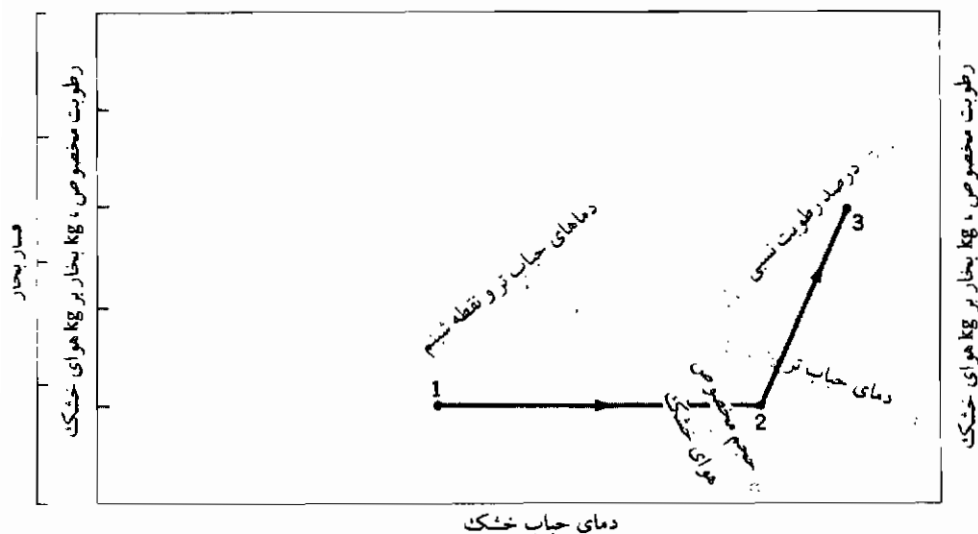
$$\dot{m}_{v_1} + \dot{m}_f = \dot{m}_{v_3}$$

یا

$$\dot{m}_f = \dot{m}_{v_3} - \dot{m}_{v_1} = \dot{m}_a(\omega_3 - \omega_1)$$

و موازنه انرژی بر حسب انتالپیهای مخلوط عبارت است از

$$\dot{m}_a h_{m_1} + Q + \dot{m}_f h_f = \dot{m}_a h_{m_2}$$



شکل ۷-۱۰ نمودار رطوبت سنجی برای فرآیند شکل ۷-۹

اختلاط آدیاباتیک دو جریان

آرایش نشان داده شده در شکل ۷-۱۱ را در نظر بگیرید. دو جریان هوای مرطوب ۱ و ۲



برای تولید جریان خروجی ۳ به طور آدیاباتیک در محفظه‌ای با هم مخلوط می‌گردند. روابط زیر از موازنه جرم هوا و بخار آب برای این سیستم حاصل شده است.

$$m_{a1} + m_{a2} = m_{a3} \quad (۷-۶۱)$$

$$\dot{m}_{v1} + \dot{m}_{v2} = \dot{m}_{v3}$$

$$m_{a1}\omega_1 + m_{a2}\omega_2 = m_{a3}\omega_3 \quad (۷-۶۲)$$

موازنه انرژی برای اختلاط آدیاباتیک در جریان دائم عبارت است از:

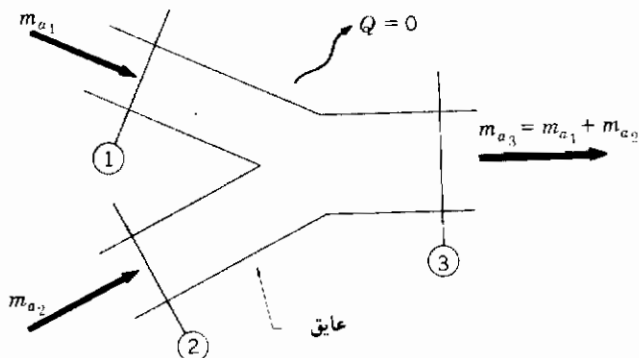
$$m_{a1}(h_{a1} + \omega_1 h_{v1}) + m_{a2}(h_{a2} + \omega_2 h_{v2}) = m_{a3}(h_{a3} + \omega_3 h_{v3}) \quad (۷-۶۳)$$

یا بر حسب انتالپی‌های مخلوط

$$\dot{m}_{a1}h_{m1} + \dot{m}_{a2}h_{m2} = \dot{m}_{a3}h_{m3}$$

وارد نمودن معادله (۷-۶۱) در معادله (۷-۶۲) نتیجه می‌دهد:

$$\frac{m_{a1}}{m_{a2}} = \frac{\omega_3 - \omega_2}{\omega_1 - \omega_3} \quad (۷-۶۴)$$



شکل ۷-۱۱ اختلاط آدیاباتیک دو جریان هوا - بخار آب

اگر معادله (۷-۶۱) در معادله (۷-۶۳) به کار رود، نتیجه عبارت است از

$$\frac{m_{a1}}{m_{a2}} = \frac{(h_{a3} + \omega_3 h_{v3}) - (h_{a2} + \omega_2 h_{v2})}{(h_{a1} + \omega_1 h_{v1}) - (h_{a3} + \omega_3 h_{v3})} = \frac{h_{m3} - h_{m2}}{h_{m1} - h_{m3}} \quad (۷-۶۵)$$

از ادغام معادلات (۷-۶۴) و (۷-۶۵) با یکدیگر رابطه زیر به دست می آید.

$$\frac{m_{a1}}{m_{a2}} = \frac{h_{m3} - h_{m2}}{h_{m1} - h_{m3}} = \frac{\omega_3 - \omega_2}{\omega_1 - \omega_3} \quad (۷-۶۶)$$

حال شرایط فیزیکی متفاوتی را بررسی می کنیم که در هنگام مخلوط شدن دو جریان برقرار می ماند. در استخراج روابط فوق به طور ضمنی فرض شده است که هیچ میعان بخاری صورت نخواهد گرفت. اگر بخار تقطیر شود، به اضافه کردن جریان خروجی دیگری برای مایع جمع شده احتیاج داریم. این امکان وجود دارد که رطوبت نسبی جریان خروجی از ۱۰۰ درصد بالاتر رفته و آب اضافی به صورت قطرات ریز مه ماندی به خارج منتقل شود. اگر فرض کنیم که انتالپی کل اصولاً تابع دمای جابجایی است، در آن صورت فرآیند اختلاط می تواند بر روی نمودار رطوبت سنجی به صورتی که در شکل ۷-۱۲ نشان داده شده ارائه گردد، که سه حالت ممکن مشخص شده است :

(الف)  $\phi_3 < 1$  : بخاری تقطیر نمی شود

(ب)  $\phi_3 = 1$  : جریان هوای خروجی اشباع شده است

(ج)  $\phi_3 > 1$  : بخار تقطیر شده، تولید جریانی مه مانند می کند

تئوری فوق برای اختلاط آدیاباتیک در طراحی سیستمهای تهویه مطبوعی مفید است که هوا را از منابع چندگانه دریافت نموده مخلوط می کنند.

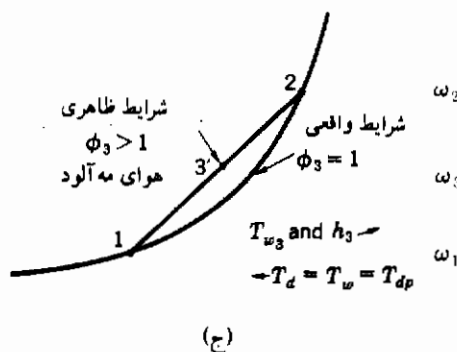
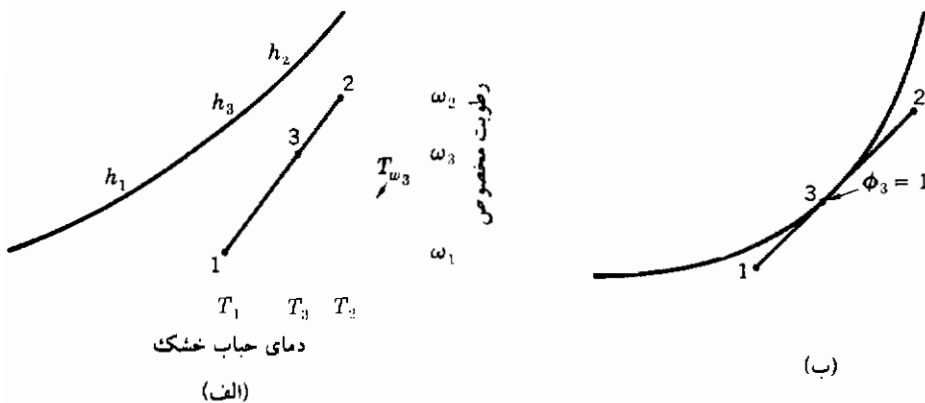
جدول ۷-۲ خلاصه ای است مفید از انواع مختلف فرآیندهای تهویه مطبوع و مخلوطهای رطوبت سنجی، که در قسمتهای قبل درباره آن بحث شده است.

### مثال ۷-۹ سرمایش - بازگرم

هوا در مثال ۷-۶ به یک واحد سرمایش - بازگرمایش نظیر آنچه که در شکل ۷-۵ نمایش داده

شده، وارد می‌شود. جریان هوای خروجی در  $75^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۵۰ درصد است. گرمایی را که باید در کویل‌های سرمایش دفع شده و گرمایی را که باید در قسمت گرمایش اضافه گردد، محاسبه کنید.

**حل:** برای حل این مسأله نمودار رطوبت سنجی را به کار خواهیم گرفت. فرآیندهای مورد نظر بطور طرحواره‌ای در شکل ۷-۶ نشان داده شده است. از روی نمودار داریم:



شکل ۷-۱۲ نمودار رطوبت سنجی برای فرآیند شکل ۷-۱۱

(الف)  $\phi_3 < 1$  بخاری تقطیر نشده است؛

(ب)  $\phi_3 = 1$  جریان هوای خروجی اشباع شده است؛

(ج)  $\phi_3 > 1$  بخار تقطیر شده، تولید جریانی مه مانند می‌کند.

جدول ۷-۲ روابطی در مورد فرآیندهای مخلوط هوا - بخار آب

خواص مخلوط					
فرآیند یا خاصیت	دمای جاب خشک $T_{DB}$	دمای جاب تر $T_{WB}$	دمای نقطه شبنم $T_{DB}$	رطوبت مخصوص $\omega$	انتالپی مخلوط $h_m = h_a + \omega h_v$
گرمايش ساده، بدون افزودن رطوبت	افزايش مي-يابد	افزايش مي-يابد	ثابت	ثابت	افزايش مي-يابد
سرمایش، بدون رطوبت زدائی	کاهش مي-يابد	کاهش مي-يابد	ثابت	ثابت	کاهش مي-يابد
سرمایش، با رطوبت زدائی	کاهش مي-يابد	کاهش مي-يابد	تارطوبت نسبی ۱۰۰٪ ثابت، سپس کاهش مي-يابد	تارطوبت نسبی ۱۰۰٪ ثابت، سپس کاهش مي-يابد	کاهش مي-يابد
سرمایش تبخیری	کاهش مي-يابد	تقریباً ثابت	افزايش مي-يابد	افزايش مي-يابد	تقریباً ثابت
گرمایش، با رطوبت زنی	افزايش مي-يابد	افزايش مي-يابد	افزايش مي-يابد	افزايش مي-يابد	افزايش مي-يابد
سرمایش، رطوبت زدائی، بازگرم	مغیر، موازنه جرم و انرژی کامل لازم است				
انتالپی مخلوط بر جرم هوای خشک	تابع عمدتاً دمای جاب تر				
نقطه شبنم ثابت	نظیر $P_w$ و $\omega$ ثابت				
دمای جاب تر	تقریباً نظیر دمای اشباع آدیاباتیک				
دمای جاب خشک	دمای واقعی مخلوط				

$$\omega_1 = \omega'_2 = 123 \text{ grains} = 0.0176 \text{ lbm} \quad (7.98 \text{ g})$$

$$\omega_2 = \omega_3 = 65 \text{ grains} = 0.0093 \text{ lbm} \quad (4.22 \text{ g})$$

$$T'_2 = 73^\circ\text{F} \quad (22.8^\circ \text{ C})$$

$$T_2 = 55^\circ\text{F} \quad (12.8^\circ \text{ C})$$

موازنه انرژی برای قسمت سرمایش در معادله (۷-۵۹) داده شده است و انتالپی بخار را می‌توان از معادله (۷-۴۷) گرفت و انتالپیهای بخار اشباع شده را می‌توان از جداول بخار آب در دماهای داده شده با تقریب خوبی به دست آورد. در این جا معادله (۷-۴۷) را به کار خواهیم گرفت:

$$h_{v1} = 1061 + (0.445)(100) = 1106 \text{ Btu/lbm} \quad (2572 \text{ J/g})$$

$$h_{v2} = 1061 + (0.445)(55) = 1085 \text{ Btu/lbm} \quad (2523 \text{ J/g})$$

$$55^\circ\text{F} \text{ در } h_f = 23.06 \text{ Btu/lbm} \quad (53.63 \text{ kJ/kg})$$

حال با جایگزین کردن این مقادیر در معادله (۷-۵۹) به دست می‌آید:

$$Q_c = m_a[(0.24)(100 - 55) + (0.0176)(1106) - (0.0093)(1085)] \\ - m_a(0.0176 - 0.0093)(23.06)$$

یا

$$Q_c = 20 \text{ Btu/lbm} \quad \text{هوای خشک} \quad (46.5 \text{ kJ/kg})$$

در قسمت گرمایش هیچ گونه آبی از دست نرفته یا به دست نیامده است و لذا موازنه انرژی به صورت زیر است:

$$Q_H = m_a[h_{a3} - h_{a2} + \omega_3(h_{v3} - h_{v2})]$$

$Q_H$  گرمای افزوده شده است. این رابطه با جایگزین کردن مقادیر عددی مناسب به صورت زیر در می‌آید.

$$Q_H = m_a[(0.24)(75 - 55) + (0.0093)(0.445)(75 - 55)]$$

یا

$$Q_H = 4.88 \text{ Btu/lbm} \text{ هوای خشک } (11.35 \text{ kJ/kg})$$

یک راه نسبتاً ساده‌تر، خواندن مستقیم مقادیر انتالپیهای مخلوط از نمودار رطوبت سنجی است. داریم

$$h_{m1} = 43.7 \text{ Btu/lbm} \text{ هوای خشک } (T_{DB} = 100^\circ\text{F}, T_{WB} = 80^\circ\text{F})$$

$$h_{m2} = 23.1 \text{ Btu/lbm} \text{ هوای خشک } (\phi = 100\% \text{ در } 55^\circ\text{F})$$

$$h_{m3} = 28.4 \text{ Btu/lbm} \text{ هوای خشک } (T_{DB} = 75^\circ\text{F}, \phi = 50\%)$$

همچنین داریم

$$m_f = \omega_1 - \omega_3 = 0.0083 \text{ lbm/lbm} \text{ هوای خشک}$$

بنابراین موازنه انرژی برابر است با

$$Q_c = \dot{m}_a(h_{m1} - h_{m2}) - \dot{m}_a(\omega_1 - \omega_2)h_f$$

$$= 43.7 - 23.1 - (0.0083)(23.06) = 20.41 \text{ Btu/lbm} \text{ هوای خشک}$$

اختلاف بین این مقدار و مقدار هوای خشک  $20 \text{ Btu/lbm}$  به دست آمده در بالا در اثر عدم دقت مقادیر خوانده شده از نمودار رطوبت سنجی است. برای فرآیند گرمایش به دست می آوریم:

$$Q_H = \dot{m}_a(h_{m3} - h_{m2}) = 28.4 - 23.1 = 5.3 \text{ Btu/lbm} \text{ هوای خشک}$$

باز هم اختلاف در اعداد بخاطر عدم دقت در مقادیر خوانده شده از نمودار رطوبت سنجی است.

### مثال ۷-۱۰ سرمایش تبخیری

حداقل دمایی را تعیین کنید که با استفاده از یک فرآیند سرمایش تبخیری با هوای کویری در  $115^\circ\text{F}$  و رطوبت نسبی ۵ درصد می توان به آن دست یافت.

**حل:** این دمای حداقل را می‌توانیم با استفاده از یک نمودار رطوبت سنجی، همان طور که در شکل ۷-۸ نمایش داده شده، یا با محاسبه دمای اشباع آدیاباتیک به دست آوریم. از روی نمودار رطوبت سنجی فوراً می‌خوانیم که برای  $T_{DB} = 115^{\circ}\text{F}$  و درصد  $\phi = 5$ ،

$$T_{WB} = 67^{\circ}\text{F}$$

علت مفید بودن کولرهای تبخیری در آب و هوای کویری کاملاً مشهود است.

### مثال ۷-۱۱ اختلاط آدیاباتیک

۲ lb هوا در  $100^{\circ}\text{F}$  و رطوبت ۷۰ درصد به طور آدیاباتیک با ۳ lbm هوا در  $70^{\circ}\text{F}$  و رطوبت ۵۰ درصد مخلوط شده است. اگر فرآیند مذکور در فشار ثابت ۱۴/۶۹۶ psia جریان دائم صورت گیرد، دمای مخلوط را محاسبه کنید. همچنین رطوبت نسبی مخلوط را تعیین نمایید.

**حل:** از روی نمودار رطوبت سنجی داریم:

$$T_1 = 100^{\circ}\text{F} \quad \omega_1 = 206 \text{ grains} = 0.029 \text{ lbm/lbm} \text{ هوای خشک}$$

$$T_2 = 70^{\circ}\text{F} \quad \omega_2 = 55 \text{ grains} = 0.0079 \text{ lbm/lbm} \text{ هوای خشک}$$

$$m_{a1} = 2$$

$$m_{a2} = 3$$

حال باید از معادله (۷-۶۴) رطوبت مخصوص خروجی را محاسبه کنیم:

$$\frac{m_{a1}}{m_{a2}} = \frac{\omega_3 - \omega_2}{\omega_1 - \omega_3}$$

$$\frac{2}{3} = \frac{\omega_3 - 55}{206 - \omega_3}$$

$$\omega_3 = 115 \text{ grains} = 0.0021 \text{ lbm/lbm} \text{ هوای خشک}$$

اکنون خطی بر روی نمودار رطوبت سنجی، نظیر آنچه که در شکل الف ۷-۱۲ نشان داده شده، رسم

می‌گردد. حالت نهایی در محل تلاقی این خط و  $\omega_3 = 115 \text{ grain}$  است که نتیجه می‌دهد:

$$T_{DB3} = 82^\circ\text{F}$$

$$T_{WB3} = 74.5^\circ\text{F}$$

$$\phi_3 = 70 \text{ درصد}$$

### مثال ۱۲-۷ سرمایش در دمای پایین

اتاق عایق شده مخصوصی برای ذخیره کردن گوشت در  $20^\circ\text{F}$  - طراحی و برآورد شده که نشت هوای خارج از میان درهای ورودی به داخل اتاق  $500 \text{ ft}^3/\text{min}$  در  $95^\circ\text{F}$  و رطوبت نسبی ۴۰ درصد است. اگر هوای اطاق در  $20^\circ\text{F}$  - اشباع شده باشد، چه مقدار سرمایش برای جبران نمودن این نشتی لازم است؟

**حل:** انرژی کل دفع شده از هوا برابر است با

$$Q = \dot{m}_a(h_1 - h_2) \quad (a)$$

$h_1$  انتالپی مخلوط هوا - بخار آب در خارج از اتاق و  $h_2$  انتالپی مخلوط هوا - آب - بخار - یخ در داخل اتاق است. نمودار رطوبت سنجی را برای هوای خارج به کار برده خواهیم داشت:

$$\omega_1 = 101 \text{ grains} = 0.01442 \text{ lbm/lbm} \text{ هوای خشک}$$

$$T_{DB1} = 95^\circ\text{F}$$

$$v_{a1} = 14.3 \text{ ft}^3/\text{lbm} \text{ هوای خشک} \quad (0.893 \text{ m}^3/\text{kg})$$

بنابراین دبی جرم هوای خشک عبارت است از

$$\dot{m}_a = \frac{500 \text{ ft}^3/\text{min}}{14.3 \text{ ft}^3/\text{lbm}} = 34.96 \text{ lbm/min} \quad (15.86 \text{ kg/min}) \quad (b)$$

فشار بخار در  $20^\circ\text{F}$  - ( $440^\circ\text{R}$ ) از معادله ( $7-50a$ ) محاسبه می‌گردد.



$$P_{g2} = 5.103 \exp\left(18.42 - \frac{11059}{440}\right) = 0.00619 \text{ psia } (42.67 \text{ Pa}) \quad (c)$$

لذا رطوبت مخصوص در اتاق برابر است با

$$\omega_2 = 0.622 \frac{P_{g2}}{P_{a2}} = \frac{(0.622)(0.00619)}{14.696 - 0.00619} = 2.62 \times 10^{-4} \quad (d)$$

جرم بخار ورودی تبدیل شده به یخ در اتاق برابر است با  $\dot{m}_a(\omega_1 - \omega_2)$  لذا انتالپی مخلوط موجود در اتاق عبارت است از

$$h_2 = h_{a2} + \omega_2 h_{v2} + (\omega_1 - \omega_2) h_{i2} \quad (e)$$

در حالی که انتالپی ورودی برابر است با

$$h_1 = h_{a1} + \omega_1 h_{v1} \quad (f)$$

حال انتالپیهای بخار و یخ به صورت زیر تعیین می شود.

$$h_{v1} = 1061 + (0.445)(95) = 1103.3 \text{ Btu/lbm}$$

$$h_{v2} = 1061 + (0.445)(-20) = 1052.1 \text{ Btu/lbm}$$

$$h_{i2} = -158.9 + (0.467)(-20) = -168.24 \text{ Btu/lbm}$$

حال می توانیم برای تعیین حرارت دفع شده مقادیر عددی را در معادله (a) وارد کنیم.

$$\begin{aligned} Q &= 34.96[(0.24)(95 + 20) + (0.01443)(1103.3) \\ &\quad - (2.62 \times 10^{-4})(1052.1) - (0.01443 - 2.62 \times 10^{-4})(-168.24)] \\ &= 34.96(27.6 + 15.92 - 0.276 + 2.384) \\ &= 1595 \text{ Btu/min} = 95709 \text{ Btu/h } (28.04 \text{ kW}) \end{aligned}$$

این بیانگر لزوم سرمایشی برابر با ۷/۹۸ تن تبرید است، که "تن" به صورت ۱۲۰۰۰ Btu/h تعریف می گردد. ما می توانستیم مسأله را با به دست آوردن انتالپیهای مخلوط مستقیماً از روی نمودار رطوبت سنجی حل کنیم. می توانیم مقادیر زیر را بخوانیم.

$$h_{m_1} = 38.8 \text{ Btu/lbm} \quad (T_{DB} = 95^\circ\text{F} \text{ و } \phi = 40\%)$$

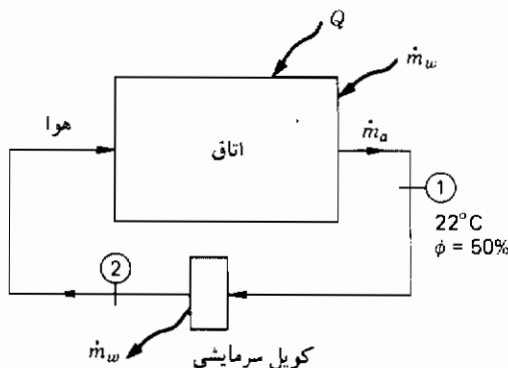
$$h_{m_2} = -4.5 \text{ Btu/lbm} \quad (T_{DB} = -20^\circ\text{F} \text{ و } \phi = 100\%)$$

پس موازنه انرژی عبارت است از

$$Q = 34.96[38.8 - (-4.5) - (0.0142)(-168.24)] = 1597 \text{ Btu/lbm}$$

### مثال ۷-۱۳ تهویه مطبوع اتاق کار

برای تهویه هوای اتاق کار کوچکی، دفع حرارت به میزان  $10 \text{ kW}$  لازم است. اتاق در  $22^\circ\text{C}$  و رطوبت نسبی  $50\%$  درصد قرار دارد.  $25\%$  درصد از رطوبت اتاق گرفته می شود. هوا به طور کامل جریان داشته و همان طور که در نمودار نشان داده شده، سیستم سرمایش باید رطوبت افزوده شده به اتاق را دفع نماید. حجم جریان هوای لازم را محاسبه کنید اگر هوا فقط بقدری سرد شده باشد که رطوبت را دفع نماید.



شکل مثال ۷-۱۳

حل : از صورت مسأله

$$T_1 = 22^\circ\text{C} \quad \phi_1 = 50\% \quad Q = 10 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_w = 0.25\dot{m}_{v1} \quad \phi_2 = 100\%$$

لذا از موازنه جرم آب لازم است که

$$\dot{m}_{v2} = \dot{m}_{v1} - \dot{m}_w = 0.75\dot{m}_{v1} \quad (a)$$

از نمودار رطوبت سنجی

$$\omega_1 = 0.00820 \text{ kg/kg خشک هوای} \quad (b)$$

حالت ۲ بر طبق صورت مسأله اشباع بوده و

$$\omega_2 = 0.75\omega_1 = 0.00615 \quad (c)$$

سپس دما در نقطه ۲ از نمودار رطوبت سنجی به دست می آید

$$T_2 = T_{DB2} = T_{WB2} = 7^\circ\text{C} \quad (d)$$

حال موازنه انرژی در اتاق نوشته می شود

$$\dot{m}_a(h_2 + \omega_2 h_{v2}) + \dot{m}_w h_w + Q = \dot{m}_a(h_1 + \omega_1 h_{v1}) \quad (e)$$

انتالپیهای بخار از معادله (۷-۴۷b) محاسبه می گردد:

$$h_v = 2501 + 1.863T$$

$$h_{v1} = 2501 + (1.863)(22) = 2542 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{v2} = 2501 + (1.863)(7) = 2514 \text{ kJ/kg}$$

یک حدس منطقی برای  $h_w$  برابر است با

$$h_w = h_f(22^\circ\text{C در}) = 92.33 \text{ kJ/kg} \quad (f)$$

با توجه به این که  $\dot{m}_w = \dot{m}_a(\omega_1 - \omega_2)$ ، معادله (e) به صورت زیر در می آید

$$\dot{m}_a[(1.005)(7 - 22) + (0.00615)(2514) - (0.00820)(2542)] + (0.00820 - 0.00615)(92.33) + 10 = 0 \quad (g)$$

که از حل آن نتیجه می‌گیریم

$$\dot{m}_a = 0.4934 \text{ kg/s} = 29.6 \text{ kg/min} \quad (h)$$

حجم مخصوص جریان خروجی از کویل‌های سرمایشی در نمودار رطوبت‌سنجی برابر است با

$$v_{a2} = 0.802 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ هوای خشک} \quad (i)$$

لذا دبی حجمی جریان در آن نقطه عبارت خواهد بود از

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{m}_a v_{a2} \\ &= (29.6)(0.802) = 23.7 \text{ m}^3/\text{min} \end{aligned} \quad (j)$$

حجم مخصوص در شرایط ورودی به کویل‌های سرمایشی برابر است با

$$v_{a1} = 0.847 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ هوای خشک}$$

بنابراین دبی حجمی در آن نقطه عبارت خواهد بود از

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_a v_{a1} = (29.6)(0.847) = 25.1 \text{ m}^3/\text{min} \quad (k)$$

## مثال ۷-۱۴

در بیشتر سیستم‌های تهویه مطبوع معمولاً مقدار کمی هوای تازه محیط خارج را با هوای سرد خروجی کویل‌های مبرد مخلوط می‌کنند. در کاربرد خاصی در تگزاس، هوای خروجی از کویل‌های سرمایشی در  $10^\circ\text{C}$  و رطوبت ۱۰۰ درصد قرار دارد. این هوا با ۲۰ درصد هوای خارج با دمای  $38^\circ\text{C}$  و رطوبت ۳۰ درصد مخلوط می‌گردد. دمای نهایی و رطوبت نسبی مخلوط را محاسبه کنید.

**حل:** برای این مسأله به نمودار رطوبت سنجی مراجعه نموده می‌خوانیم (از شکل ۷-۱۲ بعنوان راهنما استفاده می‌کنیم)

$$T_1 = 10^\circ\text{C} \quad \phi_1 = 100\% \quad \omega_1 = 0.0077 \text{ kg/kg}$$

$$T_2 = 38^\circ\text{C} \quad \phi_2 = 30\% \quad \omega_2 = 0.0123 \text{ kg/kg}$$

از معادله (۷-۶۴)

$$\frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a2}} = \frac{\omega_3 - \omega_2}{\omega_1 - \omega_3} \quad (a)$$

عبارت ۲۰ درصد هوای خارج به این معنی است که  $\frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a2}} = \frac{1}{.7} = 5$  به طوری که

$$5 = \frac{\omega_3 - 0.0123}{0.0077 - \omega_3} \quad (b)$$

و

$$\omega_3 = 0.0085$$

حال خطی بین نقاط ۱ و ۲ بر روی نمودار رطوبت سنجی ترسیم نموده،  $T_3$  را در نقطه تقاطع با  $\omega = 0.0085$  تعیین می‌کنیم. لذا

$$T_3 = 14.5^\circ\text{C} \quad \phi_3 = 83\%$$

### مثال ۷-۱۵ گرمایش با رطوبت زنی

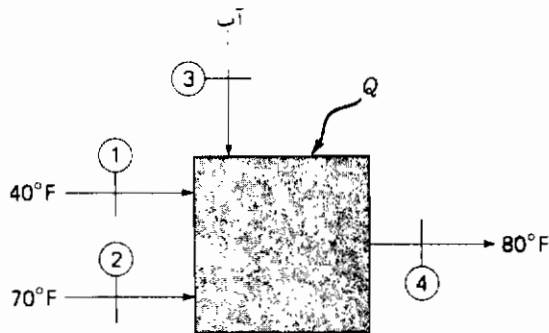
۱۶۰۰ ft<sup>3</sup>/min هوا در ۴۰°F و ۵۰ درصد رطوبت نسبی طی یک فرآیند جریان دائم با ۱۵۰۰ ft<sup>3</sup>/min هوا در ۷۰°F و ۴۰ درصد رطوبت نسبی مخلوط می‌گردد و حرارت کافی اضافه می‌شود تا دمای خروجی به ۸۰°F برسد. به مقدار کافی آب مایع در ۶۰°F به داخل جریان پاشیده می‌شود تا شرایط رطوبت نسبی ۵۰ درصد در ۸۰°F تولید شود. مقدار گرمایش لازم را محاسبه کنید.

**حل:** طرحواره این فرآیند در شکل همراه نشان داده شده است. داده‌های مربوط به شکل عبارت

است از

$$\begin{aligned} T_{DB1} &= 40^{\circ}\text{F} & \phi_1 &= 50\% & \dot{V}_1 &= 600 \text{ ft}^3/\text{min} \\ T_{DB2} &= 70^{\circ}\text{F} & \phi_2 &= 40\% & \dot{V}_2 &= 1500 \text{ ft}^3/\text{min} \\ \tau_1 &= 60^{\circ}\text{F} & & & & \text{آب مایع اشباع} \\ T_{DB4} &= 80^{\circ}\text{F} & \phi_4 &= 50\% & & \end{aligned}$$

حالا معادلات موازنه زیر را به کار می گیریم :



شکل مثال ۷-۱۵

موازنه جرم برای هوای خشک :

$$\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a4} \quad (a)$$

موازنه جرم برای آب و بخار :

$$\dot{m}_{v1} + \dot{m}_{v2} + \dot{m}_{f3} = \dot{m}_{v4}$$

یا

$$\dot{m}_{f3} = \dot{m}_{a4} \omega_4 - \dot{m}_{a1} \omega_1 - \dot{m}_{a2} \omega_2 \quad (b)$$

موازنه انرژی برای کل سیستم

$$\dot{m}_{a1} h_{m1} + \dot{m}_{a2} h_{m2} + \dot{m}_{f3} h_{f3} + Q = \dot{m}_{a4} h_{m4} \quad (c)$$

جریان جرمی هوای خشک از رابطه زیر به دست می آید:

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}}{v_a} \quad (d)$$

حالا با مراجعه به نمودار رطوبت سنجی مقادیر مختلف پارامترها را به دست می آوریم

$$v_{a1} = 12.6 \text{ ft}^3/\text{lbm} \text{ هوای خشک}$$

$$v_{a2} = 13.5 \text{ ft}^3/\text{lbm} \text{ هوای خشک}$$

$$h_{m1} = 12.3 \text{ Btu/lbm} \text{ هوای خشک}$$

$$h_{m2} = 23.7 \text{ Btu/lbm} \text{ هوای خشک}$$

$$h_{m1} = 31.5 \text{ Btu/lbm} \text{ هوای خشک}$$

$$\omega_1 = 0.0028$$

$$\omega_2 = 0.0063$$

$$\omega_d = 0.0111$$

$$h_{f3} = 60 - 32 = 23 \text{ Btu/lbm}$$

جریان جرمی هوا پس از معادله (d) محاسبه می شود

$$\dot{m}_{a1} = \frac{600}{12.6} = 47.62 \text{ lbm/min}$$

$$\dot{m}_{a2} = \frac{1500}{13.5} = 111.1 \text{ lbm/min}$$

سپس از معادله (a)

$$\dot{m}_{a4} = 47.62 + 111.1 = 158.73 \text{ lbm/min}$$

و از معادله (b)

$$\begin{aligned}\dot{m}_{f3} &= + (158.73)(0.0111) - (47.62)(0.0028) - (111.1)(0.0063) \\ &= 0.93 \text{ lbm/min}\end{aligned}$$

در نهایت تمام مقادیر در معادله (c) جایگزین می‌شود تا گرمایش به دست آید

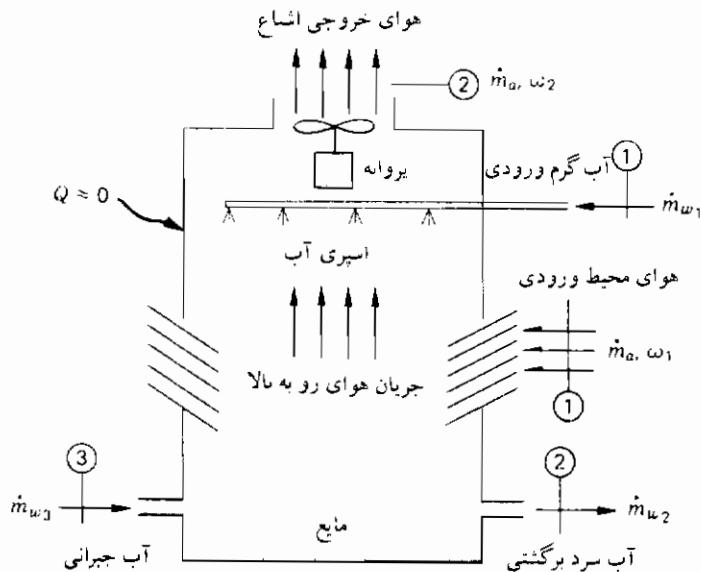
$$(47.62)(12.3) + (111.1)(23.7) + (0.93)(28) + Q = (158.73)(31.5)$$

و

$$Q = 1755 \text{ Btu/min} \quad (30.9 \text{ kW})$$

## ۷-۸ برجهای خنک‌کن

به‌طوری‌که بعداً در فصل ۹ مشاهده خواهیم نمود، سیکل‌های بزرگ تبرید و قدرت باید حرارت زیادی به محیط دفع کنند. معمولاً برای سیکل‌های قدرت و یا تبرید ماده سردکننده آب است و همان طوری‌که در شکل ۷-۱۳ نشان داده شده از یک برج خنک‌کن تر جهت انتقال انرژی به اتمسفر



شکل ۷-۱۳ طرحواره برج خنک‌کن



استفاده می‌شود.

فرض می‌گردد که حرارت منتقل شده از محیط کم باشد. آب گرم ورودی به داخل هوای نسبتاً خشک که به طرف بالا جریان دارد پاشیده می‌شود. همان طور که هوا اشباع می‌شود نظیر کولر تبخیری دما هم پایین می‌آید، و مایع سردتر در پایین برج جمع آوری می‌شود. به علت جذب آب توسط هوا، باید مقداری آب به سیستم اضافه شود تا جریان سرد خروجی و جریان آب گرم ورودی یکسان باشند. لذا فرض می‌کنیم

$$\dot{m}_{w1} = \dot{m}_{w2} \quad (7-67)$$

حال می‌توان موازنه جرم و انرژی مناسب را در مورد سیستم اعمال نمود. واضح است که جرم هوای خشک در ورود و خروج یکسان است. موازنه جرم بخار و آب مایع عبارت است از

$$\dot{m}_{w1} + \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{w3} = \dot{m}_{w2} + \dot{m}_{v2} \quad (7-68)$$

با استفاده از معادله (۷-۶۷) رابطه بالا به رابطه زیر ساده می‌شود

$$\dot{m}_{w3} = \dot{m}_{v2} - \dot{m}_{v1} \quad (7-69)$$

و با استفاده از رطوبتهای مخصوص به دست می‌آوریم

$$\dot{m}_{w3} = \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1) \quad (7-70)$$

موازنه انرژی عبارت است از

$$\begin{aligned} \dot{m}_a(h_{a1} + \omega_1 h_{v1}) + \dot{m}_{w1} h_{w1} + \dot{m}_{w3} h_{w3} \\ = \dot{m}_a(h_{a2} + \omega_2 h_{v2}) + \dot{m}_{w2} h_{w2} \end{aligned} \quad (7-71)$$

یا با استفاده از انتالپهای مخلوط و با در نظر گرفتن انتالپهای آب برابر انتالپی مایع اشباع شده

$$\dot{m}_a[h_{m1} - h_{m2} + h_{f3}(\omega_2 - \omega_1)] = \dot{m}_{w1}(h_{f2} - h_{f1}) \quad (7-72)$$

مثال زیر استفاده از این مفاهیم را نشان می‌دهد.

### مثال ۷-۱۶ برج خنک‌کن برای یک نیروگاه

لازم است که در یک نیروگاه  $12000 \text{ kg/s}$  آب از  $40^\circ\text{C}$  تا  $30^\circ\text{C}$  سرد شود. هوای ورودی برای برج خنک‌کن در  $25^\circ\text{C}$  و رطوبت نسبی  $35\%$  درصد در دسترس است، و می‌توان فرض نمود که بُرج را در  $35^\circ\text{C}$  و رطوبت نسبی  $90\%$  درصد ترک می‌کند. آب لازم برای جبران آب تبخیر شده در  $20^\circ\text{C}$  در دسترس می‌باشد. جریان‌های جرمی آب جبرانی و هوای لازم را محاسبه کنید.

**حل:** ابتدا فشار بخار را از معادله (۷-۳۷) و فشارهای اشباع محاسبه می‌کنیم

$$\begin{aligned} p_{g1} &= 3.169 \text{ kPa} & T_{a1} &= 25^\circ\text{C} \text{ در} \\ p_{g2} &= 6.268 \text{ kPa} & T_{a2} &= 35^\circ\text{C} \text{ در} \end{aligned} \quad (a)$$

$$\begin{aligned} p_{v1} &= \phi_1 p_{g1} = (3.169)(0.35) = 1.109 \text{ kPa} \\ p_{v2} &= \phi_2 p_{g2} = (6.268)(0.90) = 4.471 \text{ kPa} \end{aligned} \quad (b)$$

حال رطوبت‌های مخصوص عبارت است از:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 0.622 \frac{p_{v1}}{p_{a1}} = \frac{(0.622)(1.109)}{101.32 - 1.109} = 6.88 \times 10^{-3} \\ \omega_2 &= \frac{(0.622)(4.471)}{101.32 - 4.471} = 0.0305 \text{ kg/kg} \text{ هوای خشک} \end{aligned} \quad (c)$$

انتالپی مایع‌ها از جداول بخار آب به‌دست می‌آیند

$$\begin{aligned} h_{f1} &= 167.57 \text{ kJ/kg} & 40^\circ\text{C} \text{ در} \\ h_{f2} &= 125.79 \text{ kJ/kg} & 30^\circ\text{C} \text{ در} \\ h_{f3} &= 83.96 \text{ kJ/kg} & 20^\circ\text{C} \text{ در} \end{aligned} \quad (d)$$

انتالپی بخارها از معادله (۷-۴۷b) محاسبه می‌گردد:

$$h_{v1} = 2501 + (1.863)(25) = 2548 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{v2} = 2501 + (1.863)(35) = 2566 \text{ kJ/kg} \quad (e)$$

تفاضل در انتالپهای هوا به صورت  $c_{pa}(T_1 - T_2)_a$  محاسبه می‌گردد با  $c_{pa} = 1.005 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ .  
حال تمام خواص رami توان در معادله (۷-۷۲) جایگزین نمود

$$\begin{aligned} \dot{m}_a[(1.005)(25 - 35) + (6.88 \times 10^{-3})(2548) - (0.0305)(2566) \\ + (0.0305 - 6.88 \times 10^{-3})(83.96)] = (1200 \text{ kg/s})(125.79 - 167.57) \quad (f) \end{aligned}$$

لذا جریان هوای خشک لازم به صورت زیر به دست می‌آید

$$\dot{m}_a = 7287 \text{ kg/s} \quad (g)$$

آب جبرانی لازم برای موازنه عبارت است از

$$\dot{m}_{w3} = \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1) = (7287)(0.0305 - 6.88 \times 10^{-3}) = 172.1 \text{ kg/s} \quad (h)$$

باید دقت شود که کل جریان هوا و بخار آب در نقطه ورود برابر است با

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{کل}} &= \dot{m}_a + \dot{m}_{v1} = \dot{m}_a(1 + \omega_1) \\ &= (7287)(1 + 6.88 \times 10^{-3}) = 7337 \text{ kg/s} \quad (i) \end{aligned}$$

## ۷-۹ مخلوط گازهای حقیقی

تمام بحثهای این فصل تا کنون، درباره رفتار مخلوطهایی بود که هر کدام از اجزای آنها، مستقل از ترکیبشان در مخلوط مورد نظر، به عنوان یک گاز ایده آل رفتار می‌کنند. این رفتار عملاً موقعی مشاهده می‌شود که اجزای گازها در فشارهای بقدر کافی پایین وجود داشته باشند که در آن صورت فاصله ملکولهای آنها از یکدیگر زیاد است و میدانهای نیروی ملکولی تأثیری بر روی فشار نمی‌گذارد، به این معنی که بر حسب ضرایب تراکم پذیری عمومی فصل ششم، اجزای گازی در  $T_r > 1$  و  $P_r < 1$  وجود خواهند داشت. در این بخش قصد داریم شیوه‌ای برای محاسبه رفتار مخلوطهای گازی در

محدوده‌ای از دما و فشار نشان دهیم که در آن دیگر نمی‌توان قانون گاز ایده‌آل را به کار برد. متأسفانه چنین محاسباتی نسبتاً پیچیده است.

ابتدا دو روش برخورد ساده با مسأله را در نظر می‌گیریم. می‌توان فرض کرد که فشار کل مخلوط به صورت جمع خطی فشارهایی که هر کدام از اجزای آن در دما و حجم کل مخلوط وارد می‌کند محاسبه می‌گردد. بدین ترتیب

$$p_m = \sum p_i \quad (7-73)$$

$p_m$  فشار کل مخلوط است. این قانون جمع فشارهای دالتون<sup>۱</sup> خوانده شده و با قانون فشارهای جزئی تفاوت دارد به این صورت که اینک باید  $p_i$  را از یک معادله حالت گاز حقیقی محاسبه کنیم. قانون جمع حجمهای آمگات رابطه مشابهی است که فرض می‌کند حجم کل مخلوط را به صورت جمع حجمهای اجزای آن می‌توان در نظر گرفت و حجم هر کدام از اجزا در دما و فشار مخلوط تعیین می‌گردد:

$$V_m = \sum V_i \quad (7-74)$$

$V_i$  باید از یک معادله حالت گاز حقیقی تعیین شود. خواننده باید بدقت توجه کند که  $p_i$  و  $V_i$ ، فشار جزئی و حجم جزئی توضیح داده شده در بخش ۷-۲ نیستند زیرا آنها از معادله حالت گاز ایده‌آل تعیین نگردیده‌اند.

اگر برای اجزا معادله حالت تراکم پذیری عمومی را به کار ببریم

$$p_i = \frac{Z_i n_i \Re T}{V_m} \quad (7-75)$$

و

$$V_i = \frac{Z_i n_i \Re T}{p_m} \quad (7-76)$$

$V_m$  و  $p_m$  به ترتیب فشار کل و حجم کل مخلوط است که فرض می‌کنیم بوسیله رابطه زیر به یک مقدار  $Z$

برای مخلوط مربوط می‌شوند.

$$p_m V_m = n_m Z_m \mathcal{R} T \quad (7-77)$$

با وارد کردن رابطه‌های تراکم پذیری در معادله (۷-۷۵) یا (۷-۷۶) به دست می‌آوریم.

$$n_m Z_m = \sum n_i Z_i$$

یا

$$Z_m = \sum x_i Z_i$$

به هر حال باید به عقب برگردیم و دقت کنیم که شرایط لازم برای تعیین مقادیر  $Z_i$  بسته به این که قانون جمع فشارها و یا قانون جمع حجمها به کار گرفته شده است، متفاوت می‌باشد. برای قانون جمع فشارها

$$Z_m = \sum (x_i Z_i)_{T,v} \quad (7-78)$$

در حالی که برای قانون جمع حجمها

$$Z_m = \sum (x_i Z_i)_{T,p} \quad (7-79)$$

برای رفتار دقیق گاز ایده آل  $Z_i = 1$  و همان طور که اکنون می‌دانیم دو قانون مورد نظر معادل هستند. با توجه به این مطلب که در قانون دالتون به علت انجام محاسبات در حجم کل مخلوط از اثرات عکس‌العمل داخلی بین ملکولهای اجزا صرف نظر می‌شود، لذا وجود بعضی خطاها را در استفاده از روابط بالا می‌توان پیش‌بینی کرد. در نتیجه انتظار داریم که این طریق مفیدترین روش در جرم‌های مخصوص پایین گاز باشد. قانون آماگات خطایی را کاملاً در جهت مخالف موجب می‌گردد زیرا اثر عکس‌العمل داخلی نیروی ملکولی را از طریق انجام محاسبات در فشار کل مخلوط مجاز می‌دارد. نتیجتاً وقتی که مخلوط در جرم‌های مخصوص پایین وجود دارد، انتظار داریم که قانون آماگات عکس‌العملهای داخلی ملکولی را بیش از مقدار واقعی به حساب آورد.

علاوه بر قوانین جمع ساده که در بالا ارائه شده رابطه‌های زیادی برای محاسبه مخلوط گازهای

حقیقی به دست آمده است. یک روش ساده بوسیله یکی<sup>۱</sup> [5] ارائه شده که در محدوده وسیعی از دما و فشار دارای خطایی کمتر از ۱۰ درصد است. در روش مذکور مخلوط به عنوان یک ماده شبه خالص<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده و برای تعیین ثابتهای شبه بحرانی آن ابتکارهای تجربی خاصی به کار رفته است. یکی یک تلفیق خطی ساده از خواص بحرانی را به کار می برد به طوری که

$$P_{cm} = \sum x_i P_{ci} \quad (۷-۸۰)$$

$$T_{cm} = \sum x_i T_{ci} \quad (۷-۸۱)$$

که  $P_{cm}$  و  $T_{cm}$  فشار و دمای شبه بحرانی مخلوط هستند. پس از تعیین این ثابتهای شبه بحرانی محاسبه بر اساس نمودارهای ضریب تراکم پذیری عمومی ادامه می یابد.

### مثال ۷-۱۷ مخلوط هوا - بخار آب با فشار زیاد

۵/۰ kg هوای مرطوب اشباع در مخزن صُلبی در  $160^\circ\text{C}$  و ۱ MPa قرار دارد. سرمایش لازم را برای پایین آوردن دما تا  $80^\circ\text{C}$  محاسبه کنید. چقدر بخار در این فرآیند تقطیر می شود؟

**حل:** در این مسأله می توان انتظار داشت که هوا به عنوان یک گاز ایده آل رفتار نماید، در حالی که بخار آب در فشار بالاست و از معادله حالت گاز ایده آل پیروی نمی کند. به هر حال فشار مذکور در مقایسه با فشار بحرانی برای آب آن قدر پایین است که انتظار می رود قانون جمع فشارها به کار آید. فشار بخار برای مخلوط اشباع باید برابر باشد با

$$\begin{aligned} P_v &= P_g \quad \text{در } 160^\circ\text{C} \\ &= 617.8 \text{ kPa} \quad (\text{جدول A-۷M}) \\ v_g &= 0.3071 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

1- Kay

2- Pseudo-pure substance

و فشار هوا برابر است با

$$p_a = p_m - p_v = 1000 - 617.8 = 382.2 \text{ kPa} \quad (55.4 \text{ psia})$$

و حجم مخلوط از رابطه زیر محاسبه می‌گردد

$$V_m = \frac{m_a R_a T}{p_a} = \frac{(0.5)(287.1)(433)}{382.2 \times 10^3} = 0.1626 \text{ m}^3 \quad (5.743 \text{ ft}^3)$$

با در نظر گرفتن نبود عکس‌العمل داخلی بین گازها، جرم بخار در حجم کل مخلوط به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$m_v = \frac{V_m}{v_g} = \frac{0.1626}{0.3071} = 0.529 \text{ kg} \quad (1.167 \text{ lbm})$$

در شرایط  $80^\circ\text{C}$

$$p_g = 47.39 \text{ kPa} \quad v_g = 3.407 \text{ m}^3/\text{kg}$$

برای ظرفی با حجم مشابه، جرم بخار در این شرایط عبارت است از

$$m_v = \frac{0.1626}{3.407} = 0.0477 \text{ kg} \quad (0.105 \text{ lbm})$$

فشار نهایی هوا برای این فرآیند حجم ثابت ممکن است از رابطه زیر محاسبه گردد.

$$p_{a2} = p_{a1} \frac{T_2}{T_1} = \frac{(382.2)(353)}{433} = 311.6 \text{ kPa} \quad (45.19 \text{ psia})$$

و فشار نهایی مخلوط برابر است با

$$p_{m2} = p_{a2} + p_{v2} = 311.6 + 47.39 = 359.0 \text{ kPa} \quad (52.07 \text{ psia})$$

برای فرآیند حجم ثابت، هیچ‌گونه کاری صورت نمی‌گیرد و انتقال حرارت از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$Q = U_2 - U_1 = (U_2 - U_1)_{\text{هوا}} + (U_2 - U_1)_{\text{بخار}} \quad (a)$$

تغییر در انرژی داخلی را می‌توان برای هوا و بخار به طور جداگانه تعیین کرد. برای هوا

$$U_2 - U_1 = mc_v(T_2 - T_1) = (0.5)(0.718)(80 - 160) \\ = - 28.72 \text{ kJ} \quad (- 27.22 \text{ Btu})$$

انرژی داخلی برای بخار آب از جداول بخار آب به دست می آید.

$$u_{v_1} = 2568.4 \text{ kJ/kg} \quad (1104.2 \text{ Btu/lbm}) \quad \text{بخار اشباع در } 160^\circ\text{C}$$

جرم آب تقطیر شده برابر است با

$$m_w = m_{v_1} - m_{v_2} = 0.529 - 0.0477 = 0.4813 \text{ kg} \quad (b)$$

انرژی داخلی نهایی بخار و مایع عبارت است از

$$u_{v_2} = 2482.2 \text{ kJ/kg} \quad (1067 \text{ Btu/lbm}) \quad \text{بخار اشباع در } 80^\circ\text{C}$$

$$u_{w_2} = 334.86 \text{ kJ/kg} \quad (144 \text{ Btu/lbm}) \quad \text{مایع اشباع در } 80^\circ\text{C}$$

تغییر کل در انرژی داخلی آب برابر است با

$$U_2 - U_1 = m_{v_2} u_{v_2} + m_{w_2} u_{w_2} - m_{v_1} u_{v_1} \quad (c) \\ = (0.0447)(2482.2) + (0.4813)(334.86) - (0.529)(2568.4) \\ = - 1079.1 \text{ kJ} \quad (- 1023 \text{ Btu})$$

با جمع تغییرات در انرژی داخلی برای هوا و بخار آب با یکدیگر در معادله (a) انتقال حرارت به صورت زیر حاصل می شود.

$$Q = - 28.72 - 1079.1 = - 1107.8 \text{ kJ} \quad (- 1050 \text{ Btu})$$

علامت منفی بدین معنی است که در طی فرآیند سرمایش حرارت از سیستم دفع گردیده است.

این مطلب جالب توجه است که اگر به جای قانون جمع فشارها، قانون جمع حجم ها را به کار می بردیم، چه تغییراتی در محاسبات رخ می داد. محاسبه حجم هوا در دما و فشار مخلوط مسأله ساده ای است:



$$V_a = \frac{m_a R_a T}{p} = \frac{(0.5)(287.1)(433)}{1 \times 10^6} = 0.06216 \text{ m}^3 \quad (2.195 \text{ ft}^3)$$

البته اگر حجم آب در ۱ MPa و ۱۶۰°C محاسبه گردد با حالت مایع متراکم شده مواجه هستیم که در این مسئله بی معنی است. لذا همان طور که قبلاً بحث گردید، استفاده از قانون جمع حجمها در فشارهای پایین ممکن است به خطاهای اساسی منجر گردد.

### مثال ۷-۱۸ مقایسه روشهای گوناگون محاسبه

مخلوطی که شامل ۱ پوند مول است، از اجزای مولی مساوی  $\text{CO}_2$  و  $\text{N}_2$  تشکیل شده که در ۱۰۰°F در ظرفی به حجم ۱/۵ ft<sup>3</sup> قرار دارد. فشار کل مخلوط را با استفاده از (الف) قانون گاز ایده آل، (ب) قانون جمع فشارها و نمودارهای ضریب تراکم پذیری، (ج) قانون جمع حجمها و نمودارهای ضریب تراکم پذیری عمومی و (د) روش شبه بحرانی کی، محاسبه نمایید.

**حل:** یک مول از مخلوط کل را داریم لذا:

$$x_{\text{N}_2} = 0.5 \quad \text{و} \quad x_{\text{CO}_2} = 0.5$$

$$n_m = 1 \text{ lbm.mol} \quad \text{و} \quad V_m = 1.5 \text{ ft}^3, \quad T_m = 100^\circ\text{F} = 560^\circ\text{R} \quad \text{همچنین}$$

(الف) برای رفتار گاز ایده آل فشار کل فوراً از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$p_m = \frac{n_m R T_m}{V_m} = \frac{(1)(1545)(560)}{(1.5)(144)} = 4005 \text{ psia}$$

(ب) خواص بحرانی برای  $\text{N}_2$  و  $\text{CO}_2$  از جدول ۶-۲ به دست می آید.

$$T_{c,\text{N}_2} = 277^\circ\text{R} \quad T_{c,\text{CO}_2} = 548^\circ\text{R}$$

$$p_{c,\text{N}_2} = 33.5 \text{ atm} \quad p_{c,\text{CO}_2} = 72.9 \text{ atm}$$

برای قانون جمع فشارها باید فشار هر کدام از اجزا را در دما و حجم کل محاسبه کنیم. چون از هر کدام از

اجزا به اندازه ۵ / ۰ مول داریم لذا حجم مخصوص مولی هر کدام برابر است با

$$\bar{v} = \frac{V_m}{n} = \frac{1.5}{0.5} = 3 \text{ ft}^3/\text{lbm mol}$$

بدین ترتیب حجم شبه کاهش یافته<sup>۱</sup> برای هر کدام از اجزا عبارت است از

$$\bar{v}'_r = \frac{\bar{v}}{\Re T_c / p_c}$$

$$\bar{v}'_{r, \text{CO}_2} = \frac{3}{(1545)(548)/(72.9)(14.7)(144)} = 0.547$$

$$\bar{v}'_{r, \text{N}_2} = \frac{3}{(1545)(227)/(33.5)(14.7)(144)} = 0.607$$

و دماهای کاهش یافته عبارت است از

$$T_{r, \text{CO}_2} = \frac{560}{548} = 1.022$$

$$T_{r, \text{N}_2} = \frac{560}{227} = 2.467$$

برای به دست آوردن فشارهای کاهش یافته می توان به نمودارهای ضریب تراکم پذیری عمومی فصل ۶ مراجعه نمود.

$$p_{r, \text{CO}_2} = 1 \quad p_{r, \text{N}_2} = 4.25$$

بنابراین فشارهایی که در قانون جمع فشارها به کار خواهد رفت عبارت است از:

$$p_{\text{CO}_2} = (1.0)(72.9) = 72.9 \text{ atm} = 1071 \text{ psia}$$

$$p_{\text{N}_2} = (4.25)(33.5) = 142.4 \text{ atm} = 2092 \text{ psia}$$

سپس فشار کل مخلوط برابر است با

$$p_m = p_{\text{N}_2} + p_{\text{CO}_2} = 2092 + 1071 = 3163 \text{ psia}$$

این مقدار اساساً کمتر از مقدار پیش‌بینی شده در قانون گاز ایده‌آل است.

(ج) برای به‌کار گرفتن قانون جمع حجمها یک روش تکراری لازم است، زیرا فشار کل مخلوط را برای تعیین حجم‌ها نداریم. ساده‌ترین طریقه برای ادامه، فرض نمودن مقداری برای فشار کل، محاسبه  $Z_i$ ها برای داخل نمودن در معادله (۷-۷۹)، محاسبه  $Z_m$  و سپس محاسبه فشار کل از روی این مقدار است. این روش را آن قدر تکرار می‌کنیم تا مقادیر فرض شده و محاسبه شده با هم مطابقت یابد. برای این محاسبات مقادیر  $T_r$  همان مقادیر قسمت (ب) است. به‌عنوان اولین حدس می‌توانیم مقدار زیر را در نظر بگیریم:

$$p_m = 3500 \text{ psia} = 238.2 \text{ atm}$$

$$p_{r,\text{CO}_2} = \frac{238.2}{72.9} = 3.27$$

سپس

$$p_{r,\text{N}_2} = \frac{238.2}{33.5} = 7.11$$

با مراجعه به نمودارهای عمومی

$$Z_{\text{CO}_2} = 0.48 \quad Z_{\text{N}_2} = 1.09$$

سپس از معادله (۷-۷۸)

$$Z_m = \sum x_i Z_i = (0.5)(0.48) + (0.5)(1.09) = 0.785$$

و فشار مخلوط از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$p_m = \frac{Z_m n_m R T_m}{V_m} = \frac{(0.785)(1)(1545)(560)}{(1.5)(144)} = 3144 \text{ psia}$$

این مقدار به‌طور اساسی با مقدار فرض شده ۳۵۰۰ psia تفاوت دارد. لذا مقدار زیر را آزمایش می‌کنیم:

$$p_m = 3100 \text{ psia} = 210.9 \text{ atm}$$

$$p_{r,CO_2} = \frac{210.9}{72.9} = 2.89$$

$$p_{r,N_2} = \frac{210.9}{33.5} = 6.3$$

مجدداً با مراجعه به نمودارهای عمومی

$$Z_{CO_2} = 0.43 \quad Z_{N_2} = 1.075$$

و

$$Z_m = \sum x_i Z_i = (0.5)(0.43) + (0.5)(1.075) = 0.753$$

سپس

$$p_m = \frac{Z_m n_m R T_m}{V_m} = \frac{(0.753)(1)(1545)(560)}{(1.5)(144)} = 3014 \text{ psia}$$

با تکرارهای بیشتر تطابق بین مقادیر فرض شده و محاسبه گردیده در فشار زیر به دست خواهد آمد.

$$p_m = 2970 \text{ psia} = 202.1 \text{ atm}$$

این مقدار همچنین با محاسبات گاز ایده آل مغایرت اساسی دارد.

(د) قانون کی به محاسبه خواص شبه بحرانی برای مخلوط با استفاده از معادلات (۷-۸۰) و (۷-۸۱) احتیاج دارد:

$$p_{cm} = \sum x_i p_{ci} = (0.5)(33.5) + (0.5)(72.9) = 53.2 \text{ atm}$$

$$T_{cm} = \sum x_i T_{ci} = (0.5)(227) + (0.5)(548) = 387.5^\circ R$$

سپس خواص کاهش یافته مخلوط برای استفاده از نمودارهای ضریب تراکم پذیری به صورت زیر محاسبه می شود

$$T_{rm} = \frac{T_m}{T_{cm}} = \frac{560}{387.5} = 1.445$$

$$v'_{rm} = \frac{\bar{v}}{R T_{cm} / p_{cm}} = \frac{1.5}{(1545)(387.5) / (53.2)(14.7)(144)}$$

$$\bar{v}'_{rm} = 0.282$$

با مراجعه به شکل ۶-۴ به دست می آوریم

$$Z_m = 0.775$$

بنابراین

$$P_m = \frac{Z_m n_m R T_m}{V_m} = \frac{(0.775)(1)(1545)(560)}{(1.5)(144)} = 3104 \text{ psia} = 211.12 \text{ atm}$$

مقدار حقیقی فقط از طریق داده های تجربی ممکن است به دست آید ولی با در نظر گرفتن نتیجه به دست آمده از قانون کی به عنوان نقطه مرجع می توانیم جوابهای به دست آمده از روشهای مختلف را مقایسه کنیم. در آن صورت انحراف از این مقدار عبارت است از :

قانون گاز ایده آل : ۲۹ درصد بیشتر

قانون جمع فشارها : ۱/۹ درصد بیشتر

قانون جمع حجمها : ۴/۳ درصد کمتر

در این مسأله بخصوص قوانین جمع حجمها و فشارها و قانون کی تقریباً با یکدیگر مطابقت دارند.

### مثال ۷-۱۸ مقایسه روشهای محاسبه

مخلوطی شامل ۱ کیلوگرم مول که از اجزای مولی مساوی  $\text{CO}_2$  و  $\text{N}_2$  تشکیل شده در  $40^\circ\text{C}$  در ظرفی به حجم ۸۵ لیتر قرار دارد. فشار کل مخلوط را با استفاده از (الف) قانون گاز ایده آل، (ب) قانون جمع فشارها و نمودارهای ضریب تراکم پذیری، (ج) قانون جمع حجمها و نمودارهای ضریب تراکم پذیری عمومی و (د) روش شبه بحرانی کی محاسبه نمایید.

**حل :** یک مول از کل مخلوط را داریم لذا

$$x_{\text{N}_2} = 0.5 \quad \text{و} \quad x_{\text{CO}_2} = 0.5$$

همچنین

$$T_m = 40^\circ\text{C} = 313 \text{ K} \quad , \quad V_m = 0.085 \text{ m}^3 \quad , \quad n_m = 1 \text{ kg.mol}$$

(الف) برای رفتار گاز ایده آل فشار کل فوراً از رابطه زیر محاسبه می شود

$$p_m = \frac{n_m \Re T_m}{V_m} = \frac{(1)(8314.41)(313)}{0.085} = 30.62 \text{ MPa}$$

(ب) خواص بحرانی برای  $\text{CO}_2$  و  $\text{N}_2$  از جدول ۲-۶ به دست می آید:

$$\begin{aligned} T_{c,\text{N}_2} &= 126.2 \text{ K} & T_{c,\text{CO}_2} &= 304.2 \text{ K} \\ p_{c,\text{N}_2} &= 3.398 \text{ MPa} & p_{c,\text{CO}_2} &= 7.386 \text{ MPa} \end{aligned}$$

برای قانون جمع فشارها باید فشار هرکدام از اجزا را در دما و حجم کل تعیین کنیم. چون از هرکدام از اجزا به اندازه ۰/۵ مول داریم لذا حجم مخصوص مولی هرکدام برابر است با

$$v = \frac{V_m}{n} = \frac{0.085}{0.5} = 0.170 \text{ m}^3/\text{kg mol}$$

بدین ترتیب حجم مخصوص شبه کاهش یافته برای هرکدام از اجزا عبارت است از

$$\begin{aligned} \bar{v}_r &= \frac{\bar{v}}{\Re T_c / p_c} \\ \bar{v}_{r,\text{CO}_2} &= \frac{0.170}{(8314.41)(304.20)/(7.386 \times 10^6)} = 0.496 \\ \bar{v}_{r,\text{N}_2} &= \frac{0.170}{(8314.41)(126.2)/(3.398 \times 10^6)} = 0.551 \end{aligned}$$

دماهای کاهش یافته عبارت است از :

$$\begin{aligned} T_{r,\text{CO}_2} &= \frac{313}{304.2} = 1.029 \\ T_{r,\text{N}_2} &= \frac{313}{126.2} = 2.48 \end{aligned}$$

برای به دست آوردن فشارهای کاهش یافته می توان به نمودارهای ضریب تراکم پذیری عمومی فصل ۶

مراجعه نمود

$$p_{r,\text{CO}_2} = 1.05 \quad p_{r,\text{N}_2} = 4.78$$

بنابراین فشارهایی که در قانون جمع فشارها به کار خواهد رفت عبارت است از

$$p_{\text{CO}_2} = (1.05)(7.386) = 7.755 \text{ MPa}$$

$$p_{\text{N}_2} = (4.78)(3.398) = 16.24 \text{ MPa}$$

سپس فشار کل مخلوط برابر است با

$$p_m = p_{\text{N}_2} + p_{\text{CO}_2} = 7.755 + 16.24 = 24.0 \text{ MPa}$$

این مقدار به طور اساسی کمتر از مقدار پیش بینی شده به وسیله قانون گاز ایده آل است.

(ج) برای به کار گرفتن قانون جمع حجمها یک روش تکراری لازم است زیرا فشار کل مخلوط را برای تعیین حجمها نداریم. ساده ترین طریقه برای ادامه کار عبارت است از فرض نمودن مقداری برای فشار کل، محاسبه  $Z_i$ ها برای داخل نمودن در معادله (۷-۷۹)، محاسبه  $Z_m$  و سپس محاسبه فشار کل از روی این مقدار. این روش را آن قدر تکرار می کنیم تا مقادیر فرض شده و محاسبه شده با هم تطبیق یابد. برای این محاسبات مقادیر  $T_r$  همان مقادیر قسمت (ب) است. بعنوان اولین حدس می توان مقدار زیر را در نظر گرفت.

$$p_m = 30.0 \text{ MPa}$$

سپس

$$p_{r,\text{CO}_2} = \frac{30}{7.386} = 4.06$$

$$p_{r,\text{N}_2} = \frac{30}{3.398} = 8.83$$

با مراجعه به نمودارهای عمومی

$$Z_{\text{CO}_2} = 0.57 \quad Z_{\text{N}_2} = 1.15$$

سپس از معادله (۷-۷۸)

$$Z_m = \sum x_i Z_i = (0.5)(0.57) + (0.5)(1.15) = 0.860$$

و فشار مخلوط از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$p_m = \frac{Z_m n_m R T_m}{V_m} = \frac{(0.860)(1.0)(8314.41)(313)}{0.085} = 26.33 \text{ MPa}$$

این مقدار به‌طور اساسی با مقدار فرض شده ۳۰ MPa تفاوت دارد لذا مقدار زیر را آزمایش می‌کنیم.

$$p_m = 25.0 \text{ MPa}$$

$$p_{r, \text{CO}_2} = \frac{25}{7.386} = 3.38$$

$$p_{r, \text{N}_2} = \frac{25}{3.398} = 7.36$$

مجدداً با مراجعه به نمودارهای عمومی

$$Z_{\text{CO}_2} = 0.49 \quad Z_{\text{N}_2} = 1.10$$

و

$$Z_m = \sum x_i Z_i = (0.5)(0.49) + (0.5)(1.10) = 0.795$$

سپس

$$p_m = \frac{Z_m n_m R T_m}{V_m} = \frac{(0.795)(1.0)(8314.41)(313)}{0.085} = 24.34 \text{ MPa}$$

با تکرارهای بیشتر تطابق بین مقادیر فرض شده و محاسبه گردیده در فشار زیر به‌دست خواهد آمد

$$p_m = 24.22 \text{ MPa}$$

این مقدار با محاسبات گاز ایده‌آل نیز کاملاً مغایرت دارد.

(د) در قانون کی خواص شبه بحرانی برای مخلوط باید از معادلات (۷-۸۰) و (۷-۸۱) محاسبه شود.

$$p_{cm} = \sum x_i p_{ci} = (0.5)(3.398) + (0.5)(7.386) = 5.392 \text{ MPa}$$



$$T_{cm} = \sum x_i T_{ci} = (0.5)(126.2) + (0.5)(304.2) = 215.2 \text{ K}$$

خواص کاهش یافته مخلوط برای استفاده از نمودارهای ضریب تراکم پذیری به صورت زیر محاسبه می شود:

$$T_{rm} = \frac{T_m}{T_{cm}} = \frac{313}{215.2} = 1.454$$

$$\bar{v}'_{rm} = \frac{\bar{v}}{\bar{v}_{T_{cm}/p_{cm}}} = \frac{0.085}{(8314.41)(215.2)/(5.392 \times 10^6)} = 0.256$$

با مراجعه به شکل ۶-۴ به دست می آوریم

$$Z_m = 0.78$$

بنابراین

$$p_m = \frac{Z_m n_m \bar{v} T_m}{V_m} = \frac{(0.78)(1.0)(8314.41)(313)}{0.085} = 23.88 \text{ MPa}$$

مقدار حقیقی ممکن است فقط از داده های تجربی به دست آید، ولی با در نظر گرفتن نتیجه حاصل شده از قانون کی به عنوان نقطه مرجع می توانیم جوابهای به دست آمده از روشهای مختلف را مقایسه کنیم. در آن صورت انحراف از این مقدار عبارت است از :

قانون گاز ایده آل : ۲۸ درصد بیشتر

قانون جمع فشارها : ۵/۰ درصد بیشتر

قانون جمع حجمها : ۴/۱ درصد بیشتر

در این مسأله خاص قوانین جمع حجمها و فشارها و قانون کی تا حد زیادی با هم تطابق دارند.

### خودآزمایی (سؤالات مروری)

- ۱ - قانون گیس - دالتون را بیان کنید. چرا این قانون برای گازهای ایده آل کاربرد دارد؟
- ۲ - قانون آماگات - لدوک چیست؟
- ۳ - گفته اند که ترکیب یک مخلوط گازی شکل در مبنای حجمی نظیر ترکیب آن در مبنای مولی

است. این مطلب را تشریح کنید.

- ۴ - فشار جزئی چیست؟
- ۵ - نشان دهید که تغییر آنتروپی یک مخلوط در فرآیندی که فشار کل ثابت است فقط تابع دماهای اولیه و نهایی و گرمای ویژه مخلوط است.
- ۶ - عبارات: نقطه شبنم، دماهای حباب خشک و حباب تر، رطوبت نسبی، رطوبت مخصوص و درجه اشباع را تعریف کنید.
- ۷ - چرا برای محاسبات رطوبت سنجی مخلوط، رفتار بخار آب را می توان به صورت یک گاز ایده آل فرض نمود؟
- ۸ - چرا نمودار رطوبت سنجی ضمیمه را نمی توان برای مخلوطهای هوا - بخار آب در ۲۵ psia به کار برد؟
- ۹ - سرمایش تبخیری چیست؟
- ۱۰ - گرین چیست؟
- ۱۱ - دمای مخزن خیس چگونه اندازه گیری می شود؟
- ۱۲ - برج خنک کن چیست و چگونه کار می کند؟
- ۱۳ - قانون جمع فشارها چیست؟ چه موقعی به کار می رود؟
- ۱۴ - قانون جمع حجمها چیست؟ چه موقعی به کار می رود؟
- ۱۵ - قانون کی برای مخلوط گازهای واقعی چیست؟ چه موقعی به کار می رود؟
- ۱۶ - رابطه بین رطوبت مخصوص با نقطه شبنم چیست؟
- ۱۷ - رابطه انتالپی مخلوط و دمای حباب تر برای مخلوط هوا - بخار آب چیست؟
- ۱۸ - چگونه می توان فهمید که چه زمانی رطوبت جریان هوا - بخار آب در فرآیند تهویه مطبوع تقطیر خواهد شد؟
- ۱۹ - منظور از اصطلاح نسبت مولی چیست؟
- ۲۰ - گاز ایده آل چیست؟
- ۲۱ - مخلوط اشباع در مسائل هوا - بخار آب چیست؟

## مسائل (واحد انگلیسی)

۷-۱ مخلوط بخصوصی دارای ترکیب زیر در مبنای جرمی است

$$N_2 = 50\%$$

$$He = 10\%$$

$$CO = 12\%$$

$$O_2 = 15\%$$

$$CO_2 = 13\%$$

گرمادهای ویژه مخلوط و ثابت گاز را محاسبه نمایید. همچنین کسر مولی هر کدام از اجزا را به دست آورید.

۷-۲ مخلوط مسأله ۷-۱ در یک فرآیند برگشت پذیر غیرجریانی از ۱۵ psia و ۷۰°F تا ۵۰ psia و ۲۰۰°F متراکم می شود. کار بر پوند جرم مخلوط و انتقال حرارت را محاسبه کنید.

۷-۳ مخلوطی از ۵۵ درصد دی اکسیدکربن، ۱۵ درصد اکسیژن و ۳۰ درصد متان بر مبنای حجمی در فشار کلی ۳ atm و ۱۱۰°F وجود دارد. نسبت جرمی هر جزء را محاسبه کنید.

۷-۴ مخلوط گازی با ترکیب زیر بر مبنای حجمی است

$$CO_2 = 25\%$$

$$H_2 = 15\%$$

$$CH_4 (\text{متان}) = 35\%$$

$$A (\text{آرگون}) = 25\%$$

مقدار  $c_p$  برای مخلوط را به ازای Btu/lbm.°F محاسبه کنید. مقدار ثابت گاز برای مخلوط را محاسبه کنید.

۷-۵ مخلوطی از ۲۵٪ دی اکسید کربن، ۳۰٪ هلیوم و ۴۵٪ اکسیژن با دبی جریان کلی ۲/۳ lbm/s از ۱۰۰°F و ۱۰ psia تا ۵۰°F طی یک فرآیند جریان دائم خنک می شود.

سرمایش لازم و ثابت گاز مخلوط را محاسبه کنید. نسبتهای داده شده بر اساس مول می باشد.

۷-۶ مخلوط مسأله ۷-۱ به طور آنتروپی ثابت از ۱۵ psia، ۷۰°F تا ۵۰ psia متراکم می شود.

کار انجام شده و تغییر در آنتروپی را برای هر کدام از اجزا محاسبه کنید.

۷-۷ مخلوط خاصی دارای ترکیب زیر در مبنای حجمی است :

$$\text{CO} = 10\%$$

$$\text{CO}_2 = 25\%$$

$$\text{O}_2 = 10\%$$

$$\text{N}_2 = 55\%$$

نسبتهای جرمی هر کدام از اجزا، ثابت گاز، وزن ملکولی ظاهری و گرماهای ویژه را محاسبه نمایید.

۷-۸ ۱ lbm از  $\text{N}_2$  در  $100^\circ\text{F}$  و ۴ psia با ۲ lbm از  $\text{H}_2$  در  $200^\circ\text{F}$  و ۵ psia در یک فرآیند جریان دائم مخلوط شده است. مخلوط در ۳ psia خارج شده و فرآیند به صورت آدیاباتیک است. تغییر در آنتروپی را محاسبه کنید.

۷-۹ جدول زیر را برای مخلوط هوا - بخار آب در فشار اتمسفری کامل نمایید. از هر دو محاسبات تحلیلی و نمودار رطوبت سنجی استفاده کنید.

$T_{\text{DB}}, ^\circ\text{F}$	$T_{\text{WB}}, ^\circ\text{F}$	درصد، $\phi$	نقطه شبنم، $^\circ\text{F}$	$p_v$
۱۰۰		۳۰		
۸۰	۶۰			
		۵۰	۵۵	
	۸۰		۶۰	
۹۰			۶۰	
	۷۰	۴۰		

۷-۱۰ سؤال ۷-۹ را برای یک مخلوط هوا-بخار آب در فشار کل ۳۰ psia تکرار کنید.

۷-۱۱ فشار جزئی بخار آب در یک مخلوط رطوبت سنجی مشخصی برابر ۰/۳ psia و فشار کل مخلوط ۱۴/۶۹۶ psia است. رطوبت نسبی برای دمای حباب خشک  $80^\circ\text{F}$ ،

$90^{\circ}\text{F}$  و  $100^{\circ}\text{F}$  محاسبه کنید.

۷-۱۲ مخزن صُلبی حاوی ۱ lbm هیدروژن در  $200\text{ psia}$  و  $50^{\circ}\text{F}$  است. شیری مخزن را به یک

خط لوله حاوی نیتروژن در فشار بالا و در  $150^{\circ}\text{F}$  متصل می‌کند. نیتروژن به قدر کافی وارد

مخزن می‌شود تا فشار کل مخزن به  $400\text{ psia}$  برسد. فرآیند به صورت آدیاباتیک است.

دمای نهایی مخزن، جرم نیتروژن افزوده شده و تغییر در آنتروپی را محاسبه کنید.

۷-۱۳ مسأله ۷-۱۲ را برای فرآیند پُرشدن مخزن به طور آهسته اگر دمای گاز موجود در آن در

$50^{\circ}\text{F}$  ثابت نگهداشته شود، تکرار نمایید.

۷-۱۴ دو مخزن هر کدام به حجم  $1\text{ ft}^3$  به وسیله یک لوله و شیر به یکدیگر مربوط شده‌اند. یکی از

مخازن با  $N_2$  در  $15\text{ psia}$  و  $100^{\circ}\text{F}$  و دیگری با آرگون در  $100^{\circ}\text{F}$  پُر شده است. شیر

باز شده و گازها به طور آدیاباتیک با یکدیگر مخلوط گردیده‌اند. تغییر در آنتروپی را

محاسبه کنید اگر فشار اولیه آرگون (الف)  $15\text{ psia}$  و (ب)  $30\text{ psia}$  باشد.

۷-۱۵  $15000\text{ ft}^3/\text{min}$  هوا در  $1\text{ atm}$ ،  $90^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۷۰٪ تا دمای  $25^{\circ}\text{F}$  طی

فرآیند جریان دائم خنک می‌شود. سرمایش لازم را محاسبه کنید.

۷-۱۶  $1300\text{ ft}^3/\text{min}$  هوا در  $1\text{ atm}$ ،  $40^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۳۰٪ تا دمای  $90^{\circ}\text{F}$  طی فرآیند

جریان دائم حرارت می‌یابد. حین فرآیند گرمایش آن قدر آب  $60^{\circ}\text{F}$  اضافه می‌شود تا

رطوبت نسبی در شرایط خروجی  $90^{\circ}\text{F}$  به ۴۰٪ برسد. مقدار حرارت اضافه شده را

محاسبه کنید.

۷-۱۷  $1000\text{ ft}^3/\text{min}$  هوای محیط در  $40^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۳۰٪ به یک گرمکن رطوبت

زنی جریان می‌یابد، آب  $70^{\circ}\text{F}$  به داخل مخلوط پاشیده شده حرارت کافی اضافه می‌شود تا

شرایط خروجی  $90^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۶۰٪ تولید بنماید. تغییر آنتروپی جریان

(آنتروپی خروجی منهای آنتروپی ورودی) را محاسبه کنید. اگر به فرضیاتی نیاز می‌باشد

به طور واضح آنها را مشخص نمایید.

۷-۱۸ خانه‌ای دارای بار گرمایش  $60000\text{ Btu/h}$  در تابستان می‌باشد. شرایط هوای اطاق  $75^{\circ}\text{F}$

و ۶۰٪ رطوبت نسبی می‌باشد و هوا با عبور از روی کویل‌های خنک کننده تا  $50^{\circ}\text{F}$  خنک

می‌شود. فرض کنید که هوا بار حرارتی را هنگامی که در خانه باشد کسب کند. دبی حجمی

- هوایی را که باید به اتاق داده شود و همچنین مقدار آب خارج شده را محاسبه کنید.
- ۷-۱۹ اتاقهای مخصوص پرستاری از بچه‌های شیرخوار غالباً تحت شرایط هوای فوق اشباع هستند. فرض کنید که هوا از طریق سیستم گرمایشی منظمی در  $80^{\circ}\text{F}$  با رطوبت نسبی ۴۰ درصد در دسترس باشد. شدت جریان هوا برای این اتاق برابر  $1200 \text{ ft}^3/\text{min}$  می‌باشد. برای ایجاد رطوبت مؤثر ۱۰۵ درصد در  $75^{\circ}\text{F}$  چه مقدار آب در ساعت باید به صورت قطرات ریز به هوا افزوده گردد؟ چه مقدار حرارت اضافی باید تأمین شود؟
- ۷-۲۰ برای اطمینان از دقت عمل وسائل یک آزمایشگاه باید اتاق آن در شرایط رطوبت کم نگه داشته شود. از یک فرآیند تهویه مطبوع سرمایش با بازگرم برای این منظور استفاده می‌گردد. هوای ورودی در  $90^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی آن ۵۰ درصد است و در  $65^{\circ}\text{F}$  با رطوبت نسبی ۲۰ درصد وارد اتاق می‌شود. مقدار هوای مورد نیاز  $1000 \text{ ft}^3/\text{min}$  است. کل سرمایش و گرمایش لازم را محاسبه کنید.
- ۷-۲۱  $1400 \text{ ft}^3/\text{min}$  هوا در فشار محیط و  $30^{\circ}\text{F}$  و با رطوبت نسبی ۶۰٪ تا  $90^{\circ}\text{F}$  حرارت می‌یابد. بخار آب در  $20 \text{ psia}$  و رطوبت ۱۵٪ آن قدر اضافه می‌شود تا رطوبت نسبی هوا به ۸۰٪ برسد. گرمایش لازم را محاسبه کنید.
- ۷-۲۲  $1350 \text{ ft}^3/\text{min}$  هوا در  $90^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۴۵٪ با  $400 \text{ ft}^3/\text{min}$  هوا در  $40^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۷۰٪ طی یک فرآیند آدیاباتیک جریان دائم در فشار محیط مخلوط می‌شوند. دما و رطوبت خروجی را محاسبه کنید.
- ۷-۲۳ یک سیستم گرمایشی در شمال آمریکا برای گرم نمودن هوای خارج در  $10^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۱۰۰ در صد تا  $80^{\circ}\text{F}$  طراحی شده است. محاسبه کنید حرارتی را که باید به ازای هر پوند جرم هوا تأمین گردد. رطوبت نسبی نهایی مخلوط چقدر است؟
- ۷-۲۴ سیستم گرمایشی مسأله ۷-۲۳ به گونه‌ای اصلاح گردیده که رطوبت نهایی مخلوط ۵۰ درصد خواهد بود. برای این منظور مقداری بخار در  $20 \text{ psia}$  و کیفیت ۸۰ درصد با هوا در طی فرآیند گرمایش، مخلوط می‌شود. چقدر بخار به ازای هر پوند جرم هوا باید تأمین گردد و نیازهای گرمایشی در این شرایط جدید چقدر است؟
- ۷-۲۵ فرآیند مسأله ۷-۲۴ با پاشیدن آب مایع با دمای  $180^{\circ}\text{F}$  در هوای گرم صورت می‌گیرد.

- ۷-۲۶ چه مقدار آب به ازای هر پوند جرم هوا لازم است و نیازهای گرمایشی کل چقدر است؟ یک سیستم سرمایشی کوچک فقط برای رطوبت زدایی طراحی شده است. سیستم مذکور برای دفع ۱ گالن رطوبت در ساعت از هوای  $80^{\circ}\text{F}$  و با رطوبت نسبی ۸۰٪ طرح ریزی شده است. سیستم مذکور چه جریان هوایی را باید جابه‌جا کند و ظرفیت سرمایشی آن چقدر باید باشد؟ (توجه: چند جواب صحیح برای این مسأله وجود دارد، دو جواب مناسب را مشخص کنید).
- ۷-۲۷ یک کولر تبخیری جهت کار در یک هوای کویری که  $T_{\text{DB}} = 110^{\circ}\text{F}$ ،  $\phi = 10\%$  برای تهیه  $5000 \text{ ft}^3/\text{min}$  هوا به کار می‌رود. اگر هوا، واحد مذکور را با رطوبت نسبی ۹۰٪ ترک نماید، محاسبه کنید مقدار آبی را که باید برای دستگاه تأمین نمود.
- ۷-۲۸ مخلوط هوا-بخار آبی در فشار کل ۲۵ psia در  $30^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۹۰٪ می‌باشد. برای دبی حجمی  $1300 \text{ ft}^3/\text{min}$  مقدار گرمایش لازم را جهت افزایش دما به  $100^{\circ}\text{F}$  محاسبه کنید.
- ۷-۲۹ در دنور (Denver) کلرادو، فشار محیط استاندارد تنها ۸۵٪ فشار در سطح دریا است. برای مخلوط هوا-بخار آبی در  $95^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۴۰٪، درصد تغییر انتالپی مخلوط از مقدار آن در سطح دریا را محاسبه کنید. همچنین نقطه شبنم مخلوط را در شرایط دنور محاسبه نمایید.
- ۷-۳۰  $2000 \text{ ft}^3/\text{min}$  هوا در ۱ atm،  $30^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۸۰٪ با پاشیدن آب داغ  $200^{\circ}\text{F}$  حرارت داده می‌شود به طوری که شرایط نهایی به  $100^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۶۰٪ می‌رسد. مقدار گرمایش لازم را محاسبه کنید.
- ۷-۳۱ اتاق کار یک واحد نیاز به سیستم تهویه مطبوع با ظرفیت ۱۰۰ تن ( $1 \text{ ton} = 12000 \text{ Btu/h}$ ) دارد. فضای داخل در  $78^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۵۰٪ باقی می‌ماند. هوا همچنان که از روی کویل‌های خنک کننده عبور می‌کند تا  $52^{\circ}\text{F}$  خنک می‌شود. هوا پس از عبور از کویل‌های خنک کننده، بار گرمایش اتاق کار را دریافت می‌کند. مقدار جریان آب خارج شده از هوا و دبی حجمی لازم بر حسب  $\text{ft}^3/\text{min}$  را که می‌باید به اتاق داده شود محاسبه کنید.

- ۷-۳۲ یک مخلوط هوا - بخار آب به طور آنتروپی ثابت از  $100^{\circ}\text{F}$ ،  $14/7 \text{ psia}$  و رطوبت نسبی  $50\%$  تا  $100 \text{ psia}$  متراکم می شود. دما را در انتهای عمل تراکم محاسبه نمایید. اگر مخلوط پس از انجام عمل تراکم تا دمای (الف)  $80^{\circ}\text{F}$  و (ب)  $100^{\circ}\text{F}$  در فشار ثابت سرد گردد، مقدار رطوبت خارج شده را محاسبه کنید.
- ۷-۳۳ لوله آب سردی در  $55^{\circ}\text{F}$  از میان اطاقی با هوای اتمسفری  $80^{\circ}\text{F}$  عبور می کند. حداکثر رطوبت نسبی هوا چقدر باشد تا میعان بر روی لوله صورت نگیرد؟
- ۷-۳۴ وقتی گوشت و سایر فرآورده های غذایی در انبارهای سرد به طور مستقیم در معرض هوا با دمای خیلی پایین قرار گیرد، خشک می شود. بر اساس اطلاعات موجود در این فصل پدیده مذکور را تفسیر کنید. برای محاسبات، دمای هوا را صفر درجه فارنهایت فرض کنید.
- ۷-۳۵ مقدار  $1000 \text{ ft}^3/\text{min}$  هوای  $110^{\circ}\text{F}$  با رطوبت نسبی  $15\%$  در صد به طور آدیاباتیک با  $500 \text{ ft}^3/\text{min}$  هوای  $65^{\circ}\text{F}$  با رطوبت نسبی  $90\%$  در صد مخلوط گردیده است. دمای نهایی و رطوبت نهایی را محاسبه کنید.
- ۷-۳۶ هوای خروجی از کولر تبخیری مثال ۷-۲۷ با  $1000 \text{ ft}^3/\text{min}$  هوای خارج مخلوط می گردد. دما و رطوبت حاصله را به دست آورید.
- ۷-۳۷  $1000 \text{ ft}^3/\text{min}$  هوای  $100^{\circ}\text{F}$  با رطوبت نسبی  $80\%$  در صد با جریان هوایی در دمای  $55^{\circ}\text{F}$  مخلوط می گردد. برای تولید مخلوطی با رطوبت نسبی  $100\%$  در صد چه شدت جریانی از هوای سردتر با چه رطوبتی لازم است؟ دمای نهایی مخلوط چقدر است؟
- ۷-۳۸  $4 \text{ lbm}$  هوا در  $25 \text{ psia}$ ،  $40^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی  $80\%$  در صد با  $8 \text{ lbm}$  هوا در  $25 \text{ psia}$ ،  $100^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی  $20\%$  در صد در یک فرآیند آدیاباتیک جریان دائم مخلوط می گردد. دما و رطوبت نهایی مخلوط را محاسبه کنید در صورتی که فشار نهایی (الف)  $25 \text{ psia}$  و (ب)  $20 \text{ psia}$  باشد.
- ۷-۳۹ یک روش رطوبت زنی ارزان برای سیستمهای گرمایشی منازل از طریق پودر نمودن آب مایع و پاشیدن مستقیم آن در کانال هواست. دستگاه مخصوصی برای جریانهای هوای زیر طراحی شده است:
- هوای وارده به قسمت گرم کن - رطوبت زن:  $300 \text{ ft}^3/\text{min}$  در  $20^{\circ}\text{F}$ ،  $80\% \phi$



به اضافه  $1200 \text{ ft}^3/\text{min}$  در  $60^\circ\text{F}$ ،  $\phi = 80\%$

به اضافه آب مایع در  $60^\circ\text{F}$

هوای خارج شده از قسمت گرم کن - رطوبت زن:  $T_{DB} = 85^\circ\text{F}$ ،  $\phi = 35\%$   
مقدار گرمایش لازم و مقدار آب مایعی را که باید برای واحد رطوبت زن تأمین کرد،  
محاسبه کنید.

۷-۴۰ ساختمان کوچکی در آب و هوای کویری احتیاج به سرمایشی برابر با  $120000 \text{ Btu/h}$  دارد که برای انجام این کار یک کولر تبخیری طراحی می‌گردد. هوای خارج در  $110^\circ\text{F}$  و  $\phi = 5\%$  در دسترس است. چه شدت جریانی از هوای ورودی لازم است و چه مقدار آب برای کولر باید تأمین گردد؟

۷-۴۱ در لانگ آیلند (Long Island) نیویورک در تابستان هوا کاملاً شرجی است. در یک روز تابستان دمای خارج  $92^\circ\text{F}$  و رطوبت نسبی  $50\%$  می‌باشد. هوای خشک تر در  $80^\circ\text{F}$  و رطوبت نسبی  $20\%$  با عمل سرمایش - و - بازگرم باید تولید شود. اگر  $5500 \text{ ft}^3/\text{min}$  هوا در شرایط خشک لازم باشد، سرمایش و گرمایش لازم را محاسبه کنید.

۷-۴۲ رطوبت زنی، طوری طراحی شده است که هوای محیط را در  $20^\circ\text{F}$  و رطوبت نسبی  $50\%$  گرفته و آب  $55^\circ\text{F}$  را به آن می‌باشد. حرارت کافی نیز به آن اضافه شده تا جریان هوای خروجی از رطوبت زن در  $80^\circ\text{F}$  و رطوبت نسبی  $40\%$  باشد. دبی جریان خروجی  $1700 \text{ ft}^3/\text{min}$  است. گرمایش لازم و مقدار آب لازم در هر ساعت را محاسبه کنید.

۷-۴۳ رطوبت گیری زیادی با سرمایش  $2500 \text{ ft}^3/\text{min}$  هوا در  $80^\circ\text{F}$  و رطوبت نسبی  $80\%$  به دمای پایین  $10^\circ\text{F}$  - صورت می‌گیرد. سرمایش لازم و مقدار رطوبت خارج شده در هر ساعت را محاسبه کنید.

۷-۴۴ یکی از روشهای تولید هوای خیلی خشک، سرد کردن آن تا دماهای خیلی پایین و سپس گرم نمودن آن تا دمای مورد نظر است. فرض نمایید که مخلوطی در  $1 \text{ atm}$ ،  $75^\circ\text{F}$  با رطوبت نسبی  $80\%$  درصد در دسترس باشد. اگر مخلوط تا  $30^\circ\text{F}$  - سرد شده و سپس تا  $75^\circ\text{F}$  باز گرم گردد، رطوبت نسبی نهایی چقدر خواهد بود؟ برای شدت جریانی از مخلوط اولیه به مقدار  $1700 \text{ ft}^3/\text{min}$  چقدر سرمایش و گرمایش لازم است؟

- ۷-۴۵ در مسأله ۷-۴۴ اگر مقدار یخ یا برفک انبار شده در قسمت سرد کننده به  $50 \text{ lbm}$  برسد یخها باید ذوب شود. با فرض این که آب خارج شده از هوا در دماهای بالای  $35^\circ\text{F}$  قادر به خروج آزادانه باشد، زمان لازم برای انباشت  $50 \text{ lbm}$  یخ را محاسبه کنید. محاسبات را برای حالتی که هیچ آبی خارج نمی شود تکرار کنید.
- ۷-۴۶ یک تبخیر کننده مخصوص، برای استفاده بچه های کوچک در هوای سرد و خشک به صورتی طراحی شده که یک قسمت از هوای فوق اشباع در  $60^\circ\text{F}$  با رطوبت نسبی مؤثر ۱۱۰ درصد را با دو قسمت هوای اطاق در  $75^\circ\text{F}$  با رطوبت نسبی ۱۵ درصد مخلوط نماید. اگر ۱۰ درصد رطوبت اضافی در جریان فوق اشباع به شکل قطرات کوچک مایع باشد، رطوبت و دمای جریان مخلوط شده خروجی چقدر است؟ فرض کنید که مبنای قسمت های گفته شده، هوای خشک است.
- ۷-۴۷ مخلوط هوا - بخار آبی در فشار کلی  $23/5 \text{ psia}$  دارای رطوبت نسبی ۸۰٪ و دمای جباب خشک  $100^\circ\text{F}$  می باشد. مقدار سرمایش لازم جهت سرد کردن  $1100 \text{ ft}^3/\text{min}$  این مخلوط را به  $50^\circ\text{F}$  محاسبه کنید.
- ۷-۴۸ یک واحد مسکونی به سطح  $3500 \text{ ft}^2$  و ارتفاع  $8 \text{ ft}$  است. چه مقدار بخار آب در خانه در شرایط  $75^\circ\text{F}$  و ۵۰ درصد رطوبت نسبی موجود است؟
- ۷-۴۹ برای مخلوطی متشکل از  $1 \text{ kg}$  هلیوم و  $1 \text{ kg}$  نیتروژن گرماهای ویژه جرمی را محاسبه کنید. اگر چنین مخلوطی در یک سیستم جریان-دائم از  $1 \text{ atm}$ ،  $20^\circ\text{C}$  تا  $5 \text{ atm}$ ،  $150^\circ\text{C}$  گرم شده و متراکم گردد، گرمای افزوده شده، کار محوری ورودی و تغییر در آنتروپی مخلوط را محاسبه کنید. مسأله را برای عمل گرمایش و تراکم در یک سیستم بسته تکرار نمایید.
- ۷-۵۰ مسأله ۷-۴۹ را برای مقادیر قبلی هلیوم و نیتروژن تکرار کنید در صورتی که مقدار کافی بخار آب افزوده گردد آنچنان که رطوبت نسبی اولیه برابر ۲۰ درصد باشد.
- ۷-۵۱ یک برج خنک کن بزرگ برای نیروگاهی، براساس مفهوم سرمایش تبخیری طراحی شده است. در واحدی از نیروگاه، حرارتی که باید در برج خنک کن جذب گردد،

۱۰۰۰ MW است و این عمل با پاشیدن آب  $80^{\circ}\text{F}$  در هوای  $90^{\circ}\text{F}$  با  $\phi = 30\%$  انجام می‌شود. در طراحی برج مذکور فرض می‌گردد که هوا در حالت اشباع و در  $70^{\circ}\text{F}$  خارج می‌شود. برای انجام چنین سرمایشی، چقدر آب و چقدر هوا لازم است؟

۷-۵۲ برای مخلوطهای هوا-بخار آب در ۱ atm و (الف)  $T_{\text{WB}} = 60^{\circ}\text{F}$ ،  $T_{\text{DB}} = 100^{\circ}\text{F}$

(ب)  $T_{\text{WB}} = 60^{\circ}\text{F}$ ،  $T_{\text{DB}} = 70^{\circ}\text{F}$ ، انتالیهای مخلوط را محاسبه کنید. اگر فرض شود که انتالیی مخلوط فقط تابعی از دمای حباب تر است، چند درصد خطا حاصل می‌شود؟

۷-۵۳ برای سرد نمودن هوای  $90^{\circ}\text{F}$  با رطوبت نسبی ۶۰ درصد، تا  $30^{\circ}\text{F}$  - در یک فرآیند فشار

ثابت در (الف) ۱ atm و (ب) ۲ atm، چقدر سرمایش لازم است؟ در این فرآیند چقدر رطوبت خارج می‌گردد؟

۷-۵۴  $1500 \text{ ft}^3/\text{min}$  هوا در ۱ atm،  $40^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۸۰٪ تا دمای  $100^{\circ}\text{F}$  حرارت

داده می‌شود در حالی که به مقدار کافی آب  $60^{\circ}\text{F}$  به آن اضافه شده تا رطوبت نسبی به ۵۰ درصد برسد. مقدار گرمایش و آبی را که باید اضافه شود، محاسبه کنید.

۷-۵۵ در یک کارخانه مهمات سازی هوای خیلی خشک به وسیله سرمایش  $3500 \text{ ft}^3/\text{min}$  هوای

خارج در  $85^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۷۰ درصد تا دمای  $5^{\circ}\text{F}$  - و باز گرم کردن آن تولید می‌شود. مقدار سرمایش لازم را بر حسب تُن محاسبه کنید. از هیچ کدام از جملات صرف نظر نکنید.

۷-۵۶ کولر تبخیری جهت روزهای داغ دالاس در تگزاس به کار می‌رود. اگر هوای خارج

$110^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۲۰ درصد باشد، کمترین دمای دسترس پذیر چقدر است؟ اگر دبی حجمی خروجی از چنین کولری  $10000 \text{ ft}^3/\text{min}$  باشد چقدر آب برای کمترین دما در خروجی لازم است؟

۷-۵۷ هوای خارج با نرخ  $2500 \text{ ft}^3/\text{min}$  و در  $40^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد با

$5000 \text{ ft}^3/\text{min}$  هوای داخل در  $60^{\circ}\text{F}$  و رطوبت نسبی ۵۰ درصد مخلوط می‌شود. در حین فرآیند مخلوط شدن آن قدر حرارت اضافه می‌شود تا دمای هوای خروجی به  $80^{\circ}\text{F}$  برسد. مقدار حرارت اضافه شده و رطوبت نسبی خروجی را محاسبه کنید.

۷-۵۸ مخلوطی به نسبت یک قسمت نیتروژن و دو قسمت دی‌اکسید کربن در مبنای جرمی حاوی

مقدار کافی بخار آب جهت ایجاد ۵۰ درصد رطوبت نسبی در  $100^{\circ}\text{F}$  و فشار کل ۱ atm است. برای سرد نمودن ۱ lbm مخلوط تا  $40^{\circ}\text{F}$  در فشار ثابت چه مقدار سرمایش لازم است؟ چقدر آب در این فرآیند دفع شده است؟

۷-۵۹ مخلوطی شامل ۱ lbm اکسیژن و ۱ lbm هلیوم دارای مقدار کافی بخار آب برای تولید ۱۰ درصد رطوبت نسبی در  $105^{\circ}\text{F}$  می باشد. مخلوط مذکور در یک فرآیند اشباع آدیاباتیک سرد می گردد. حداقل دمایی که بدین طریق می توان بدان دست یافت چقدر است و چه مقدار آب به ازای هر پوند جرم مخلوط اولیه باید تأمین گردد؟ گرمای ویژه جرمی مخلوط قبل و بعد از فرآیند اشباع چقدر است؟

۷-۶۰ مخلوطی از متان ( $\text{CH}_4$ ) و هوا که دارای نسبتهای جرمی یک قسمت متان به ۱۵ قسمت هوای خشک است، تولید می گردد. عمل اختلاط در یک فرآیند جریان دائم صورت گرفته که متان و هوا هر دو در  $80^{\circ}\text{F}$  وارد می شوند. هوای ورودی دارای  $\phi = 70\%$  بوده و گازها در طی فرآیند اختلاط گرم می شوند تا دمای خروجی  $200^{\circ}\text{F}$  را ایجاد کنند. فرآیند مذکور در فشار ثابت ۱ atm صورت می گیرد. برای دبی حجمی ورودی  $100 \text{ ft}^3/\text{h}$  از متان چه مقدار گرمایش باید تأمین گردد و رطوبت نسبی مخلوط خروجی چقدر است؟

۷-۶۱ مخزنی به حجم  $20 \text{ ft}^3$  حاوی مخلوطی از هوا-بخار آب در  $14/7 \text{ psia}$ ،  $80^{\circ}\text{F}$  و  $\phi = 50\%$  است. از خط لوله هوای خشک تحت فشار بالا در  $120^{\circ}\text{F}$  و  $70 \text{ psia}$  برای پر کردن مخزن با هوای اضافی استفاده شده است. فرآیند پر شدن به آهستگی صورت می گیرد به طوری که دمای داخل مخزن در  $80^{\circ}\text{F}$  ثابت باقی می ماند. برای بالا بردن فشار مخزن تا  $50 \text{ psia}$  چه مقدار هوا باید افزود، رطوبت نسبی در شرایط جدید چقدر خواهد بود و چه مقدار گرما از طریق مخزن در این فرآیند از دست رفته است؟

۷-۶۲ مخلوطی از هوا-بخار آب شامل ۲۵ درصد بخار آب بر مبنای مولی در  $500 \text{ psia}$  و  $800^{\circ}\text{F}$  قرار دارد. حجم مخصوص مخلوط را با استفاده از (الف) قانون گاز ایده آل، (ب) قانون جمع فشارها، (ج) قانون جمع حجمها و (د) قانون شبه بحرانی کی، محاسبه کنید.

- ۷-۶۳ برای گرم کردن مخلوط مسأله ۷-۶۲ تا  $1000^{\circ}\text{F}$  در یک فرآیند فشار- ثابت و جریان - دائم چقدر حرارت به‌ازای هر پوند جرم مخلوط لازم خواهد بود؟
- ۷-۶۴ مخلوطی به‌نسبتهای مولی ۳۰ درصد  $\text{CO}_2$ ، ۱۰ درصد  $\text{CO}$ ، ۴۰ درصد  $\text{N}_2$  و ۲۰ درصد  $\text{CH}_4$  در ظرف صلبی به‌حجم  $5\text{ ft}^3$  در  $4000\text{ psia}$  و  $200^{\circ}\text{F}$  قرار دارد. برای کاهش دما تا  $100^{\circ}\text{F}$  با استفاده از (الف) قانون گاز ایده‌آل و (ب) قانون کی محاسبه کنید حرارتی را که باید از مخلوط گرفته شود.
- ۷-۶۵ اکسیژن در مخزن صلبی به‌حجم  $1\text{ ft}^3$  در  $50\text{ atm}$  و  $100^{\circ}\text{F}$  قرار دارد. نیتروژن از یک خط لوله در  $4000\text{ psia}$  و  $100^{\circ}\text{F}$  به‌آهستگی وارد مخزن می‌شود تا وقتی که نسبتهای مخلوط موجود در مخزن تقریباً مشابه نسبتهای هوا یعنی  $\text{N}_2$  ۷۸٪ و  $\text{O}_2$  ۲۲٪ شود. در طی فرآیند پرشدن برای ثابت نگهداشتن دما در  $100^{\circ}\text{F}$  مخزن به‌طریقی سرد می‌گردد. حرارت گرفته شده از مخزن و جرم نیتروژن افزوده شده را محاسبه کنید. از قانون کی استفاده کنید.
- ۷-۶۶ مخلوطی به‌نسبتهای مولی مساوی از متان ( $\text{CH}_4$ ) و اتان ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) به‌طور برگشت پذیر دما ثابت از  $150^{\circ}\text{F}$  و  $100\text{ psia}$  تا  $700\text{ psia}$  در یک فرآیند جریان دائم متراکم می‌گردد. کار لازم به‌ازای هر پوند جرم مخلوط را محاسبه نمایید.
- ۷-۶۷ مخلوطی به‌نسبتهای مولی ۴۰ درصد آرگون و ۶۰ درصد نیتروژن در یک دستگاه مبدل حرارتی جریان دائم از  $100^{\circ}\text{F}$  - و  $700\text{ psia}$  تا  $200^{\circ}\text{F}$  گرم می‌گردد. به‌علت اصطکاک سیال، فشار در خروجی دستگاه تا  $650\text{ psia}$  افت می‌کند. سرعتهای جریان سیال به‌قدر کافی پایین است تا از انرژیهای جنبشی صرف نظر گردد. محاسبه کنید مقدار گرمایش لازمی را که باید به‌ازای هر پوند جرم مخلوط تأمین گردد.
- ۷-۶۸ مخلوطی به‌نسبتهای مولی مساوی از هوا و بخار آب در یک فرآیند فشار ثابت در  $14/7\text{ psia}$  و  $300^{\circ}\text{F}$  تا  $500^{\circ}\text{F}$  گرم می‌گردد. چه مقدار حرارت به‌ازای هر پوند جرم مخلوط لازم است؟
- ۷-۶۹ اگر مخلوط مسأله ۷-۶۸ در فشار ثابت سرد گردد، دمایی را تخمین بزنید که در آن دما بخار موجود در مخلوط شروع به‌میعان می‌کند.

- ۷-۷۰ مخلوطی از هوا و بخار آب در  $200^\circ\text{F}$  و  $300^\circ\text{F}$  اشباع می‌گردد. سرمایش لازم برای سرد نمودن مخلوط را تا  $150^\circ\text{F}$  در یک فرآیند جریان دائم در فشار ثابت محاسبه کنید.
- ۷-۷۱ با فرض این که هوا مخلوطی از ۷۸ درصد نیتروژن و ۲۲ درصد اکسیژن بر مبنای مولی است، با استفاده از قانون کی ثابتهای بحرانی را محاسبه و با مقادیر جداول مقایسه کنید.
- ۷-۷۲ مقدار  $1 \text{ lbm.mol}$  از مخلوطی شامل ۵۰ درصد  $\text{CO}_2$  و ۵۰ درصد  $\text{CH}_4$  بر مبنای مولی در ظرف صُلبی در  $300^\circ\text{F}$  و  $500 \text{ psia}$  قرار دارد. با استفاده از (الف) قانون گاز ایده آل، (ب) قانون جمع حجمها و (ج) روش شبه بحرانی کی، حجم مخلوط را محاسبه کنید.
- ۷-۷۳ انرژی لازم برای گرم کردن مخلوط مسأله ۷-۷۲ را تا  $500^\circ\text{F}$  در یک فرآیند فشار ثابت جریان دائم با استفاده از (الف) قانون گاز ایده آل و (ب) روش شبه بحرانی محاسبه کنید.
- ۷-۷۴ مخلوطی به نسبت مولی ۶۰ درصد متان ( $\text{CH}_4$ ) و ۴۰ درصد اتان ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) در یک دستگاه جریان دائم از  $150^\circ\text{F}$ ،  $100 \text{ psia}$  تا  $350 \text{ psia}$  متراکم می‌شود. دبی جرمی  $10 \text{ lbm/min}$  است. با فرض برگشت پذیری و آدیاباتیک بودن فرآیند مذکور و با استفاده از (الف) روابط گاز ایده آل و (ب) روش شبه بحرانی، مقدار کار داده شده به سیستم را محاسبه کنید.

### مسائل (آحاد متریک)

- ۷-۱M مخلوط مسأله ۷-۱ از  $100 \text{ kPa}$  و  $295 \text{ K}$  تا  $350 \text{ kPa}$  و  $370 \text{ K}$  طی یک فرآیند برگشت پذیر غیر جریانی متراکم می‌شود. مقدار کار به ازای هر کیلوگرم مخلوط و مقدار انتقال حرارت را محاسبه کنید.
- ۷-۲M مخلوط مسأله ۷-۱ در یک فرآیند آنتروپی ثابت از  $100 \text{ kPa}$  و  $295 \text{ K}$  تا  $350 \text{ kPa}$  متراکم می‌شود. کار انجام یافته و تغییر آنتروپی برای هر جزء را محاسبه کنید.
- ۷-۳M  $1 \text{ kg}$  نیتروژن در  $310 \text{ K}$  و  $28 \text{ kPa}$  با  $2 \text{ kg}$  هیدروژن در  $370 \text{ K}$  و  $35 \text{ kPa}$  طی یک فرآیند جریان دائم مخلوط می‌شود. مخلوط در  $20 \text{ kPa}$  مخزن را ترک می‌کند و فرآیند آدیاباتیک است. تغییر آنتروپی را محاسبه کنید.
- ۷-۴M مخزن صُلبی شامل  $1 \text{ kg}$  هیدروژن در  $1/4 \text{ MPa}$  و  $280 \text{ K}$  می‌باشد. شیری به خط لوله

نیتروژن پرفشاری متصل است و آن قدر نیتروژن وارد می‌شود تا فشار کلی مخزن به  $2/8 \text{ MPa}$  برسد. فرآیند آدیاباتیک است. دمای نهایی در مخزن، مقدار جرم نیتروژن اضافه شده و تغییر آنتروپی را محاسبه کنید.

مسئله ۷-۵M  $7-4M$  را برای فرآیند پُرشدن آهسته و تحت شرایط ثابت ماندن دمای گاز در داخل مخزن در  $280 \text{ K}$  تکرار کنید.

۷-۶M دو مخزن ۲۸ لیتری به وسیله لوله و شیر به هم متصل می‌باشند. یک مخزن با نیتروژن در  $100 \text{ kPa}$  و  $310 \text{ K}$  و دیگری با آرگون در  $310 \text{ K}$  پر شده است. شیر باز می‌شود و دو گاز به طور آدیاباتیکی مخلوط می‌شوند. تغییر آنتروپی را هنگامی که فشار اولیه آرگون (الف)  $100 \text{ kPa}$  و (ب)  $200 \text{ kPa}$  است محاسبه کنید.

۷-۷M جدول زیر را برای مخلوط هوا - بخار آب در فشار اتمسفری کامل نمایید. از هر دو محاسبات تحلیلی و نمودار رطوبت سنجی استفاده کنید.

$p_v$	نقطه شبنم، $^{\circ}\text{C}$	درصد، $\phi$	$T_{WB}$ ، $^{\circ}\text{C}$	$T_{DB}$ ، $^{\circ}\text{C}$
			۳۰	۳۸
			۱۵	۲۷
۱۳		۵۰		
۱۵			۲۷	
۱۵				۳۲
		۴۰	۲۰	

مسئله ۷-۸M  $7-7M$  را برای یک مخلوط هوا-بخار آب در فشار کلی  $200 \text{ kPa}$  تکرار کنید.

۷-۹M مخلوطی با ترکیب زیر در مبنای حجمی می‌باشد: آرگون ۲۰ درصد، نیتروژن ۲۵ درصد، هیدروژن ۴۰ درصد و هلیوم ۱۵ درصد. فشار کلی  $1 \text{ atm}$  است. مقدار  $c_p$  را برای مخلوط محاسبه کنید.

۷-۱۰M  $5 \text{ kg/s}$  آرگون در  $120 \text{ kPa}$  و  $10^{\circ}\text{C}$  با  $1 \text{ kg/s}$  هوا در  $120 \text{ kPa}$  و  $60^{\circ}\text{C}$  طی یک فرآیند جریان آدیاباتیک مخلوط می‌شود. فشار خروجی  $90 \text{ kPa}$  است. تغییر آنتروپی را

محاسبه کنید.

۷-۱۱M  $1 \text{ kg/s}$  هوا در  $20^\circ\text{C}$  و  $1 \text{ atm}$  با  $1/5 \text{ kg/s}$  هلیوم در  $1 \text{ atm}$  و  $50^\circ\text{C}$  طی یک فرآیند آدیاباتیک مخلوط می‌شود. فشار خروجی مخلوط  $90 \text{ kPa}$  است. تغییر آنتروپی را محاسبه کنید.

۷-۱۲M مخلوطی شامل  $10\%$  درصد هلیوم،  $30\%$  درصد  $\text{CO}_2$ ،  $15\%$  درصد آرگون و  $45\%$  درصد نیتروژن بر مبنای جرمی در شرایط  $85 \text{ kPa}$  و  $30^\circ\text{C}$  می‌باشد. ثابت گاز مخلوط را محاسبه کنید.

۷-۱۳M هوا با نرخ  $1/2 \text{ kg/s}$  در  $1 \text{ atm}$  و  $40^\circ\text{C}$  با  $0/85 \text{ kg/s}$  هلیوم در  $1 \text{ atm}$  و  $10^\circ\text{C}$  طی یک وسیله جریان دائم مخلوط می‌شود و فشار تخلیه گازهای مخلوط شدن  $0/9 \text{ atm}$  می‌باشد. تغییر کلی آنتروپی برای این فرآیند را محاسبه کنید.

۷-۱۴M یک سیستم گرمایش در شمال آمریکا برای گرم نمودن هوای خارج در  $25^\circ\text{C}$  - و رطوبت نسبی  $100\%$  درصد تا  $30^\circ\text{C}$  طراحی شده است. محاسبه کنید حرارتی را که باید در این شرایط به ازای هر کیلوگرم هوا تأمین گردد. رطوبت نسبی نهایی مخلوط چقدر است؟

۷-۱۵M سیستم گرمایش مسأله ۷-۱۴ به گونه‌ای اصلاح گردیده که رطوبت نهایی مخلوط  $50\%$  درصد خواهد بود. برای این منظور مقداری بخار در  $140 \text{ kPa}$  و کیفیت  $80\%$  درصد با هوا در طی فرآیند گرمایش مخلوط می‌شود. چقدر بخار به ازای هر کیلوگرم هوا باید تأمین گردد و نیازهای گرمایشی تحت این شرایط جدید چقدر است؟

۷-۱۶M فرآیند مسأله ۷-۱۵ از طریق پاشیدن آب مایع در دمای  $80^\circ\text{C}$  در هوای گرم صورت می‌گیرد. چه مقدار آب به ازای هر کیلوگرم هوا لازم است و نیازهای گرمایشی کل چقدر است؟

۷-۱۷M یک سیستم سرمایشی کوچک فقط برای رطوبت زدایی طراحی شده است. سیستم مذکور برای دفع  $4$  لیتر رطوبت در ساعت از هوای  $27^\circ\text{C}$  و بار رطوبت نسبی  $80\%$  درصد طراحی شده است. سیستم مذکور چه جریان هوایی را باید جابه‌جا کند و ظرفیت سرمایشی آن چقدر باید باشد؟ (توجه: چند جواب صحیح برای این مسأله وجود دارد، دو جواب مناسب را مشخص کنید.)



۷-۱۸M یک جعبه عایق دو محفظه هم اندازه به حجم  $2/0 \text{ m}^3$  دارد که با یک دیوار عایق جدا شده‌اند. یک محفظه حاوی نیتروژن در  $100^\circ\text{C}$  و  $200 \text{ kPa}$  و دیگری حاوی هلیوم در  $100 \text{ kPa}$  و  $100^\circ\text{C}$  است. دیوار جداکننده برداشته شده و دو گاز با هم مخلوط می‌شوند تا به شرایط تعادل برسند. تغییر آنتروپی در نتیجه فرآیند مخلوط شدن را محاسبه کنید.

۷-۱۹M  $1 \text{ kg/s}$  نیتروژن در  $1 \text{ atm}$  و  $400 \text{ K}$  با  $3 \text{ kg/s}$  آرگون در  $1 \text{ atm}$  و  $200 \text{ K}$  طی یک فرآیند آدیاباتیک مخلوط می‌شوند. فشار کلی مخلوط نیز  $1 \text{ atm}$  است. تغییر آنتروپی را محاسبه کنید.

۷-۲۰M در جعبه صُلبی به حجم  $5/6 \text{ m}^3$  در شرایط  $500 \text{ kPa}$  و  $100^\circ\text{C}$  مخلوطی از ۳۲ درصد هلیوم، ۴۰ درصد نیتروژن و ۳۸ درصد هیدروژن بر مبنای مولی وجود دارد. تغییر آنتروپی را محاسبه کنید در صورتی که مخلوط تا  $20^\circ\text{C}$  سرد شود.

۷-۲۱M مخلوطی از ۲۰ درصد  $\text{CO}_2$ ، ۳۰ درصد آرگون، ۲۵ درصد هلیوم و ۲۵ درصد هیدروژن بر مبنای حجمی در فشار ثابت از  $100^\circ\text{C}$  تا  $150^\circ\text{C}$  حرارت داده می‌شود. مقدار حرارت داده شده را برای واحد جرم محاسبه کنید. اگر این مخلوط در  $300 \text{ kPa}$  و  $140^\circ\text{C}$  در مخزنی به حجم  $5/6 \text{ m}^3$  باشد جرم داخل مخزن را محاسبه کنید.

۷-۲۲M مخلوطی از ۲۵ درصد  $\text{CO}_2$ ، ۲۵ درصد آرگون، ۳۰ درصد هلیوم و ۲۰ درصد هیدروژن بر مبنای حجمی از  $75^\circ\text{C}$  تا  $150^\circ\text{C}$  طی یک فرآیند فشار ثابت حرارت داده می‌شود. مقدار حرارت داده شده را به ازای واحد جرم محاسبه کنید. اگر این مخلوط در  $200 \text{ kPa}$  و  $130^\circ\text{C}$  در مخزنی به حجم  $6/5 \text{ m}^3$  باشد، مقدار جرم داخل مخزن را محاسبه کنید.

۷-۲۳M در جعبه صُلبی به حجم  $10 \text{ m}^3$  در شرایط  $400 \text{ kPa}$  و  $120^\circ\text{C}$  مخلوطی از ۲۵ درصد نیتروژن، ۴۰ درصد دی اکسید کربن و ۳۵ درصد هیدروژن بر مبنای مولی وجود دارد. مقدار سرمایش لازم را برای کاهش دما به  $40^\circ\text{C}$  محاسبه کنید. تغییر آنتروپی را نیز محاسبه نمایید.

۷-۲۴M فشار جزئی بخار آب در یک مخلوط رطوبت سنج مشخص برابر  $2 \text{ kPa}$  و فشار کل مخلوط  $100 \text{ kPa}$  است. رطوبت نسبی را برای دمای جباب خشک  $30^\circ\text{C}$ ،  $35^\circ\text{C}$  و

۴۰°C محاسبه کنید.

۷-۲۵M یک مخلوط هوا - بخار آب به طور آنتروپی ثابت از ۴۰°C، ۱ atm و رطوبت نسبی ۵۰ درصد تا ۷۰۰ kPa متراکم می شود. دما را در انتهای عمل تراکم محاسبه نمایید. اگر مخلوط پس از انجام عمل تراکم تادمای (الف) ۳۰°C و (ب) ۴۰°C در فشار ثابت سرد گردد، مقدار رطوبت خارج شده را محاسبه کنید.

۷-۲۶M یک لوله آب سرد در ۱۳°C از میان اطاقی با هوای اتمسفری ۲۷°C عبور می کند. حداکثر رطوبت نسبی هوا را محاسبه کنید به طوری که میعان بر روی لوله صورت نگیرد.

۷-۲۷M وقتی که گوشت و سایر فرآورده های غذایی، در انبارهای سرد مستقیماً در معرض هوا با دمای خیلی پایین قرار گیرند، خشک می شوند. بر اساس اطلاعات موجود در این فصل پدیده مذکور را تفسیر کنید. برای محاسبات دمای هوا را ۱۸°C - فرض کنید.

۷-۲۸M یک کولر تبخیری جهت کار در یک هوای کویری که  $T_{DB} = ۴۳^\circ\text{C}$ ،  $\phi = ۱۰\%$  برای تخلیه  $۱۴۰ \text{ m}^3/\text{min}$  هوا به کار می رود. اگر هوا واحد مذکور را با رطوبت نسبی ۹۰٪ ترک نماید، محاسبه کنید مقدار آبی را که باید برای دستگاه تأمین نمود.

۷-۲۹M اتاقهای مخصوص پرستاری از بچه های شیرخوار غالباً تحت شرایط هوای فوق اشباع است. فرض کنید که هوا از طریق سیستم گرمایش منظمی در ۲۷°C با رطوبت نسبی ۴۰ درصد در دسترس است. شدت جریان هوا برای این اتاق برابر  $۳۴ \text{ m}^3/\text{min}$  می باشد. برای ایجاد رطوبت مؤثر ۱۰۵ درصد در ۲۴°C چقدر آب در ساعت باید به صورت قطرات ریز به هوا افزوده گردد؟ چقدر حرارت اضافی باید تأمین شود؟

۷-۳۰M برای اطمینان از دقت عمل وسایل یک آزمایشگاه، باید محیط در شرایط رطوبت کم نگهداشته شود. از یک فرآیند تهویه مطبوع سرمایش - بازگرم برای این منظور استفاده می گردد. هوای ورودی در ۳۲°C و با رطوبت نسبی ۵۰ درصد است و در ۱۸°C با رطوبت نسبی ۲۰ درصد به اتاق وارد می شود. مقدار هوای مورد نیاز  $۲۸ \text{ m}^3/\text{min}$  است. کل سرمایش و گرمایش لازم را محاسبه کنید.

۷-۳۱M مقدار  $۲۸ \text{ m}^3/\text{min}$  هوای ۴۳°C با رطوبت نسبی ۱۵ درصد به طور آدیاباتیک با  $۱۴ \text{ m}^3/\text{min}$  هوای ۱۸°C با رطوبت نسبی ۹۰ درصد مخلوط می شود. دمای نهایی و

رطوبت نهایی را محاسبه کنید.

۷-۳۲M هوای خروجی از کولر تبخیری مسأله ۷-۲۸M با  $28 \text{ m}^3/\text{min}$  هوای خارج مخلوط می‌گردد. دما و رطوبت حاصله را به دست آورید.

۷-۳۳M  $30 \text{ m}^3/\text{min}$  هوا در  $33^\circ\text{C}$  و رطوبت نسبی ۹۰ درصد با جریان هوایی در  $15^\circ\text{C}$  مخلوط می‌شود. چقدر جریان هوای خنک کننده و رطوبت لازم است تا مخلوط با رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد تولید شود؟ دمای نهایی مخلوط چقدر است؟

۷-۳۴M یک رطوبت زن ارزان برای سیستمهای گرمایشی منازل از طریق پودر نمودن آب مایع و پاشیدن مستقیم آن در کانال هوا عمل می‌کند. دستگاهی برای به کار بردن جریان هوای داده شده در زیر طراحی شده است:

هوای وارده به قسمت گرم کن - رطوبت زن:  $8/5 \text{ m}^3/\text{min}$  در  $7^\circ\text{C}$ ،  $\phi = 80\%$

به اضافه  $34 \text{ m}^3/\text{min}$  در  $15^\circ\text{C}$ ،  $\phi = 80\%$

به اضافه آب مایع در  $15^\circ\text{C}$

هوای خارج شده از قسمت گرم کن - رطوبت زن:  $T_{DB} = 30^\circ\text{C}$ ،  $\phi = 35\%$   
مقدار گرمایش لازم و مقدار آب مایعی را که باید برای واحد رطوبت زن تأمین گردد، محاسبه کنید.

۷-۳۵M ماسختمان کوچکی در آب و هوای کوبیری به سرمایش مطبوعی برابر  $35 \text{ kW}$  نیاز دارد که برای انجام این کار یک کولر تبخیری طراحی می‌گردد. هوای خارج در  $45^\circ\text{C}$  و  $\phi = 5\%$  در دسترس است. چه شدت جریانی از هوای ورودی لازم است و چقدر آب برای کولر باید تأمین گردد؟

۷-۳۶M یک واحد مسکونی  $325 \text{ m}^2$  مساحت و  $2/5 \text{ m}$  ارتفاع دارد. چقدر بخار آب در شرایط  $24^\circ\text{C}$  و رطوبت نسبی ۵۰ درصد در آن موجود است؟

۷-۳۷M برای مخلوط متشکل از  $1 \text{ kg}$  هلیوم و  $1 \text{ kg}$  نیتروژن گرماهای ویژه جرمی را محاسبه کنید. اگر چنین مخلوطی در یک سیستم جریان دائم از  $1 \text{ atm}$ ،  $20^\circ\text{C}$  تا  $5 \text{ atm}$ ،  $150^\circ\text{C}$  گرم شده و متراکم گردد، گرمای افزوده شده، کار محوری ورودی و تغییر در آنتروپی مخلوط را محاسبه کنید. مسأله را برای عمل گرمایش و تراکم در یک سیستم بسته تکرار نمایید.

۷-۳۸M ۲ kg هوا در ۱۷۰ kPa، ۵°C و رطوبت نسبی ۸۰ درصد با ۴ kg هوا در ۱۷۰ kPa، ۴۰°C و رطوبت نسبی ۲۰ درصد در یک فرآیند آدیاباتیک جریان دائم مخلوط می‌گردد. دما و رطوبت نهایی مخلوط را محاسبه کنید، در صورتی که فشار نهایی (الف) ۱۷۰ kPa و (ب) ۱۴۰ kPa باشد.

۷-۳۹M یکی از روشهای تولید هوای خیلی خشک عبارت است از سرد کردن آن تا دماهای خیلی پایین و سپس گرم نمودن آن تا دمای مورد نظر. فرض نمایید که مخلوطی در ۱ atm، ۲۵°C با رطوبت نسبی ۸۰ درصد در دسترس است. اگر مخلوط تا ۳۵°C- سرد شده و سپس تا ۲۵°C باز گرم گردد، رطوبت نسبی نهایی چقدر خواهد بود؟ برای شدت جریانی از مخلوط اولیه به مقدار ۴۸ m<sup>3</sup>/min چقدر سرمایش و گرمایش لازم است؟

۷-۴۰M در مسأله ۷-۳۹M اگر مقدار یخ یا برفک انباشت شده در قسمت سرد کننده به ۲۵ kg برسد یخها باید ذوب شود. با فرض این که آب خارج شده از هوا در دماهای بالای ۲°C قادر به خروج آزادانه باشد، زمان لازم را برای انباشت ۲۵ kg یخ محاسبه کنید. محاسبات را برای حالتی که هیچ آبی خارج نشود تکرار نمایید.

۷-۴۱M یک وسیله تبخیر کننده برای استفاده بجه‌های کوچک در هوای سرد و خشک به صورتی طراحی شده که یک قسمت از مخلوط فوق اشباع در ۱۵°C با رطوبت نسبی مؤثر ۱۱۰ درصد را با دو قسمت هوای اتاق در ۲۴°C با رطوبت نسبی ۱۵ درصد مخلوط نماید. اگر ۱۰ درصد رطوبت اضافی در جریان فوق اشباع به شکل قطرات کوچک مایع باشد، رطوبت و دمای جریان مخلوط شده خروجی چقدر است؟ فرض کنید که بنای قسمتهای گفته شده هوای خشک باشد.

۷-۴۲M مخلوطی از متان (CH<sub>4</sub>) و هوا که دارای نسبتهای جرمی یک قسمت متان به ۱۵ قسمت هوای خشک است، تولید می‌گردد. عمل اختلاط در یک فرآیند جریان دائم انجام می‌شود. متان و هوا هر دو در ۲۷°C وارد مخزنی می‌شوند. هوای ورودی دارای ۷۰٪  $\phi$  است و گازها در طی فرآیند اختلاط گرم می‌شوند تا دمای خروجی ۹۳°C را ایجاد کنند. فرآیند مذکور در فشار ثابت ۱ atm صورت می‌گیرد. برای دبی حجمی ورودی ۲۸ m<sup>3</sup>/min از متان چه مقدار گرمایش باید تأمین گردد و رطوبت نسبی مخلوط

خروجی چقدر است؟

۷-۴۳M مخزنی به حجم ۵۷۰ لیتر حاوی مخلوطی از هوا-بخار آب در  $1 \text{ atm}$ ،  $27^\circ\text{C}$  و  $\phi = 50\%$  است. از یک خط لوله هوای خشک تحت فشار بالا در  $50^\circ\text{C}$  و  $480 \text{ kPa}$  برای پر کردن مخزن با هوای اضافی استفاده شده است. فرآیند پر شدن با هستگی صورت می‌گیرد به طوری که دمای داخل مخزن در  $27^\circ\text{C}$  ثابت باقی می‌ماند. برای بالا بردن فشار مخزن تا  $350 \text{ kPa}$  چقدر هوا باید افزوده گردد، رطوبت نسبی تحت این شرایط جدید چقدر خواهد بود و چقدر گرما از طریق مخزن در این فرآیند از دست رفته است؟

۷-۴۴M مخلوطی به نسبتهای مساوی از هوا و بخار آب در یک فرآیند فشار ثابت در  $1 \text{ atm}$  و  $150^\circ\text{C}$  تا  $260^\circ\text{C}$  گرم می‌گردد. چقدر حرارت به ازای هر کیلوگرم جرم مخلوط لازم است؟

۷-۴۵M اگر مخلوط مسأله ۷-۴۴M در فشار ثابت سرد گردد، دمای را که در آن بخار موجود در مخلوط شروع به میعان می‌کند، تخمین بزنید.

۷-۴۶M مخلوطی از هوا و بخار آب در  $1/4 \text{ MPa}$  و  $150^\circ\text{C}$  اشباع می‌گردد. سرمایش لازم برای سرد نمودن مخلوط را تا  $65^\circ\text{C}$  طی یک فرآیند جریان دائم در فشار ثابت محاسبه کنید.

۷-۴۷M مخلوطی به نسبتهای مولی مساوی از متان ( $\text{CH}_4$ ) و اتان ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) به طور برگشت پذیر و دما ثابت از  $65^\circ\text{C}$ ،  $700 \text{ kPa}$  تا  $5 \text{ MPa}$  در یک فرآیند جریان دائم متراکم می‌گردد. کار لازم را به ازای هر کیلوگرم مخلوط محاسبه کنید

۷-۴۸M یک برج خنک کن بزرگ برای نیروگاهی بر اساس مفهوم سرمایش تبخیری طراحی شده است. در یک واحد آن حرارتی که باید در برج خنک کننده جذب گردد برابر  $1000 \text{ MW}$  است و این عمل با پاشیدن آب  $27^\circ\text{C}$  در هوای  $32^\circ\text{C}$ ،  $\phi = 30\%$  انجام می‌شود. در طراحی برج مذکور فرض می‌گردد که هوا در حالت اشباع و در  $20^\circ\text{C}$  خارج می‌شود. برای انجام سرمایش با شدت لازم چقدر آب و هوای ورودی مورد نیاز است؟

۷-۴۹M برای مخلوطهای هوا-بخار آب در  $1 \text{ atm}$  و (الف)  $T_{\text{DB}} = 40^\circ\text{C}$ ،  $T_{\text{WB}} = 16^\circ\text{C}$  و (ب)  $T_{\text{DB}} = 20^\circ\text{C}$ ،  $T_{\text{WB}} = 16^\circ\text{C}$  انتالپیهای مخلوط را محاسبه کنید. اگر فرض شود که انتالپی مخلوط تنها تابعی از دمای حباب تر است، چند درصد خطا حاصل می‌شود؟

۷-۵۰M برای سرد نمودن هوای  $32^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۶۰٪ تا  $35^{\circ}\text{C}$  - در یک فرآیند فشار ثابت (الف)  $1\text{ atm}$  و (ب)  $2\text{ atm}$  چقدر سرمایش لازم است؟ در این فرآیند چقدر رطوبت خارج می‌گردد؟

۷-۵۱M مخلوطی به نسبت یک قسمت نیتروژن و دو قسمت دی‌اکسید کربن در مبنای جرمی حاوی مقدار کافی بخار آب جهت ایجاد رطوبت نسبی ۵۰ درصد در  $40^{\circ}\text{C}$  و  $1\text{ atm}$  فشار کلی می‌باشد. برای سرد نمودن  $1\text{ kg}$  مخلوط تا  $5^{\circ}\text{C}$  در فشار ثابت چقدر سرمایش لازم است؟ چقدر آب در این فرآیند دفع شده است؟

۷-۵۲M مخلوطی شامل  $1\text{ kg}$  اکسیژن و  $1\text{ kg}$  هلیوم دارای مقدار کافی بخار آب برای تولید ۱۰ درصد رطوبت نسبی در  $40^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. مخلوط مذکور در یک فرآیند اشباع آدیاباتیک سرد می‌گردد. حداقل دمایی که بدین طریق می‌توان بدان دست یافت چقدر است و چه مقدار آب به ازای هر کیلوگرم جرم مخلوط اولیه باید تأمین گردد؟ گرمای ویژه جرمی مخلوط قبل و بعد از فرآیند اشباع چقدر است؟

۷-۵۳M  $1\text{ kg}$  از مخلوطی شامل ۵۰ درصد  $\text{CO}_2$  و ۵۰ درصد  $\text{CH}_4$  بر مبنای مولی در ظرف صلبی در  $150^{\circ}\text{C}$  و  $3/5\text{ MPa}$  قرار دارد. با استفاده از (الف) قانون گاز ایده آل، (ب) قانون جمع حجمها و (ج) روش شبه - بحرانی کی، حجم مخلوط را محاسبه کنید.

۷-۵۴M انرژی لازم برای گرم کردن مخلوط مسأله ۷-۵۳M را تا  $260^{\circ}\text{C}$  در یک فرآیند فشار ثابت جریان دائم با استفاده از (الف) قانون گاز ایده آل و (ب) روش شبه بحرانی محاسبه کنید.

۷-۵۵M مخلوطی به نسبت مولی ۶۰ درصد ستان ( $\text{CH}_4$ ) و ۴۰ درصد اتان ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) در یک دستگاه جریان دائم از  $65^{\circ}\text{C}$ ،  $700\text{ kPa}$  تا  $2/4\text{ MPa}$  متراکم می‌شود. دبی جرمی  $5\text{ kg/min}$  است. با فرض برگشت پذیری و آدیاباتیک بودن فرآیند مذکور و با استفاده از (الف) روابط گاز ایده آل و (ب) روش شبه بحرانی، مقدار کار داده شده به سیستم را محاسبه کنید.

۷-۵۶M مخلوطی به نسبتهای مولی ۳۰ درصد  $\text{CO}_2$ ، ۱۰ درصد  $\text{CO}$ ، ۴۰ درصد  $\text{N}_2$  و ۲۰ درصد  $\text{CH}_4$  در ظرف صلبی به حجم  $140\text{ لیتر}$  در  $28\text{ MPa}$  و  $90^{\circ}\text{C}$  قرار دارد. برای

کاهش دما تا  $40^{\circ}\text{C}$  با استفاده از (الف) قانون گاز ایده آل و (ب) قانون کی، محاسبه کنید حرارتی را که باید از مخلوط گرفته شود.

۷-۵۷M اکسیژن در ظرف صُلبی به حجم ۳۰ لیتر در  $50^{\circ}\text{C}$  و  $40\text{ atm}$  قرار دارد. نیتروژن از یک خط لوله در  $28\text{ MPa}$  و  $40^{\circ}\text{C}$  با هستگی وارد مخزن می شود تا وقتی که نسبتهای مخلوط موجود در ظرف تقریباً مشابه نسبتهای هوا یعنی  $N_2 = 78\%$  و  $O_2 = 22\%$  بشود. در طی فرآیند پرشدن برای ثابت نگهداشتن دما در  $40^{\circ}\text{C}$  مخزن به طریقی سرد می گردد. حرارت گرفته شده از مخزن و جرم نیتروژن افزوده شده را محاسبه کنید. از قانون کی استفاده کنید.

۷-۵۸M مخلوطی به نسبتهای مولی ۴۰ درصد آرگون و ۶۰ درصد نیتروژن در یک دستگاه مبدل حرارتی جریان دائم از  $70^{\circ}\text{C}$ ،  $4/8\text{ MPa}$  تا  $90^{\circ}\text{C}$  گرم می گردد. به علت اصطکاک سیال، فشار در خروجی دستگاه تا  $4/8\text{ MPa}$  افت می کند. سرعتهای جریان سیال آن قدر پایین است که از انرژیهای جنبشی صرف نظر می گردد. محاسبه کنید مقدار گرمایش لازم را که باید به ازای هر کیلوگرم جرم مخلوط تأمین گردد.

۷-۵۹M مخلوطی به نسبتهای مولی مساوی از آرگون و  $\text{CO}_2$  در ظرفی صُلبی در  $20\text{ atm}$  و  $25^{\circ}\text{C}$  قرار دارد. برای بالا بردن دمای مخلوط تا  $150^{\circ}\text{C}$  چقدر حرارت باید به ازای هر کیلوگرم آن تأمین گردد؟

۷-۶۰M مخلوط هوا - بخار آبی دارای ۲۵ درصد بخار آب بر مبنای مولی می باشد و در  $3/5\text{ MPa}$  و  $430^{\circ}\text{C}$  قرار دارد. حجم مخصوص مخلوط را با استفاده از (الف) قانون گاز ایده آل، (ب) قانون جمع فشارها (ج) قانون جمع حجمها و (د) قانون شبه بحرانی کی محاسبه کنید.

۷-۶۱M برای حرارت دادن مخلوط مسأله ۷-۶۰M تا  $540^{\circ}\text{C}$  در طی یک فرآیند جریان دائم فشار ثابت به ازای هر کیلوگرم مخلوط چقدر حرارت لازم است؟

۷-۶۲M  $4000\text{ lit/s}$  هوا در  $10^{\circ}\text{C}$  با رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد با  $3000\text{ lit/s}$  هوا در  $33^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۶۰ درصد طی فرآیند آدیاباتیک جریان دائم در فشار  $1\text{ atm}$  مخلوط می شود. خواص مخلوط نهایی را محاسبه کنید.

- ۷-۶۳M ۸۰۰ lit/s هوا در ۱ atm،  $5^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۲۰ درصد به محفظه گرمایش داده و آب در  $25^{\circ}\text{C}$  به هوا پاشیده می شود. هوا در  $25^{\circ}\text{C}$  با رطوبت نسبی ۵۰ درصد از محفظه خارج می گردد. مقدار حرارتی که باید تهیه گردد و جرم آب پاشیده شده را محاسبه کنید.
- ۷-۶۴M هوای داغ در ۱ atm،  $35^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۶۰ درصد با پاشیدن آب  $3^{\circ}\text{C}$  به آن سرد می گردد. هوای اشباع شده محفظه پاشش را با رطوبت مخصوص هوای خشک  $0.009 \text{ kg/kg}$  و آب محفظه را در  $9^{\circ}\text{C}$  ترک می کند. جریان هوای ورودی  $2800 \text{ lit/s}$  است. نرخ جریان آب پاششی لازم را با فرض این که محفظه آدیاباتیک باشد محاسبه کنید.
- ۷-۶۵M مخلوطی از  $\text{CO}_2$  و  $\text{N}_2$  با نسبتهای حجمی مساوی موجود است. نسبت جرمی هر یک از اجزا و ثابت گاز را برای مخلوط محاسبه کنید.
- ۷-۶۶M ۱ kg اکسیژن با ۴ kg گاز ایده آل دیگری مخلوط می شود و مخلوط کل یک حجم  $6 \text{ m}^3$  را در فشار کلی  $320 \text{ kPa}$  و  $50^{\circ}\text{C}$  اشغال می کند. ثابت گاز دیگر و نسبت مولی هر یک از اجزا را محاسبه کنید.
- ۷-۶۷M ۵۰۰ lit/s هوا در ۱ atm،  $20^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۵۰ درصد طی یک فرآیند جریان دائم فشار ثابت تا  $5^{\circ}\text{C}$  سرد می شود. سرمایش لازم و مقدار رطوبت خارج شده را محاسبه کنید.
- ۷-۶۸M ۵ kg از یک مخلوط هوا - بخار آب در ۵ atm و  $35^{\circ}\text{C}$  به صورت دما ثابت تا فشار جزئی بخار آب  $228/1 \text{ kPa}$  منبسط می گردد. مخلوط در شرایط اولیه اشباع شده است. فشار کلی برای حالت نهایی و مقدار انتقال حرارت را محاسبه کنید.
- ۷-۶۹M ۵۰۰ لیتر از مخلوط هوا - بخار آب در ۱ atm،  $35^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۹۰ درصد در حجم ثابت تا  $5^{\circ}\text{C}$  خنک می شود. مقدار سرمایش لازم، مقدار بخار آب تقطیر شده و دمایی را که تقطیر آغاز می گردد محاسبه کنید.
- ۷-۷۰M ۲۳۰۰ lit/s هوا در ۱ atm،  $30^{\circ}\text{C}$  حباب خشک و رطوبت نسبی ۳۵ درصد وارد محفظه آدیاباتیکی شده، آب به مقدار ۸ g به ازای هر کیلوگرم هوای خشک در مخلوط اضافه می شود. در حین این فرآیند دمای حباب تر ثابت باقی می ماند. دمای حباب خشک و



رطوبت نسبی در جریان خروجی را محاسبه کنید. چقدر آب کلاً به ازای هر ساعت اضافه می شود؟

۷-۷۱M ۷۰۰ lit/s هوا در  $20^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد در یک فرآیند جریان دائم تا  $35^{\circ}\text{C}$  حرارت داده می شود. رطوبت نسبی نهایی و گرمایش لازم را تعیین کنید.

۷-۷۲M ۷۰۰ lit/s هوای محیط در  $32^{\circ}\text{C}$  و ۶۰ درصد رطوبت نسبی برای خارج کردن رطوبت باید یک فرآیند سرمایشی را طی کند و سپس طی یک فرآیند افزایش حرارت مخلوط به  $24^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۴۰ درصد می رسد. مقدار سرمایش و گرمایش لازم و رطوبت خارج شده را محاسبه کنید.

۷-۷۳M برای نمونه ای از هوا در ۱۰۰ kPa، دمای حباب خشک  $34^{\circ}\text{C}$  و دمای حباب تر  $20^{\circ}\text{C}$  است. رطوبتهای مخصوص و نسبی، نقطه شبنم، نسبتهای مولی بخار آب و هوای خشک و حجم مخلوط را به ازای هر کیلوگرم هوای خشک محاسبه کنید.

۷-۷۴M هوا و بخار آب درون یک مخزن صلب در  $30^{\circ}\text{C}$  وجود دارد. بخار آب در حالت اشباع است و تنها ۱/۰ kg هوا خشک به ازای هر کیلوگرم بخار آب موجود است. رطوبت مخصوص و فشار کلی مخلوط را محاسبه کنید. همچنین نسبتهای مولی هوا و بخار آب را محاسبه کنید.

۷-۷۵M ۸ kg/s هوای خشک در  $105^{\circ}\text{C}$  و ۱ atm با ۵ kg/s بخار آب در ۱ atm و رطوبت نسبی ۹۰ درصد در یک دستگاه جریان دائم آدیاباتیک در فشار ثابت مخلوط می شود. رطوبت مطلق مخلوط نهایی و برگشت ناپذیری را برای فرآیند جهت  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$  محاسبه کنید.

۷-۷۶M نسبتهای جرمی مساوی از  $\text{CH}_4$  و  $\text{CO}_2$  محتویات مخزنی به حجم  $3\text{ m}^3$  را در ۷۰۰ kPa و  $30^{\circ}\text{C}$  تشکیل می دهد. ۱۱ kg اکسیژن به مخلوط اضافه می شود در حالی که حجم کلی و دما ثابت باقی می ماند. ترکیب مولی مخلوط جدید و فشار نهایی را محاسبه کنید.

۷-۷۷M مخلوط خاصی دارای ترکیب مولی زیر می باشد: ۴۰ درصد  $\text{CH}_4$ ، ۳۵ درصد  $\text{CO}_2$  و ۲۵ درصد  $\text{N}_2$ . نسبتهای جرمی هر یک از اجزا و ثابت گاز را برای مخلوط محاسبه کنید.

۷-۷۸M ۳/۵ kg مخلوط  $\text{CO}_2$  و  $\text{N}_2$  درون یک مخزن صلب در ۳۰۰ kPa و  $70^{\circ}\text{C}$  وجود دارد.

نسبت مولی هر يك از گازها ۵۰ درصد است. ۱ kg نیتروژن در حالی که دما در  $70^{\circ}\text{C}$  ثابت نگاه داشته می شود به ظرف اضافه می شود. ترکیب جرمی مخلوط جدید و وزن ملکولی آن و فشار کلی را محاسبه کنید.

۷-۷۹M در یک کاربرد تهویه مطبوع برای ساختمانی با استفاده از یک برج خنک کن تر  $4/7\text{ MW}$  انرژی باید به محیط داده شود. هوای ورودی در  $35^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۳۰ درصد می باشد و هوا در  $38^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۹۰ درصد برج را ترک می کند. آب جبرانی در  $23^{\circ}\text{C}$  وارد برج خنک کن می شود. آب خنک کننده از واحد تهویه مطبوع در  $40^{\circ}\text{C}$  وارد و به واحد در  $30^{\circ}\text{C}$  بر می گردد. جریان جرمی آب جبرانی و دبی حجمی هوای ورودی لازم را محاسبه کنید.

۷-۸۰M نیروگاهی در زمستان با هوای خارج  $0^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۸۰ درصد کار می کند. ۱ GW انرژی باید از طریق یک برج خنک کن تر که آب مایع را از  $30^{\circ}\text{C}$  تا  $20^{\circ}\text{C}$  سرد می کند تلف شود. آب جبرانی در  $10^{\circ}\text{C}$  در دسترس است و هوای خروجی از برج در  $20^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۸۰ درصد خارج می شود. دبی جرمی آب جبرانی و دبی حجمی هوای لازم را محاسبه کنید.

## مراجع

- 1 Doolittle, J. S.: ``Thermodynamics for Engineers, '' 2d ed. International Textbook Company, Scranton, Pa., 1964.
- 2 Obert, E. F.: ``Concepts of Thermodynamics, '' McGraw-Hill Book Company, New York, 1960.
- 3 Van Wylen, G. J., and R. E. Sonntag: ``Fundamentals of Classical Thermodynamics, '' John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
- 4 Hall, N. A., and W. E. Ibele: ``Engineering Thermodynamics, '' Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1960.
- 5 Kay, W. B.: Density of Hydrocarbon Gases and Vapors, *Ind. Eng. Chem.*, vol. 28, p. 1014, 1936.
- 6 Carrier, W. H.: Rational Psychrometric Formulae, *Trans. ASME*, vol. 33, p. 1005, 1911.

# فصل ۸

## ترمودینامیک شیمیایی و تعادل

### ۸-۱ مقدمه

ترمودینامیک فرآیندهای شیمیایی بخش عمده‌ای از کاربردهای مهندسی را در برخی صنایع تشکیل می‌دهد. این فصل مقدمه‌ای است دربارهٔ چنین فرآیندهایی. مطلب با بحث دربارهٔ واکنشهای ساده احتراق از نقطه نظر موازنه‌های جرمی آغاز می‌شود. سپس روشهای تشریح خواص انرژی شیمیایی و بعد کاربرد واکنشهای احتراقی بررسی می‌شود. واکنش شیمیایی همیشه اندکی ناقص است به این معنی که واکنش‌کننده‌ها هرگز کاملاً تبدیل به محصولات نمی‌شوند. درجه پیشرفت واکنش به فشار، دما و سایر عوامل بستگی دارد و در محدوده موضوع کلی تعادل ترمودینامیکی قرار می‌گیرد. در بخشهای آینده این فصل بعضی رابطه‌های عمومی را برای تعادل ترمودینامیکی می‌آوریم و آنها را در مورد فرآیندهای شیمیایی به کار می‌بریم. در پایان، قانون سوم ترمودینامیک را بیان می‌کنیم و رابطهٔ آن را با مفاهیم تعادل شیمیایی و ترمودینامیک آماری مورد بحث قرار می‌دهیم.

### ۸-۲ واکنشهای احتراق

فرآیند احتراق عبارت است از سوزاندن یک سوخت با اکسیژن و یا ماده‌ای حاوی اکسیژن نظیر هوا. سوخت و اکسیدکننده را واکنش‌کننده‌ها<sup>۱</sup> و اجزای حاصله از فرآیند احتراق را

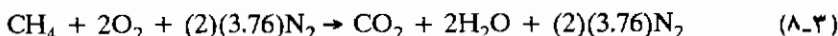
محصولات<sup>۱</sup> می‌نامند. برای نمونه احتراق کربن شامل واکنش ساده زیر است.



وقتی که فرآیند احتراق شامل سوختن یک سوخت هیدروکربنی است، معمولاً محصولات حاوی دی‌اکسید کربن و آب هستند. بدین ترتیب برای متان  $CH_4$  واکنش زیر را داریم



در این واکنش‌ها ضرایبی که قبل از علامت هر ماده شیمیایی در شرایط معمولی قرار دارند به نام ضرایب استوکیومتری<sup>۲</sup> خوانده می‌شوند. موقعی که یک سوخت با هوای می‌سوزد تمام اجزای تشکیل دهنده هوا به غیر از اکسیژن در قبال واکنش شیمیایی بی‌اثر در نظر گرفته می‌شود. مگر این که با دماهای خیلی بالا مواجه باشیم به طوری که تجزیه شیمیایی انجام پذیرد. ترکیب هوای معمولی تقریباً ۷۸ درصد نیتروژن، ۲۱ درصد اکسیژن و ۱ درصد آرگون است. معمولاً در محاسبات از آرگون صرف نظر و هوا به نسبت ۷۹ درصد نیتروژن و ۲۱ درصد اکسیژن فرض می‌گردد. نتیجتاً برای هر مول اکسیژن موجود در هوا تعداد  $\frac{۷۹}{۲۱} = ۳/۷۶$  مول نیتروژن وجود دارد. برای سوختن متان با هوا خواهیم داشت:

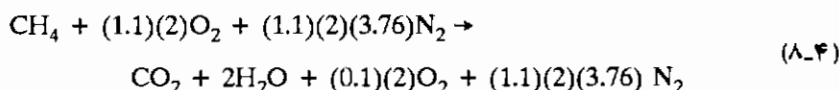


مقدار هوای لازم جهت ستوازن کردن طرفین واکنش هوای استوکیومتری نامیده می‌شود، هرچند مصرف بیش از اندازه هوا برای مقدار معینی از سوخت امری عادی است. در چنین مواردی می‌گوییم که هوای اضافی مورد استفاده قرار گرفته و معمولاً مقدار اضافی به صورت درصدی از هوای استوکیومتری بیان می‌شود. مقدار هوای اضافی بسادگی در طی واکنش منتقل می‌شود. با استفاده مجدد از احتراق متان به عنوان مثال، اگر هوای اضافی ده درصد باشد بدین معنی است که  $(۱/۱)(۲)$  مول اکسیژن در واکنش کننده‌ها به کار برده شده است. مقدار  $(۲)(۱/۱)$  مول اکسیژن استفاده نشده در محصولات باقی مانده و

1- Products

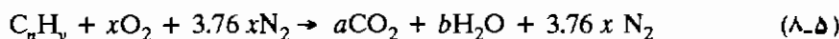
2- Stoichiometric coefficient

معادله شیمیایی به صورت زیر نوشته می شود.



به جای هوای استوکیومتری اصطلاح هوای تئوری<sup>۱</sup> به کار برده می شود.

گاهی واکنش احتراق برای هیدروکربن عمومی  $\text{C}_n\text{H}_y$  که با مقدار متناسب هوای تئوری می سوزد از طریق رابطه زیر به دست می آید



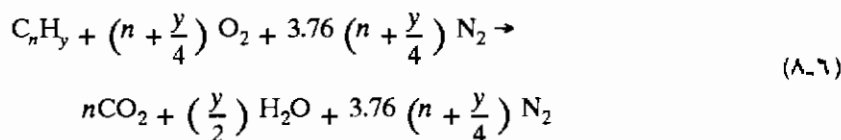
از موازنه کربن داریم  $n = a$

و موازنه هیدروژن نتیجه می دهد  $y = 2b$   
و نهایتاً از موازنه اکسیژن نتیجه می گیریم

$$2x = 2n + \frac{y}{2}$$

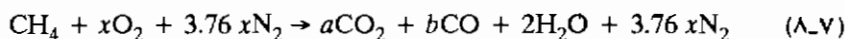
$$x = n + \frac{y}{4}$$

در نتیجه موازنه کلی به صورت زیر است



اگر مقدار هوا کمتر از هوای استوکیومتری باشد، واکنش مورد نظر کامل نگردیده یا، به عبارت دیگر تمام کربن به طور کامل نسوخته است و به شکل  $\text{CO}$  ظاهر نمی شود. در عوض قسمتی از آن به صورت منواکسید کربن  $\text{CO}$  در محصولات ظاهر خواهد شد. واکنش ناقص سوختن متان می تواند

به صورت زیر ظاهر گردد.



در این مورد انتظار داریم که  $x < 2$  باشد. از موازنه اکسیژن بر روی این معادله نتیجه می گیریم که

$$2x = 2a + b + 2 \quad (۸-۸)$$

برای تعیین مولهای  $\text{CO}$  و  $\text{CO}_2$ ، یعنی معین نمودن مقادیر دقیق ضرایب  $a$  و  $b$ ، اطلاعات بیشتری در مورد دمای واکنش و تعادل شیمیایی لازم است. اگر اکسیژن کافی به معادله (۸-۷) افزوده می شد تا مقدار آن را به نسبت های استوکیومتری برساند، در آن صورت بر طبق معادله واکنش زیر  $\text{CO}$  با اکسیژن ترکیب می شود تا  $\text{CO}_2$  اضافی تشکیل دهد.



واکنش های واقعی حتی موقعی که هوای اضافی هم به کار برده شود به علت وجود عوامل مختلف در فرآیند احتراق معمولاً به سمت تکامل پیش نمی روند. بنابراین برای موازنه یک معادله از نقطه نظر عملی معمولاً احتیاج به اندازه گیری ترکیب محصولات از طریق آزمایش است.

#### دستگاه اُرسات<sup>۱</sup>

شکل ۸-۱ یک دستگاه ساده اُرسات را نمایش می دهد که برای تجزیه محصولات احتراق به کار می رود. این دستگاه از یک بورت اندازه گیری و سه پیست معرف تشکیل شده که به طور متوالی برای جذب دی اکسید کربن، اکسیژن و منواکسید کربن موجود در مخلوط به کار می روند. در ابتدا نمونه ای از دود به داخل بورت اندازه گیری برده می شود. سپس لوله نمونه برداری از جریان دود قطع گردیده، نمونه مورد نظر به داخل اولین پیست معرف رانده شده دی اکسید کربن در آن جذب می شود. نمونه مذکور سپس بداخل بورت اندازه گیری آورده و کاهش در حجم یادداشت می شود. این روش

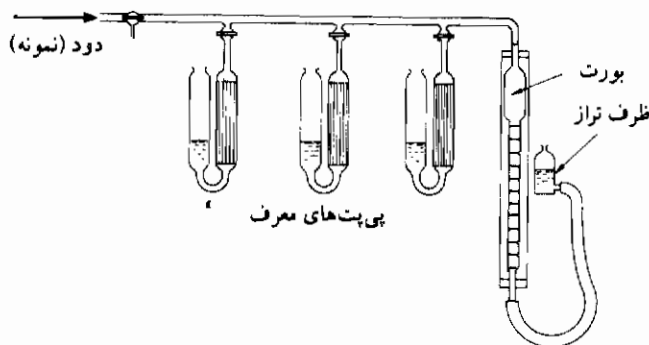
برای دو پیت دیگر تکرار می شود که به ترتیب  $O_2$  و  $CO_2$  را جذب می کنند. در این فرآیند اندازه گیری محصولات حاصل احتراق از بخار آب اشباع شده اند و روش مذکور به طریقی انجام می شود که نسبت های حجمی محصولات بر مبنایی به نام مبنای خشک یعنی بدون در نظر گرفتن بخار آب موجود به دست می آید.

روش های کروماتوگرافی گاز و جذبی مادون قرمز برای اندازه گیری محصولات احتراق در مرجع [13] تشریح شده اند.

حتی موقعی که برای یک فرآیند احتراق هوای اضافی در نظر گرفته می شود به علت وقوع واکنش های شیمیایی در دمای بالای حاصله از احتراق، هم  $CO$  و هم  $CO_2$  ممکن است حاصل شوند. در عملیات واقعی، واکنش با هوای اضافی معادله (۸-۴) ممکن است شامل هر دو ماده  $CO$  و  $O_2$  در محصولات باشد. این موضوع در بحث تعادل شیمیایی در بخش های بعدی این فصل روشن می گردد. یک پارامتر مورد توجه در مسائل عملی احتراق، نسبت هوا به سوخت می باشد که عبارت است از نسبت هوا به سوخت در واکنش کننده ها بر مبنای جرمی و یا مولی.

### مثال ۸-۱ سوختن اکتان

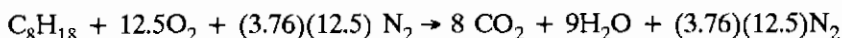
اکتان ( $C_8H_{18}$ ) با ۱۵۰ درصد هوای تتوری می سوزد. نسبت هوا به سوخت و ترکیب مولی محصولات حاصله از احتراق را محاسبه کنید. نقطه شبنم محصولات برای فشار کل ۱۴/۶۹۶ psia



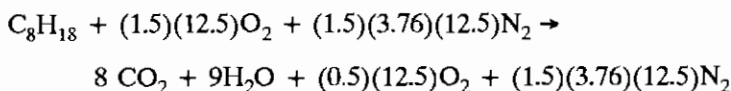
شکل ۸-۱ دستگاه اُرسات

چقدر است؟

**حل:** معادله احتراق برای هوای تئوری عبارت است از



برای ۱۵۰ درصد هوای تئوری واکنش مربوطه به صورت زیر است:



بنابراین داریم

$$m_f = (1)(114) = 114 \text{ lbm/mol سوخت}$$

$$m_a = (1.5)(12.5)(1 + 3.76)(28.96) = 2850 \text{ lbm/mol سوخت}$$

و نسبت هوا به سوخت برابر است با

$$\text{AF} = \frac{m_a}{m_f} = \frac{2850}{114} = 22.6 \text{ lbm هوا/lbm سوخت}$$

تعداد مولهای کل محصولات عبارت است از

$$\begin{aligned} n_p &= 8 + 9 + (0.5)(12.5) + (1.5)(3.76)(12.5) \\ &= 93.75 \text{ mol/mol سوخت} \end{aligned}$$

نسبتهای مولی اجزا عبارت است از

$$x_{\text{CO}_2} = \frac{8}{93.75} = 8.53 \text{ درصد}$$

$$x_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{9}{93.75} = 9.6 \text{ درصد}$$

$$x_{\text{O}_2} = \frac{6.25}{93.75} = 6.66 \text{ درصد}$$



$$x_{N_2} = \frac{70.5}{93.75} = 75.21 \text{ درصد}$$

نقطه شبنم محصولات عبارت است از دمای اشباع مربوط به فشار جزئی بخار آب. داریم

$$\begin{aligned} P_{H_2O} &= x_{H_2O} P_{\text{کل}} \\ &= (0.096)(14.696) = 1.41 \text{ psia} \quad (9.72 \text{ kPa}) \end{aligned}$$

دمای اشباع مربوط به ۱/۴۱ psia برابر است با

$$T_{\text{نقطه شبنم}} = 113.5^\circ\text{F} \quad (45.3^\circ\text{C})$$

بدین ترتیب اگر محصولات تا پایین تر از  $113^\circ\text{F}$  سرد می‌شدند این رطوبت تقطیر می‌گردید. این مطلب علت چکیدن قطرات آب را از انتهای لوله آگروز یک اتومبیل در یک صبح سرد قبل از گرم شدن سیستم آگروز بیان می‌کند.

### ۸-۳ انتالپی تشکیل<sup>۱</sup>

در بخشهای بعدی می‌پردازیم به انجام موازنه‌های انرژی بر واکنشهای شیمیایی به منظور تعیین مقدار انرژی که ممکن است در یک فرآیند احتراق آزاد گردد و بالاترین دمایی که در موقع سوزاندن یک سوخت با هوا می‌توان بدان رسید و غیره. برای چنین موازنه‌های انرژی احتیاج به معلوماتی درباره انتالپی مواد موجود در واکنش داریم. جدولهایی برای مواد گوناگون در دست است که خواص مورد نظر را به صورت تابعی از دما ارائه می‌دهد. ولی برای بسط چنین جدولهایی لازم است حالت مبنایی برای این خواص تعریف کنیم که انرژی شیمیایی داخلی ماده را به طور دقیق در نظر گیرد.

تراز انرژی مبنا (انرژی صفر) طوری انتخاب شده که انرژی تمام عناصر در  $77^\circ\text{F}$  ( $25^\circ\text{C}$ ) و فشار ۱ atm برابر صفر در نظر بگیرد. البته واضح است که انرژی یک جسم مرکب در این حالت مبنا صفر نیست بلکه بر طبق استدلال زیر همان طور که در مورد  $\text{CO}_2$  در  $77^\circ\text{F}$  و ۱ atm به کار رفته،

محاسبه می‌گردد. برای تشکیل  $\text{CO}_2$  در یک فرآیند جریان دائم خواهیم داشت :



و موازنه انرژی

$$H_R + Q \rightarrow H_P \quad (8-11)$$

$H_R$  انتالپی کل واکنش‌کننده‌ها و  $H_P$  انتالپی کل محصولات است.  $Q$  عبارت از انتقال حرارت لازم برای انجام واکنش می‌باشد. با استفاده از تعریف حالت مبنا،  $H_R = 0$  می‌شود چون تمام واکنش‌کننده‌ها عنصر و  $H_P = Q$  است. مقدار  $Q$  را می‌توان از طریق آزمایش تعیین کرد و برای  $\text{CO}_2$  دارای مقدار زیر است :

$$Q = H_P = -169297 \text{ Btu/lbm mol} \quad (-393766 \text{ kJ/kg mol})$$

به عبارت دیگر واکنش معادله (8-10) برای سوختن هر مول از کربن مقدار  $169297 \text{ Btu}$  انرژی آزاد می‌کند. بنابراین انتالپی  $\text{CO}_2$  در  $77^\circ\text{F}$  و  $1 \text{ atm}$  به اندازه این مقدار از حالت مبنا کمتر است. این کمیت انتالپی تشکیل نامیده می‌شود، و دارای علامت  $\bar{h}_f^\circ$  است که خط تیره مشخص‌کننده انتالپی به ازای هر مول ماده مربوطه می‌باشد. این مقادیر برای مواد متداول در جدول A-6 در قسمت ضمایم داده شده است. واکنشی که در آن حرارت آزاد می‌شود گرمازا<sup>۱</sup> نامیده می‌شود و اصطلاح گرماگیر<sup>۲</sup> برای توصیف واکنشهایی به کار می‌رود که حرارت جذب می‌کنند.

حال بسادگی می‌توان دریافت که چگونه انتالپیهای مواد را نسبت به حالت صفر برای عناصر در  $1 \text{ atm}$  و  $298 \text{ K}$  محاسبه می‌کنیم. برای محاسبه تغییر انتالپی از حالت مبنا جدولهای ضمیمه را به کار گرفته و این مقدار را به انتالپی تشکیل می‌افزاییم. بدین ترتیب انتالپی مولی کل در دمای  $T$  برابر است با

$$\bar{h}(T) = \bar{h}_f^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{298} \quad (8-12)$$

1- Exothermic

2- Endothermic

#### ۸-۴ ترازهای مبنای جداول

همان طور که ملاحظه شد می توان تراز صفر یا حالات مبنای مختلفی برای جدول بندی خواص ترمودینامیک انتخاب نمود. برای جداول بخار آب حالت مایع اشباع در  $0^{\circ}\text{C}$  انتخاب می شود در حالی که برای جداول هوا  $0\text{ K}$  و فشار  $1\text{ atm}$  انتخاب می گردد. برای استفاده در معادله (۸-۱۲) جداول با استفاده از دمای مبنای  $0\text{ K}$  به علاوه دمای حالت استاندارد  $298\text{ K}$  ( $77^{\circ}\text{F}$ ) به خدمت گرفته می شود. حالت  $0\text{ K}$  شاید برای آحاد انگلیسی (مطابق جدول A-۱۸) متداولتر باشد در حالی که مبنای  $298\text{ K}$  برای جداول SI (مطابق جدول A-۱۸M) به کار می رود. راه جدید، استفاده از فشار مبنای  $1\text{ MPa}$  به جای  $1\text{ atm}$  ( $101325\text{ MPa}$ ) است. این اختلاف ناچیز اساساً اثری بر روی انتالپی یا انرژیهای داخلی ندارد.

#### ۸-۵ تابع گیبس تشکیل و آنتروپی مطلق

مانند انتالپی تشکیل امکان ایجاد تابع گیبس تشکیل  $\bar{g}_f^{\circ}$  با تراز صفر قرار دادی  $298\text{ K}$  و  $1\text{ atm}$  برای تمام عناصر وجود دارد. مقادیر برای تعدادی از ترکیبات در جدول A-۶ داده شده است. مقادیر آنتروپیهای مطلق براساس قانون سوم ترمودینامیک بحث شده در قسمت ۸-۱۶ است که می گوید:

آنتروپی هر ماده خالص در تعادل ترمودینامیکی در دمای صفر مطلق برابر صفر است .

با به کار بردن این مبنای صفر می توان بین صفر کلوین و حالت استاندارد  $25^{\circ}\text{C}$  و  $1\text{ atm}$  برای به دست آوردن مقادیر آنتروپی مطلق در جدول A-۶ انتگرال گرفت. برای آن دسته از مواد که از رفتار گاز ایده آل تبعیت می کند، تغییر آنتروپی با فشار، با به کار بردن معادله (۶-۳۷) که بر حسب خواص مولی نوشته شده است، محاسبه می گردد.

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{\phi}_2 - \bar{\phi}_1 - R \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (8-13)$$

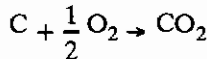
برای گازهای ایده آل، آنتروپی مطلق در هر فشار و دمایی می تواند به صورت زیر نوشته شود

$$\bar{s}^{\circ}(p, T) = \bar{s}^{\circ} + \bar{\phi}_T - \bar{\phi}_{298} - R \ln \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (۸-۱۴)$$

$\bar{s}^{\circ}$  از جدول A-۶ به دست می آید و  $p_0$  فشار مرجع ۱ atm می باشد. مقادیر  $\bar{s}^{\circ}$  را برای گازها در دماهای مختلف و فشار ۰/۱ MPa در جدول A-۱۸ می توان یافت. مقادیر مطلق آنتروپی برای بعضی از تحلیل‌های قانون دوم واکنشهای احتراقی همان طور که در قسمتهای بعدی خواهیم دید مورد نیاز است.

نکته مهمی که باید به خاطر سپرد این است که زمانی که با واکنشهای احتراقی سر و کار داریم حالات مرجع باید به طور دقیق مشخص گردد. جداول ضمیمه، این حالات را مشخص نموده و معادلات تبدیل لازم را معین می کند.

برای نشان دادن این که چگونه انتالپی تشکیل، آنتروپی مطلق و تابع گیس تشکیل به هم مربوط می شوند، می توان  $\bar{g}_f^{\circ}$  را برای  $\text{CO}_2$  از کمیات دیگر در جدول A-۶ محاسبه نمود. داریم



و از جدول A-۶ در ۱ atm و ۲۵°C

$$\bar{h}_f^{\circ}(\text{CO}_2) = -393520 \text{ kJ/kg.mol} \quad \bar{s}^{\circ}(\text{CO}_2) = 213.64 \text{ kJ/kg.mol}$$

$$\bar{s}^{\circ}(\text{O}_2) = 205.03 \text{ kJ/kg.mol} \quad \bar{h}_f^{\circ} = 0 \quad \text{برای C و O}_2$$

$$\bar{s}^{\circ}(\text{C}) = 5.74 \text{ kJ/kg.mol}$$

دما برابر  $298.15 \text{ K} = 25 + 273.15$  است. بنابراین مقدار  $\bar{g}_f^{\circ}$  برای  $\text{CO}_2$  برابر است با

$$\begin{aligned} \bar{g}_f^{\circ} &= G_P - G_R = \sum_P (\bar{h}_f^{\circ} - T s^{\circ}) - \sum_R (\bar{h}_f^{\circ} - T s^{\circ}) \\ &= 393520 - 0 - 0 - (298.15)(213.64 - 5.74 - 20.03) \\ &= -394376 \text{ Btu/lbm.mol} \end{aligned}$$

که مطابقت خوبی با مقدار مندرج در جدول  $\bar{g}_f^{\circ}(\text{CO}_2) = -394376$  دارد. اختلاف، ناشی از خطای گرد کردن در مقادیر جدول می باشد.

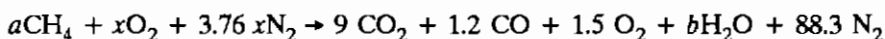
## مثال ۸-۲ محاسبه هوای اضافی

تجزیه و تحلیل محصولات حاصله از احتراق متان ( $\text{CH}_4$ ) با هوای اتمسفری انجام گردیده است. کسرهای مولی محصولات خشک (محصولات باستثنای آب) به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= 9\% & \text{O}_2 &= 1/5\% \\ \text{CO} &= 1/2\% & \text{N}_2 &= 88/3\% \end{aligned}$$

درصد هوای تئوری استفاده شده در فرآیند احتراق را محاسبه کنید.

**حس:** مقدار محصولات خشک را ۱۰۰ مول فرض نموده، معادله احتراق را بر این اساس موازنه خواهیم کرد. داریم:



موازنه کربن:

$$a = 9.0 + 1.2 = 10.2$$

موازنه هیدروژن:

$$4a = 2b$$

$$b = 2a = 20.4$$

موازنه اکسیژن:

$$2x = (2)(9.00) + 1.2 + (2)(1.5) + 20.4$$

$$x = 21.3$$

موازنه نیتروژن:

$$3.76 x = 88.3$$

$$x = 23.5$$

دقت کنید که دو مقدار  $x$  به دست آمده یکسان نیست. در عمل معمولاً نیتروژن موجود در محصولات از طریق کم کردن سایر اجزا از مقدار کل تعیین می‌گردد، یعنی این که مستقیماً اندازه گیری نمی‌شود. به این دلیل مقدار  $x$  تعیین شده از موازنه نیتروژن به اندازه روش محاسباتی دیگر قابل اطمینان نیست. با استفاده از  $x = 21/3$  نتیجه می‌گیریم که

$$\frac{\text{مولهای O}_2}{\text{مول سوخت}} = \frac{21.3}{10.2} = 2.09$$

بر طبق معادله (۸-۳) برای هر مول سوخت وقتی که با هوای تئوری سوزانده شود تعداد ۲ مول اکسیژن لازم است. بنابراین نتیجه مورد نظر عبارت است از :

$$\text{درصد هوای تئوری} = \frac{2.09}{2} (100) = 104.5\%$$

### مثال ۸-۳

انتالپی مولی  $\text{CO}_2$  را در  $440^\circ\text{F}$  محاسبه کنید.

**حل :** معادله (۸-۱۲) را همراه با جدول A-۶ و جداول گاز (جدول A-۱۸) برای این محاسبه به کار می‌گیریم.

$$\bar{h}_{\text{CO}_2} = -169290 \text{ Btu/lbm.mol}$$

$$\bar{h}_{440} = 7597.6 \text{ Btu/lbm.mol} \quad (17671 \text{ kJ/kg.mol})$$

$$\bar{h}_{77} = 4030.2 \text{ Btu/lbm.mol} \quad (9373.8 \text{ kJ/kg.mol})$$

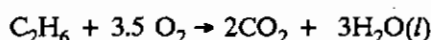
بدین ترتیب :

$$\begin{aligned} \bar{h}_{\text{کل}} &= -169290 + 7597.6 - 4030.2 \\ &= -165722 \text{ Btu/lbm.mol} \\ &= -385451 \text{ kJ/kg.mol} \end{aligned}$$

## مثال ۸-۴

اتان ( $C_2H_6$ ) را با مقدار تئوری اکسیژن می‌سوزانیم. انتقال حرارت را برای واکنش‌کننده‌ها و محصولات، هر دو در  $298\text{ K}$  و  $1\text{ atm}$ ، تعیین کنید.

**حل:** معادله احتراق به صورت زیر است:



انتقال حرارت از معادله (۸-۱۱) برابر است با

$$Q = H_P - H_R$$

همچنین

$$H_R = \bar{h}_{C_2H_6}^\circ = -36420\text{ Btu}$$

$$\begin{aligned} H_P &= 2h_{CO_2}^\circ + 3h_{H_2O}^\circ \\ &= 2(-169290) + 3(-122970) \\ &= -707490\text{ Btu} \quad (-7.464 \times 10^5\text{ kJ}) \end{aligned}$$

بنابراین انتقال حرارت برابر است با

$$\begin{aligned} Q &= -707490 - (-36420) \\ &= -671070\text{ Btu/mol سوخت} \quad (-1.56 \times 10^6\text{ kJ/kgmol}) \end{aligned}$$

علامت منفی نشان دهنده آزاد شدن حرارت در طی فرآیند است.

## ۸-۶ حرارت واکنش و ارزش حرارتی

انرژی آزاد شده در یک واکنش شیمیایی توسط روابط زیر داده می‌شود. برای واکنشی در

حجم ثابت

$$Q_V = (\Delta U)_v = (U_P - U_R)_v = \bar{u}_{RP} \quad (۸-۱۵)$$

و در فشار ثابت :

$$Q_P = (\Delta H)_P = (H_P - H_R)_P = \bar{h}_{RP} \quad (۸-۱۶)$$

کمیت‌های داده شده در معادلات (۸-۱۵) و (۸-۱۶) حرارت‌های واکنش یا انرژی داخلی و انتالپی احتراق نامیده می‌شود. اگر حرارت‌ها بر حسب مول سوخت بیان گردد، در آن صورت برای مشخص نمودن انرژی‌های موجود در معادله مربوطه از علائم  $\bar{u}_{RP}$  و  $\bar{h}_{RP}$  استفاده می‌شود.

اصطلاح ارزش حرارتی برای فرآیند احتراق کاربرد وسیعی دارد و مترادفی برای حرارت واکنش است. وقتی که یک سوخت هیدروکربن در فرآیند احتراقی سوزانده می‌شود، آب در محصولات پدیدار می‌گردد. بیشترین انرژی آزاد شده موقعی به دست می‌آید که تمام آب حاصله در محصولات احتراق در حالت مایع باشد. در این مورد می‌گوییم که ارزش حرارتی بالایی (HHV)<sup>۱</sup> به دست آمده است به همین ترتیب زمانی که تمام آب در محصولات احتراق در حالت بخار باشد حرارت واکنش کمتری به دست خواهد آمد. در این حالت ارزش حرارتی پایینی (LHV)<sup>۲</sup> به دست آمده است. در حقیقت در بیشتر فرآیندهای احتراق هر دو فاز مایع و بخار حضور خواهد داشت به طوری که یک ارزش حرارتی بین HHV و LHV مشاهده می‌گردد. لیستی از ارزش‌های حرارتی چندین سوخت متداول در جدول ۸-۱ داده شده است. مثالهای این فصل کاربرد این مقادیر را نشان می‌دهد.

جدول ۸-۱ ارزش‌های حرارتی سوخت‌ها را برای احتراق در دمای مبنا  $25^{\circ}\text{C}$  ( $77^{\circ}\text{F}$ ) ارائه می‌دهد. مطمئناً بیشتر فرآیندهای احتراق در این دما صورت نمی‌گیرد، و لذا جالب است که استفاده از این مقادیر جدول بندی شده را برای محاسبه حرارت‌های احتراق در سایر دماها نشان دهیم. فرآیند احتراق را در دمای دلخواه  $T$  می‌توان بر حسب  $\bar{h}_{RP}$  برای حالت استاندارد در طرح ساده شکل ۸-۲ نشان داد.

1- Higher heating value

2- Lower heating value



جدول ۸-۱ ارزشهای حرارتی بالایی سوختها برای احتراق در  $25^{\circ}\text{C}$  ( $77^{\circ}\text{F}$ ) و  $1\text{ atm}$ .  
آب مایع در محصولات احتراق می باشد.

سوخت	فرمول	HHV, Btu/lbm mol	kJ/kg mol	انتالپی تبخیر $\bar{h}_{fg}$ برای سوخت	
				Btu/lbm	kJ/kg mol
هیدروژن	$\text{H}_2(\text{g})$	-۱۲۲۹۷۰	-۲۸۵۸۴۰		
کربن	$\text{C}(\text{s})$	-۱۶۹۲۹۰	-۳۹۳۵۲۰		
مونواکسید کربن	$\text{CO}(\text{g})$	-۱۲۱۷۵۰	-۲۸۲۹۹۰		
متان	$\text{CH}_4(\text{g})$	-۳۸۳۰۴۰	-۸۹۰۳۵۰		
استیلن	$\text{C}_2\text{H}_2(\text{g})$	-۵۵۹۱۲۰	-۱۲۹۹۶۰۰		
اتیلن	$\text{C}_2\text{H}_4(\text{g})$	-۶۰۷۰۱۰	-۱۴۱۰۹۷۰		
اتان	$\text{C}_2\text{H}_6(\text{g})$	-۶۷۱۰۸۰	-۱۵۵۹۹۰۰		
پروپیلن	$\text{C}_3\text{H}_6(\text{g})$	-۸۸۵۵۸۰	-۲۰۵۸۵۰۰		
پروپان	$\text{C}_3\text{H}_8(\text{g})$	-۹۵۵۰۷۰	-۲۲۲۰۰۰۰	۶۴۸۰	۱۵۰۶۰
$n$ -بوتان	$\text{C}_4\text{H}_{10}(\text{g})$	-۱۲۳۷۸۰۰	-۲۸۷۷۱۰۰	۹۰۶۰	۲۱۰۶۰
$n$ -پنتان	$\text{C}_5\text{H}_{12}(\text{g})$	-۱۵۲۱۳۰۰	-۳۵۳۶۱۰۰	۱۱۳۶۰	۲۶۴۱۰
$n$ -هگزان	$\text{C}_6\text{H}_{14}(\text{g})$	-۱۸۰۴۶۰۰	-۴۱۹۴۸۰۰	۱۳۵۶۳	۳۱۵۳۰
$n$ -هپتان	$\text{C}_7\text{H}_{16}(\text{g})$	-۲۰۸۸۰۰۰	-۴۸۵۳۵۰۰	۱۵۷۱۳	۳۶۵۲۰
$n$ -اکتان	$\text{C}_8\text{H}_{18}(\text{g})$	-۲۳۷۱۴۰۰	-۵۵۱۲۲۰۰	۱۷۸۳۵	۴۱۴۶۰
بنزن	$\text{C}_6\text{H}_6(\text{g})$	-۱۴۲۰۳۰۰	-۳۳۰۱۵۰۰	۱۴۵۵۲	۳۳۸۳۰
تولون	$\text{C}_7\text{H}_8(\text{g})$	-۱۶۹۸۴۰۰	-۳۹۴۷۹۰۰	۱۷۱۷۶	۳۹۹۲۰
الکل متیلیک	$\text{CH}_3\text{OH}(\text{g})$	-۳۲۸۷۰۰	-۷۶۴۵۴۰	۱۶۰۹۲	۳۷۹۰۰
الکل اتیلیک	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{g})$	-۶۰۶۲۸۰	-۱۴۰۹۳۰۰	۱۸۲۱۶	۴۲۳۴۰

منبع: جداول ترموشیمیایی JANAF [1]، مقادیر انتخابی از خواص ترمودینامیک شیمیایی [2]

و مقادیر انتخابی خواص فیزیکی و ترمودینامیکی هیدروکربن ها و ترکیبات مربوطه [3]

ابتدا واکنش کننده‌ها تا  $25^{\circ}\text{C}$  سرد شده، عمل احتراق در  $25^{\circ}\text{C}$  ادامه می‌یابد و سپس محصولات تا دمای  $T$  گرم می‌شود. بر طبق نمودار، حرارت واکنش را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

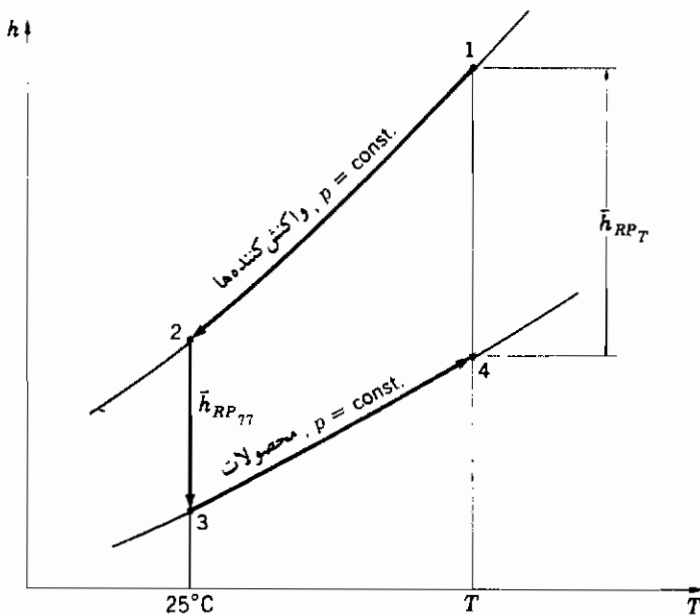
$$\bar{h}_{RP_T} = H_4 - H_1 = (H_4 - H_3) + (H_3 - H_2) + (H_2 - H_1)$$

این رابطه را می‌توان به شکل زیر هم نوشت.

$$\bar{h}_{RP_T} = (H_T - H_{25})_P + \bar{h}_{RP_{25}} + (H_{25} - H_T)_R \quad (A-17)$$

اگر داده‌های مربوط به خاصیت برای اجزای مختلف واکنش کننده‌ها و محصولات در دسترس باشد، مقدار  $\bar{h}_{RP_T}$  بسادگی محاسبه می‌شود.

البته، برای تحلیل انرژی واکنشهای احتراقی نیازی به استفاده از مفهوم ارزشهای حرارتی نیست. می‌توان با استفاده از انتالپهای تشکیل مستقیماً محاسبات دلخواه را انجام داد.



شکل A-۲ محاسبه ارزشهای حرارتی

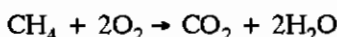
## مثال ۸-۵

انتالپی احتراق را برای متان گازی در  $440^\circ\text{F}$  محاسبه کنید.

**حل:** فرض می‌کنیم که آب موجود در محصولات در فاز بخار است. ارزش حرارتی بالایی برای متان در  $25^\circ\text{C}$  در جدول ۸-۱ داده شده است.

$$\bar{h}_{RP25} = -383040 \text{ Btu/lbm mol}$$

معادله احتراق عبارت است از



برای محدوده‌ای از دماهای نسبتاً پایین گرمای ویژه متان را می‌توان ثابت در  $0.532 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{F}$  (از جدول ۲-۲) فرض نمود. انتالپیهای سایر اجزای موجود در واکنش‌کننده‌ها و محصولات از جداول گازها تعیین می‌شود. معادله (۸-۱۷) را برای محاسبه انتالپی احتراق به کار خواهیم گرفت. کمیت‌های مورد توجه عبارت است از:

$$\begin{aligned} (H_{77} - H_T)_R &= n_{\text{CH}_4}(\bar{h}_{77} - \bar{h}_T)_{\text{CH}_4} + n_{\text{O}_2}(\bar{h}_{77} - \bar{h}_T)_{\text{O}_2} \\ &= (1)(16)(0.532)(77 - 440) + (2)(3725.1 - 6337.9) \\ &= -8315 \text{ Btu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (H_T - H_{77})_P &= n_{\text{CO}_2}(\bar{h}_T - \bar{h}_{77})_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}}[\bar{h}_T(g) - \bar{h}_{77}(l)]_{\text{H}_2\text{O}} \\ &= (1)(7597.6 - 4030.2) + (2)(18)(1260.3 - 45.02) \\ &= 47317 \text{ Btu} \quad (49922 \text{ kJ}) \end{aligned}$$

دقت کنید که برای انتالپی آب در  $77^\circ\text{F}$  انتالپی مایع اشباع در نظر گرفته شده زیرا ارزش حرارتی بالایی را برای  $\bar{h}_{RP77}$  به کار می‌بریم. حال مقادیر فوق الذکر را در معادله (۸-۱۷) وارد نموده و به دست می‌آوریم

$$h_{RP_T} = 47317 + (-383040) + (-8315)$$

$$h_{RP_T} = -344038 \text{ Btu/lbm mol سوخت}$$

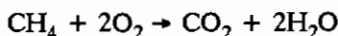
### مثال ۸-۵M

انتالپی احتراق را برای متان گازی در  $500 \text{ K}$  محاسبه کنید.

**حل:** فرض می‌کنیم که آب موجود در محصولات در فاز بخار است. ارزش حرارتی بالایی برای متان در  $298 \text{ K}$  در جدول ۸-۱ داده شده است

$$\bar{h}_{RP_{298}} = -890360 \text{ kJ/kgmol}$$

معادله احتراق عبارت است از



برای محدوده‌ای از دماهای نسبتاً پایین گرمای ویژه متان را می‌توان ثابت در  $2/227 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$  فرض نمود. (از جدول ۲-۲). انتالیپهای سایر اجزای موجود در واکنش‌کننده‌ها و محصولات از جداول گازها تعیین می‌شود. معادله (۸-۱۷) را برای محاسبه انتالپی احتراق به کار خواهیم گرفت. کمیت‌های مورد نظر عبارت است از:

$$\begin{aligned}(H_{298} - H_T)_R &= n_{\text{CH}_4}(\bar{h}_{298} - \bar{h}_T)_{\text{CH}_4} + n_{\text{O}_2}(\bar{h}_{298} - \bar{h}_T)_{\text{O}_2} \\ &= (1)(16)(2.227)(298 - 500) + (2)(-6088) \\ &= -19374 \text{ kJ/kg mol سوخت}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(H_T - H_{298})_P &= n_{\text{CO}_2}(h_T - \bar{h}_{298})_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}}[h_T(g) - \bar{h}_{298}(g) + \bar{h}_{f_{298}}]_{\text{H}_2\text{O}} \\ &= (1)(8314) + (2)[6920 + (18)(2442.3)] \\ &= 110077 \text{ kJ/kg mol} \quad (47325 \text{ Btu/lbm mol})\end{aligned}$$

دقت کنید که برای انتالپی آب در  $298 \text{ K}$  انتالپی مایع اشباع در نظر گرفته شده زیرا ارزش حرارتی

بالایی را برای  $\bar{h}_{RP298}$  به کار می‌بریم. حال مقادیر فوق را می‌توان در معادله (۸-۱۷) وارد نمود به دست می‌آوریم

$$\begin{aligned}\bar{h}_{RP_T} &= 110077 + (-890360) + (-19374) \\ &= -799657 \text{ kJ/kg mol سوخت } (-343791 \text{ Btu/lbm mol})\end{aligned}$$

### مثال ۸-۶

یک سوخت گازی از ۳۵ درصد متان ( $\text{CH}_4$ ) و ۲۵ درصد پروپان ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) و ۴۰ درصد پنتان ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ) تشکیل شده است که درصدها مولی می‌باشند. نسبت جرمی هریک از اجزا و ثابت گاز را برای مخلوط محاسبه کنید. همچنین ارزش حرارتی برای این سوخت را هنگامی که با هوای تئوری در  $25^\circ\text{C}$  سوخته شود به دست آورید.

**حل:** برای یک مول مخلوط، جرم و نسبت جرمی هریک از اجزا برابر است با

نسبت مولی	
$m(\text{CH}_4) = (0.35)(16) = 5.6$	0.123
$m(\text{C}_3\text{H}_8) = (0.25)(44) = 11$	0.242
$m(\text{C}_5\text{H}_{12}) = (0.4)(72) = \underline{28.8}$	<u>0.635</u>
مجموع 45.4	1.000

وزن ملکولی مخلوط برابر است با

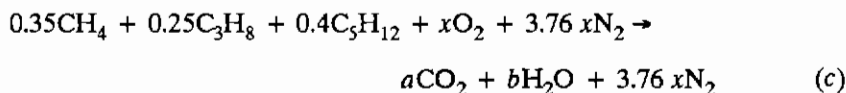
$$M = \frac{45.4}{1.0} = 45.4 \quad (a)$$

بنابراین ثابت گاز برابر است با

$$R = \frac{\bar{R}}{M} = \frac{8314.41}{45.4} = 183.14 \text{ J/kg.K} \quad (b)$$

برای محاسبه ارزش حرارتی ابتدا معادله احتراق را بنا می‌کنیم. با در نظر گرفتن یک مول سوخت، معادله

به صورت زیر در خواهد آمد.



موازنه کربن نتیجه می دهد

$$0.35 + (0.25)(3) + (0.4)(5) = a = 3.10 \quad (d)$$

از موازنه هیدروژن به دست می آید

$$(0.35)(4) + (0.25)(8) + (0.4)(12) = 2 b \quad (e)$$

$$b = 4.1$$

نهایتاً، از موازنه اکسیژن می توان نوشت

$$2 x = 2 a + b = (2)(3.1) + 4.1 \quad (f)$$

$$x = 5.15$$

از رابطه زیر ارزش حرارتی به دست می آید

$$Q_P = H_P - H_R \quad (g)$$

که تمام انتالپیها در  $25^\circ\text{C}$  در نظر گرفته شده است. این بدین معنی است که می توان انتالپیهای تشکیل به دست آمده از جدول A-6 را به کار برد:

$$\text{CH}_4 : \bar{h}_f^\circ = - 74850 \text{ kJ/kg mol}$$

$$\text{C}_3\text{H}_8 : \bar{h}_f^\circ = - 103850 \text{ kJ/kg mol}$$

$$\text{C}_2\text{H}_{12} : \bar{h}_f^\circ = - 146440 \text{ kJ/kg mol}$$

$$\text{O}_2 : \bar{h}_f^\circ = 0$$

$$\text{N}_2 : \bar{h}_f^\circ = 0$$

$$\text{CO}_2 : \bar{h}_f^\circ = - 393520 \text{ kJ/kg.mol}$$

$$\text{H}_2\text{O}(l) : \bar{h}_f^\circ = - 285830 \text{ kJ/kg.mol}$$

سپس می توان انتالپیهای محصولات و واکنش کننده ها را به دست آورد

$$\begin{aligned} H_R &= (0.35)(- 74850) + (0.25)(- 103850) + (0.4)(- 146440) \\ &= - 110736 \text{ kJ/mol سوخت} \end{aligned} \quad (h)$$

$$\begin{aligned} H_P &= (3.1)(- 393520) + (4.1)(- 285830) \\ &= - 2391815 \text{ kJ/mol سوخت} \end{aligned} \quad (i)$$

ارزش حرارتی با جایگزینی مقادیر در معادله (g) به دست می آید

$$\begin{aligned} Q &= - 2391815 - (- 110736) \\ &= - 2281079 \text{ kJ/mol سوخت} \end{aligned} \quad (j)$$

## ۸-۷ دمای شعله آدیاباتیک<sup>۱</sup>

فرآیند احتراق نشان داده شده در شکل ۸-۳ را در نظر بگیرید. اگر این فرآیند به طور آدیاباتیک صورت پذیرد، دمای نهایی محصولات دمای شعله آدیاباتیک نامیده می شود. در چنین موردی تمام حرارت واکنش به انرژی داخلی تبدیل شده و به شکل دمای بالایی در محصولات احتراق آشکار می گردد. معمولاً فرآیند احتراق برای دماهای مورد بحث در بیشتر واکنش ها به سمت تکامل پیش رفته و باید برای تعیین دمای نهایی، معادلات تعادل شیمیایی به کار گرفته شود.

جهت محاسبه دمای شعله آدیاباتیک یک روش تکراری<sup>۲</sup> به علت رابطه پیچیده بین دمای محصولات و انتالپیهای اجزای تشکیل دهنده شان باید به خدمت گرفته شود. مثال زیر چنین روشی را نشان می دهد.

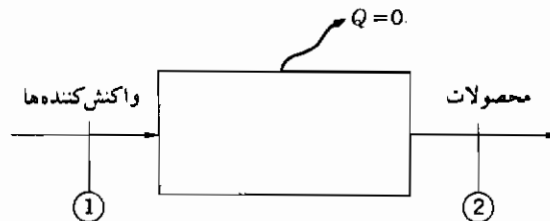
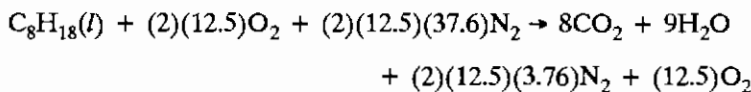
1- Adiabatic flame temperature

2- Iterative procedure

## مثال ۸-۷ محاسبه دمای شعله آدیاباتیک

دمای شعله آدیاباتیک را برای سوختن اکتان مایع با ۲۰۰ درصد هوای تئوری در  $77^{\circ}\text{F}$  محاسبه کنید.

**حل:** معادله احتراق برای این واکنش عبارت است از



شکل ۸-۳ فرآیند احتراق آدیاباتیک

چون فرآیند به صورت آدیاباتیک است، باید داشته باشیم

$$H_R = H_P \quad (a)$$

دمای نهایی محصولات از طریق یک روش تکراری عنوان شده در زیر به دست می‌آید. انتالپی کل واکنش‌کننده‌ها باید انتالپی اکتان مایع در  $77^{\circ}\text{F}$  باشد. انتالپی تشکیل برای اکتان در حالت گازی در جدول A-۶ به مقدار  $89680 \text{ Btu/lbm.mol}$  داده شده است. انتالپی تبخیر در جدول A-۱ به مقدار  $17835 \text{ Btu/lbm.mol}$  ارائه گردیده است. لذا انتالپی در حالت مایع عبارت خواهد بود از

$$H_R = \bar{h}^{\circ}_{\text{C}_8\text{H}_{18}} = -89680 - 17835 = -107515 \text{ Btu/mol سوخت}$$

و رابطه انتالپی محصولات به صورت زیر است:



$$\begin{aligned}
 H_p &= 8(\bar{h}^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{537})_{\text{CO}_2} \\
 &+ 9(\bar{h}^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{537})_{\text{H}_2\text{O}} \\
 &+ 94(\bar{h}^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{537})_{\text{N}_2} \\
 &+ 12.5(\bar{h}_T - \bar{h}_{537})_{\text{O}_2} \\
 &= 8(-169290 + \bar{h}_{\text{TCO}_2} - 4030) \\
 &+ 9(-104040 + \bar{h}_{\text{TH}_2\text{O}} - 4268) \\
 &+ 94(\bar{h}_T - 3730)_{\text{N}_2} + 12.5(\bar{h}_T - 3745)_{\text{O}_2}
 \end{aligned}$$

حال  $H_p$  و  $H_R$  را در معادله (a) جایگزین نموده و مقادیر مختلفی برای  $T$  فرض می‌کنیم تا وقتی که دو طرف معادله یکی شود. تکرارها به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}
 T = 3000^\circ\text{R} \quad H_p &= 8(-173320 + 34806) \\
 &+ 9(-108308 + 28386) \\
 &+ 94(22761 - 3730) \\
 &+ 12.5(23817 - 3725) \\
 &= +310000
 \end{aligned}$$

این مقدار خیلی بالاست چون  $H_R = -107530$ . بنابراین دمای پایین‌تری را برای محصولات آزمایش می‌کنیم:

$$\begin{aligned}
 T = 2000^\circ\text{R} \quad H_p &= 8(-173320 + 21018) \\
 &+ 9(-108308 + 17439) \\
 &+ 94(14534 - 3730) \\
 &+ 12.5(15164 - 3725) = -877673
 \end{aligned}$$

این مقدار خیلی پایین است لذا باید یک میان‌یابی مقدار متوسطی بین دو مقدار به دست آمده را تجربه می‌کنیم.

$$T = 2600^\circ\text{R} \quad H_p = 8(-173320 + 29187)$$

$$\begin{aligned}
 &+ 9(-108308 + 23869) \\
 &+ 94(19415 - 3730) \\
 &+ 12.5(20311 - 3725) = -231000
 \end{aligned}$$

این مقدار هنوز هم خیلی پایین است اما از یک میان یابی سریع نتیجه می گیریم که

$$T = 2700R \quad (1500K)$$

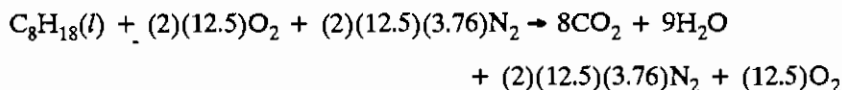
یک تکرار دیگر نشان می دهد که این مقدار با مقدار  $^1 107515 \text{ Btu}$   $H_R = -113434 \text{ kJ}$  بخوبی مطابقت می کند.

لازم به تذکر است که در عمل، رسیدن به چنین دمای غیر ممکن است زیرا محصولات در این دما تجزیه می شوند. بخش ۸-۱۰ شرایط تعادل شیمیایی را که باید در چنین شرایطی اعمال گردد مورد بحث قرار می دهد.

### مثال ۸-۷M محاسبه دمای شعله آدیاباتیک

دمای شعله آدیاباتیک را برای سوختن اکتان مایع با ۲۰۰ درصد هوای تئوری در  $298 \text{ K}$  محاسبه کنید.

**حل:** معادله احتراق برای این واکنش عبارت است از



چون فرآیند به صورت آدیاباتیک است، باید داشته باشیم

$$H_R = H_P \quad (a)$$

دمای نهایی محصولات از طریق یک روش تکراری عنوان شده در زیر به دست می آید. انتالپی کل واکنش کننده ها باید انتالپی اکتان مایع در  $298\text{ K}$  باشد. انتالپی تشکیل برای اکتان در حالت گازی در جدول A-۶ به مقدار  $280450\text{ kJ/kg.mol}$  داده شده است. انتالپی تبخیر در جدول A-۱ به مقدار  $41460\text{ kJ/kg.mol}$  ارائه گردیده است، لذا انتالپی در حالت مایع عبارت خواهد بود از

$$H_R = \bar{h}^\circ_{\text{C}_8\text{H}_{18}} = -208450 - 41460 = -249910\text{ kJ/kg mol سوخت}$$

و رابطه انتالپی محصولات به صورت زیر است

$$\begin{aligned} H_P &= 8(\bar{h}^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{298})_{\text{CO}_2} \\ &+ 9(\bar{h}^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{298})_{\text{H}_2\text{O}} \\ &+ 94(\bar{h}^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{298})_{\text{N}_2} \\ &+ 12.5(\bar{h}_T - \bar{h}_{298})_{\text{O}_2} \\ &= 8[-393520 + (\bar{h}_T - \bar{h}_{298})_{\text{CO}_2}] \\ &+ 9[-241820 + (\bar{h}_T - \bar{h}_{298})_{\text{H}_2\text{O}}] \\ &+ 94(\bar{h}_T - \bar{h}_{298})_{\text{N}_2} + 12.5(\bar{h}_T - \bar{h}_{298})_{\text{O}_2} \end{aligned}$$

حالا  $H_P$  و  $H_R$  را در معادله (a) جایگزین نموده مقادیر مختلفی برای  $T$  فرض می کنیم تا وقتی که دو طرف معادله یکی شود. تکرارها به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} T = 1700\text{ K} \quad H_P &= 8(-393520 + 73492) \\ &+ 9(-241820 + 57685) \\ &+ 94(45430) + 12.5(47970) = 652606 \end{aligned}$$

این مقدار خیلی بالاست چون  $H_R = -249910$ . بنابراین دمای پایین تری را برای محصولات آزمایش می کنیم:

$$\begin{aligned} T = 1100\text{ K} \quad H_P &= 8(-393520 + 38894) \\ &+ 9(-241820 + 30167) \end{aligned}$$

$$+ 94(24757) + 12.5(26217)$$

$$H_p = - 2087015$$

این مقدار خیلی پایین است لذا از طریق میان یابی مقدار متوسطی را بین این دو تعیین می‌کنیم:

$$T = 1400 \text{ K} \quad H_p = 8(-393520 + 55907)$$

$$+ 9(-241820 + 43447)$$

$$+ 94(34936) + 12.5(36966)$$

$$= - 740202$$

این مقدار هنوز هم خیلی پایین است، اما از یک میان یابی سریع نتیجه می‌گیریم که

$$T = 1506 \text{ K} \quad (2712^\circ\text{R})$$

یک تکرار دیگر نشان می‌دهد که این مقدار با  $H_R = 249910 \text{ kJ/kg.mol}$  ( $107442 \text{ Btu/lbm.mol}$ ) بخوبی مطابقت دارد.

لازم به تذکر است که در عمل رسیدن به چنین دمایی غیر ممکن است زیرا محصولات در این دما تجزیه می‌شوند. بخش ۸-۱۰ شرایط تعادل شیمیایی را که باید در چنین شرایطی اعمال گردد مورد بحث قرار می‌دهد.

مقادیر دماهای شعله آدیاباتیک با در نظر گرفتن تجزیه در جدول ۸-۲ ارائه شده است.

جدول ۸-۲ نمونه دماهای شعله آدیاباتیک، واکنش‌کننده‌ها در  $1 \text{ atm}$ ،  $298 \text{ K}$

و مخلوط با نسبت صحیح شیمیایی

سوخت	اکسیژن		هوا	
	K	$^\circ\text{R}$	K	$^\circ\text{R}$
$\text{H}_2$	3079	5542	2384	4291
$\text{CH}_2$	3054	5497	2227	4009
$\text{C}_8\text{H}_{18}$	3108	5594	2277	4098

## ۸-۸ انتالپیهای محصولات عمومی

جدول بندی انتالپیهای محصولات برای احتراق هیدروکربن عمومی  $(CH_p)_n$  با ۲۰۰ و ۴۰۰ درصد هوای تئوری به وسیله کینان و یکی [12] تهیه شده و در جدول A-۱۸ داده شده است. استفاده از این جداول می تواند سرعت محاسبات را به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش دهد. باید در نظر داشت که انتالپیهای مولی داده شده شامل انتالپیهای تشکیل برای  $CO_p$  یا  $H_pO$  در محصولات نمی باشند و فرض می شود که سوخت در حالت گازی باشد. اگرچه این جداول برای هیدروکربن  $(CH_p)_n$  توسعه یافته است اما برای محصولات احتراق هیدروکربنهای دیگر نیز نتایج رضایتبخشی می دهد. مثال ۸-۸ کاربرد آنها را در محاسبه دمای شعله آدیاباتیک برای اکتان ( $C_8H_{18}$ ) نشان می دهد.

## مثال ۸-۸

جدول محصولات احتراق عمومی را برای محاسبه دمای شعله آدیاباتیک اکتان مثال ۸-۷ به کار برید.

**حل:** قبلاً انتالپی واکنش کننده ها را به صورت زیر حساب کردیم:

$$H_R = -249910 \text{ kJ/kg.mol} = -107442 \text{ Btu/lbm.mol} \quad (a)$$

انتالپی محصولات، مجموع انتالپیهای تشکیل  $CO_p$  و  $H_pO$  است و انتالپیهای محصولات از جدول A-۱۸ به دست آمده است.

$$H_P = H_P^\circ + n_P [\bar{h}_P(T) - \bar{h}_P(537)] \quad (b)$$

بنابراین

$$H_P = (n \bar{h}_f^\circ)_{CO_2} + (n \bar{h}_f^\circ)_{H_2O} \quad (c)$$

$$= (8)(-169300) + (9)(-104040) = -2290760 \text{ Btu}$$

کل تعداد مول‌های محصولات برابر است با

$$n_P = 8 + 9 + 94 + 12.5 = 123.5 \text{ mol/mol سوخت} \quad (d)$$

و از جدول A-۱۸ برای ۲۰۰ درصد هوای اضافی

$$\bar{h}_P(537) = 3774.9 \text{ Btu/lbm mol}$$

با جایگزینی مقادیر عددی در معادله (b) نتیجه می‌گیریم

$$\bar{h}_P(T) = 21454 \text{ Btu/lbm.mol}$$

و از جدول A-۱۸ دمای مربوطه برای ۲۰۰ درصد هوای اضافی برابر است با

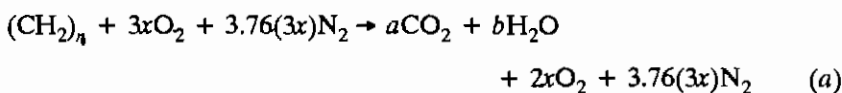
$$T_P = 2718^\circ\text{R} = 1510 \text{ K}$$

بنابراین می‌بینیم که این مقدار با مقدار مثال ۸-۷ مطابقت دارد. می‌توان نتیجه گرفت که جداول محصولات احتراق می‌تواند در جایی که محاسبات سریع مطلوب است به کار گرفته شود.

### مثال ۸-۹

با استفاده از جدول محصولات احتراق عمومی، دمای شعله آدیاباتیک گاز پروپیلن ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) را با ۲۰۰ درصد هوای اضافی در ۱ atm تخمین بزنید. فرض کنید که واکنش‌کننده‌ها در  $77^\circ\text{F}$  ( $25^\circ\text{C}$ ) می‌باشند.

**حل:** معادله عمومی واکنش یک هیدروکربن به صورت  $(\text{CH}_2)_n$  با ۲۰۰ درصد هوای اضافی چنین است



از موازنه کربن  $a = n$  و از موازنه هیدروژن  $b = n$ . سپس موازنه اکسیژن  $z = \frac{3n}{4}$  را نتیجه می‌دهد. تعداد کل مولهای محصولات برابر است با

$$n_p = n + n + 2\left(\frac{3n}{2}\right) + (3.76)(3)\left(\frac{3n}{2}\right) = 21.92 n \frac{\text{محصولات mol}}{\text{سوخت mol}}$$

برای پروپیلن  $n = 3$  و سوخت  $\text{mol}/\text{محصول mol} = 7.31/65$ .  $n_p = 157.6$  انتالپی واکنش کننده برابر انتالپی تشکیل پروپیلن می‌باشد یا

$$H_R = \bar{h}_f^\circ(\text{C}_3\text{H}_6) = 8790 \text{ Btu/lbm.mol}$$

برای محصولات، ابتدا جزء انتالپی مربوط به انتالیهای تشکیل  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{O(g)}$  را محاسبه می‌کنیم:

$$\begin{aligned} H_P^\circ &= (n \bar{h}_f^\circ)_{\text{CO}_2} + (n \bar{h}_f^\circ)_{\text{H}_2\text{O}} \\ &= (3)(-169290) + (3)(-104040) = -819990 \text{ Btu/mol سوخت (c)} \end{aligned}$$

جزء دیگر انتالپی را می‌توان از جدول A-۱۸ برای ۲۰۰ درصد هوای اضافی به دست آورد. بنابراین انتالپی کل محصولات برابر است با

$$\begin{aligned} H_P &= H_P^\circ + H_P(T) - H_P(537) \\ &= H_P^\circ + n_p[\bar{h}_P(T) - \bar{h}_P(537)] \end{aligned} \quad (d)$$

از آنجا که ما در جستجوی دمای شعله آدیاباتیک هستیم

$$H_P = H_R = 8790 \text{ Btu/mol سوخت}$$

از جدول A-۱۸ داریم

$$\bar{h}_P(537) = 3744.9 \text{ Btu/lbm mol}$$

با جایگزینی مقادیر عددی در معادله (d) داریم

$$8790 = -819990 + (65.76)[\bar{h}_P(T) - 3774.9]$$

$$\bar{h}_p(T) = 16378 \text{ Btu/lbm.mol}$$

و

با مراجعه دوباره به جدول A-۱۸ دمای مربوط به محصولات را به دست می آوریم

$$T_p = 2140^\circ \text{R}$$

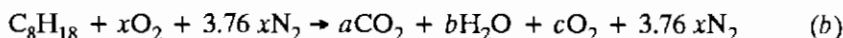
### مثال ۸-۹M برگشت ناپذیری در مشعل

اکتان گازی ( $\text{C}_8\text{H}_{18}$ ) با هوا در فشار ۴ atm می سوزد. هم سوخت و هم هوا در ۴ atm وارد می شوند. دمای سوخت ورودی ۲۹۸ K است و هوا در ۷۱۰ K وارد می شود. محصولات محفظه احتراق را در ۱۱۰۰ K ترک می کند و فرآیند به طور کلی آدیاباتیک است. نسبت سوخت به هوا و برگشت ناپذیری برای فرآیند را با  $T_0 = ۲۵^\circ \text{C}$  محاسبه کنید.

**حل:** این فرآیند معمولاً در مشعل یک سیکل توربین گازی اتفاق می افتد (به قسمت ۹-۱۲ مراجعه شود). چون فرآیند آدیاباتیک است داریم

$$H_R = H_P \quad (a)$$

واکنش احتراق برای یک مول سوخت به صورت زیر نوشته می شود:



حالا  $x$  مجهول است زیرا نمی دانیم چه مقدار هوای اضافی مصرف شده است. از موازنه مولی نتیجه می شود

$$\text{C} : \quad 8 = a$$

$$\text{H} : \quad 18 = 2b \quad b = 9$$

$$\text{O} : \quad 2x = 2a + b + 2c \quad x = 12.5 + c$$

$$c = x - 12.5 = 65.82$$

یا

جهت تعیین نسبت هوا به سوخت AF معادله (a) موازنه انرژی را با معادله (b) ادغام می کنیم تا  $x$  را به



دست آوریم و در نتیجه نسبت هوا به سوخت بدست می آید. برای واکنش کننده ها:

$$H_R = (1) \bar{h}_f^{\circ} \text{C}_8\text{H}_{18} + (4.76 x)(28.97)(h_{710} - h_{298})_{\text{هوا}}$$

از جداول A-۶ و A-۱۷M به دست می آید.

$$\begin{aligned} H_R &= (1)(-208450) + (4.76 x)(28.97)(713.27 - 298.19) \\ &= -208450 + 57239 x \text{ kJ/kg.mol سوخت} \end{aligned} \quad (c)$$

برای محصولات در ۲۹۸ K

$$\begin{aligned} H_P &= (8)(\bar{h}_f^{\circ} + \bar{h}_{1100} - \bar{h}_{298})_{\text{CO}_2} + (9)(\bar{h}_f^{\circ} + \bar{h}_{1100} - \bar{h}_{298})_{\text{H}_2\text{O}} \\ &\quad + (x - 12.5)(\bar{h}_{1100} - \bar{h}_{298})_{\text{O}_2} + (3.76 x)(\bar{h}_{1100} - \bar{h}_{298})_{\text{N}_2} \end{aligned}$$

با مراجعه به جداول A-۶ و A-۱۸M به دست می آوریم

$$\begin{aligned} H_P &= (8)(-393520 + 38894) + (9)(-241820 + 30167) \\ &\quad + (x - 12.5)(26217) + (3.76 x)(24757) \quad (d) \\ &= -5069598 + 119303 x \text{ kJ} \end{aligned}$$

با معادل قرار دادن (c) و (d) نتیجه می گیریم

$$-208450 + 57239 x = -5069598 + 119303x$$

$$x = 78.32$$

و

$$c = x - 12.5 = 65.82$$

برای احتراق با نسبت صحیح شیمیایی  $x = ۱۲/۵$ ، بنابراین درصد هوای تئوری برابر

$$\text{درصد} = \frac{۷۸/۲۲}{۱۲/۵} = ۶۲۶ \text{ می باشد. پس نسبت هوا به سوخت برابر است با}$$

$$\text{AF} = \frac{(4.76 x)(28.97)}{114} = 94.74 \frac{\text{kg هوا}}{\text{kg سوخت}}$$

تغییر در قابلیت کاردهی برابر است با

$$\Delta B = B_P - B_R = H_P - H_R - T_0 (S_P - S_R) \quad (e)$$

اما  $H_P = H_R$  در نتیجه

$$\Delta B = - T_0 (S_P - S_R) \quad (e)$$

واکنش در ۴ atm صورت می‌گیرد، در نتیجه باید مقادیر آنتروپی مندرج در جدول را با توجه به آن تغییر دهیم. رفتار گاز را ایده آل فرض می‌کنیم. برای واکنش‌کننده‌ها

$$\begin{aligned} \text{C}_8\text{H}_{18} : \quad \bar{s} &= \bar{s}^\circ - R \ln\left(\frac{4.0}{1.0}\right) \\ &= 466.73 - (8.314) \ln(4) = 455.2 \text{ kJ/kg.mol.K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{هوا} : \quad \bar{s} &= (28.97) [\phi_{710} - (0.287) \ln(4) + 4.1869] \\ &= (28.97) [3.4014 - (0.287) \ln(4) + 4.1869] \\ &= 208.31 \text{ kJ/kg.mol.K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_R &= (1)(455.2) + (4.76)(78.32)(208.31) \\ &= 78113 \text{ kJ/K} \end{aligned} \quad (f)$$

جهت تعیین آنتروپی محصولات ابتدا کسرهای مولی و فشارهای جزئی اجزا را به دست می‌آوریم. تعداد کل مولهای محصولات برابر است با

$$n_P = a + b + c + 3.76 x = 377.3 \quad (g)$$

کسرهای مولی برابر مقادیر زیر است

$$\begin{aligned} x_{\text{CO}_2} &= \frac{8}{377.3} = 0.0212 & x_{\text{O}_2} &= \frac{65.82}{377.3} = 0.17445 \\ x_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{9}{377.3} = 0.02385 & x_{\text{N}_2} &= \frac{294.48}{377.3} = 0.78049 \end{aligned}$$

فشارهای جزئی با ضرب این مقادیر در فشار کلی ۴ atm به دست می آید. با استفاده از جدول A-۱۸M متوجه می شویم که فشار مرجع ۰/۱ MPa است و ۱ atm و ۰/۱۰۱۳۲ MPa نیست. آنتروپیهای مطلق نیز در این جداول گنجانده شده است و تنها باید به تصحیح برای فشارهای جزئی واقعی پرداخت. بنابراین از رابطه زیر استفاده می کنیم:

$$\bar{s} = \bar{s}(\text{جدول}) - R \ln \frac{P}{P_{ref}}$$

بنابراین برای محصولات در ۱۱۰۰ K

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 : \bar{s} &= 274.55 - 8.314 \ln \left[ \frac{(4)(0.10132)(0.0212)}{0.1} \right] \\ &= 294.96 \text{ kJ/kg.mol.K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O} : \bar{s} &= 236.694 - 8.314 \ln \left[ \frac{(4)(0.10132)(0.02385)}{0.1} \right] \\ &= 256.12 \text{ kJ/kg.mol.K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{O}_2 : \bar{s} &= 246.922 - 8.314 \ln \left[ \frac{(4)(0.10132)(0.17445)}{0.1} \right] \\ &= 249.8 \text{ kJ/kg.mol.K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{N}_2 : \bar{s} &= 231.302 - 8.314 \ln \left[ \frac{(4)(0.10132)(0.78049)}{0.1} \right] \\ &= 221.73 \text{ kJ/kg.mol.K} \end{aligned}$$

پس آنتروپی کل محصولات برابر است با

$$\begin{aligned} S_P &= S_{\text{CO}_2} + S_{\text{H}_2\text{O}} + S_{\text{O}_2} + S_{\text{N}_2} \\ &= (8)(294.96) + (9)(256.12) + (65.82)(249.8) + (294.48)(221.73) \\ &= 86402 \text{ kJ/K} \end{aligned}$$

سپس از معادله (e)

$$\Delta B = - (298)(86402 - 78113) = - 2470122 \text{ kJ}$$

کار حداکثر خروجی برابر منفی این مقدار است یا

$$\dot{W}_{max} = 2470122 \text{ kJ}$$

کار واقعی خروجی برابر صفر است در نتیجه برگشت ناپذیری برابر است با

$$\dot{I} = \dot{W}_{max} - \dot{W}_{act} = 2470122 \text{ kJ/kg.mol سوخت}$$

برای یک مول سوخت جرم واکنش کننده‌ها برابر است با

$$m_R = (1)(114) + (4.76)(78.32)(28.97) = 10914 \frac{\text{kg واکنش کننده‌ها}}{\text{kg.mol سوخت}}$$

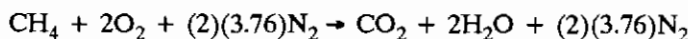
بنابراین جواب دیگر برای برگشت ناپذیری برابر خواهد بود با

$$\dot{I} = \frac{2470122}{10914} = 226.31 \text{ kJ/kg واکنش کننده‌ها} = 97.26 \text{ Btu/lbm واکنش کننده‌ها}$$

### مثال ۸-۱۰ برگشت ناپذیری در واکنش احتراق

متان گازی در  $77^\circ\text{F}$  با هوای تئوری در  $77^\circ\text{F}$  می‌سوزد و جهت گرم کردن سیال دیگری به کار می‌رود. دمای خروجی محصولات احتراق  $340^\circ\text{F}$  است. برگشت ناپذیری این فرآیند را محاسبه کنید. فرض کنید که فرآیند در  $1 \text{ atm}$  صورت می‌گیرد و کمترین دمای دسترس پذیر  $77^\circ\text{F}$  است.

**حل:** معادله احتراق تئوری متان عبارت است از



انتالپی واکنش کننده‌ها برای  $1 \text{ mol}$  متان برابر است با

$$H_R = \bar{h}_{\text{CH}_4} = -32210 \text{ Btu} \quad (-33981 \text{ kJ}) \quad (a)$$

برای محصولات

$$\begin{aligned}
 H_P &= H_{\text{CO}_2} + H_{\text{H}_2\text{O}} + H_{\text{N}_2} \\
 &= (1)[-169290 + 6552.9 - 403.2]_{\text{CO}_2} \\
 &\quad + (2)[-104040 + 6396.9 - 4258.3]_{\text{H}_2\text{O}} \\
 &\quad + (7.52)[0 + 5564.4 - 3729.5]_{\text{N}_2} \\
 &= -166767 - 203803 + 13798 \\
 &= -356771 \text{ Btu} \quad (-376390 \text{ kJ})
 \end{aligned}$$

بنابراین حرارت آزاد شده برابر است با

$$\begin{aligned}
 Q &= H_R - H_P = 324562 \text{ Btu/lbm mol سوخت} \\
 &= 20285 \text{ Btu/lbm سوخت} \quad (c)
 \end{aligned}$$

جهت محاسبه برگشت ناپذیری باید تابع قابلیت کاردهی برای جریانات ورودی و خروجی را محاسبه نماییم، یعنی باید تعیین کنیم

$$b = h - T_0 s \quad (d)$$

که انتالپی شامل انرژی تشکیل است. آنتروپیها باید از رابطه زیر محاسبه شود

$$\bar{s} = \bar{s}^\circ - R \ln \frac{P}{P_{ref}} \quad (e)$$

فشار مرجع برای مقادیر  $\bar{s}^\circ$  جدول ۱ atm است. فرض می‌کنیم که متان و هوا در ۱ atm وارد می‌شوند. آنتروپی متان برابر است با

$$\bar{s}_{\text{CH}_4} = \bar{s} (77^\circ\text{F در}) = 44.5 \text{ Btu/lbm.mol.}^\circ\text{R}$$

آنتروپی هوا را می‌توان از کسرهای مولی اکسیژن و نیتروژن و آنتروپیهای مرجع مربوطه محاسبه کرد. برای یک مول هوا داریم

$$x_{\text{O}_2} = \frac{1}{4.76} = 0.21 \quad x_{\text{N}_2} = \frac{3.76}{4.76} = 0.79$$

و آنتروپی در  $77^{\circ}\text{F}$  با استفاده از معادله (e) محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}\bar{s} &= 0.21 \bar{s}_{\text{O}_2} + 0.79 \bar{s}_{\text{N}_2} \\ &= 0.21 (48.982 - 1.986 \ln 0.21) + 0.79 (45.743 - 1.986 \ln 0.79) \\ &= 47.444 \text{ Btu/lbm.mol.}^{\circ}\text{R}\end{aligned}$$

فرض می‌کنیم که کل محصولات در  $1 \text{ atm}$  می‌باشند و هر جزء در فشار جزئی خودش موجود است. فشار جزئی بر حسب کسرهای مولی محاسبه می‌شود. تعداد کل مولهای محصولات برابر است با

$$n_{\text{کل}} = 1 + 2 + 7.52 = 10.52$$

بنابراین کسرهای مولی برابر است با

$$x_{\text{CO}_2} = \frac{1}{10.52} = 0.0951$$

$$x_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2}{10.52} = 0.1901$$

$$x_{\text{N}_2} = \frac{7.52}{10.52} = 0.7148$$

حال آنتروپی مولی اجزای محصولات در  $340^{\circ}\text{F}$  ( $170^{\circ}\text{R}$ ) با استفاده از جدول A-۱۸ و معادله (e) محاسبه می‌شود.

$$\text{CO}_2: \quad \bar{s} = 54.839 - 1.986 \ln 0.0951 = 59.512 \text{ Btu/lbm.mol.}^{\circ}\text{R}$$

$$\text{H}_2\text{O}: \quad \bar{s} = 48.316 - 1.986 \ln 0.1901 = 51.613$$

$$\text{N}_2: \quad \bar{s} = 48.552 - 1.986 \ln 0.7148 = 49.219$$

حال می‌توان توابع قابلیت کاردهی برای جریانهای مختلف واکنش‌کننده‌ها و محصولات را تعیین نمود.

واکنش‌کننده‌ها

$$\begin{aligned}\text{CH}_4: \quad (1)(h - T_0 \bar{s}) &= 1[-32210 - (537)(44.5)] \\ &= -56107\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{هوا: } (2)(4.76)(h - T_0 s) &= 9.52 [0 - (537)(47.444)] \\ &= - 242545 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{سوخت } B_R &= - 298652 \text{ Btu/lbm.mol} \\ &= - 694660 \text{ kJ/kg.mol} \end{aligned}$$

محصولات

$$\begin{aligned} \text{CO}_2: \quad 1(h - T_0 \bar{s}) &= 1[- 166767 - (537)(59.512)] \\ &= - 198725 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O}: \quad 2(h - T_0 \bar{s}) &= 2[- 101901 - (537)(51.613)] \\ &= - 259234 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{N}_2: \quad 7.52(h - T_0 \bar{s}) &= 7.52 [1834.9 - (537)(49.219)] \\ &= - 184.960 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{سوخت } B_P &= - 642919 \text{ Btu/lbm.mol} \\ &= - 1495542 \text{ kJ/kg.mol} \end{aligned}$$

بنابراین کل کاهش در قابلیت کاردهی برابر است با

$$\begin{aligned} B_R - B_P &= 344267 \text{ Btu/lbm.mol} \\ &= 800765 \text{ kJ/kg.mol} \end{aligned}$$

از آنجا که هیچ کار واقعی در فرآیند صورت نگرفته است، این کاهش مساوی با برگشت ناپذیری است

$$\begin{aligned} I &= + 344267 \text{ Btu/lbm.mol} \\ &= 21516 \text{ Btu/lbm} \\ &= 50046 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

۸-۹ تعادل<sup>۱</sup>

قانون دوم ترمودینامیک و اصل افزایش آنتروپی اساس تحلیل مسائل موجود در تعادل را فراهم می‌کنند. آنتروپی در یک سیستم منزوی همیشه به سمت بیشترین مقدار خود تمایل دارد. به این دلیل می‌گوییم که پایدارترین حالت در یک سیستم منزوی حالتی است که آنتروپی را به حداکثر خود برساند. مطلب در مورد فرآیندهای غیر آدیاباتیک به این سادگی نیست. ابتدا یک ماده ساده تراکم پذیر را در طی فرآیندی عمومی در نظر می‌گیریم که در آن تبادل حرارت و کار با محیط اطراف امکان پذیر است. تغییر کل آنتروپی جهان در این فرآیند بصورت مجموع تغییرات آنتروپی سیستم و محیط اطرافش بیان می‌شود. بدین ترتیب از اصل افزایش آنتروپی [معادله (۵-۲۲)] داریم

$$dS_0 + dS_{\text{سیستم}} > 0 \quad (۸-۱۸)$$

در این فرآیند همان طور که در شکل ۸-۴ نشان داده شده، فرض می‌کنیم که سیستم در تعادل حرارتی با محیط اطراف در دمای ثابت  $T_0$  می‌باشد. تغییر آنتروپی محیط اطراف سیستم عبارت است از

$$dS_0 = - \frac{d'Q}{T_0} \quad (۸-۱۹)$$

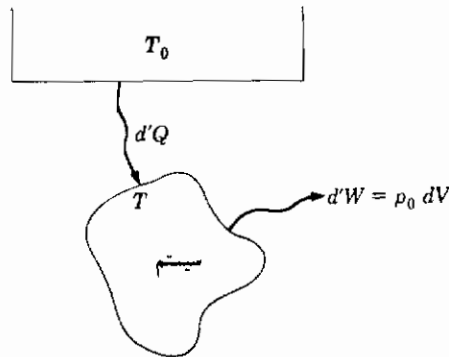
$d'Q$  حرارت منتقل شده از محیط به سیستم است. کاری که سیستم بر روی محیط انجام می‌دهد برابر  $p_0 dV$  بوده که  $p_0$  فشار محیط و  $dV$  نشان دهنده تغییر در حجم سیستم است. بنابراین انتقال حرارت به سیستم به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$d'Q = dU + p_0 dV \quad (۸-۲۰)$$

با وارد نمودن معادلات (۸-۱۹) و (۸-۲۰) در معادله (۸-۱۸) برای نامساوی رابطه زیر را به دست می‌آوریم.

$$dU_{\text{سیستم}} + p_0 dV_{\text{سیستم}} - T_0 dS_{\text{سیستم}} < 0 \quad (۸-۲۱)$$





شکل ۸-۴ تعادل ماده تراکم پذیر ساده

نامساوی بیان شده در رابطه (۸-۲۱) نمایانگر قاعده‌ای نسبتاً کلی برای تعیین جهت‌ی است که یک فرآیند برگشت‌ناپذیر اتخاذ خواهد کرد تا محتمل‌ترین حالت تعادلی را پیدا کند. در یک سیستم منزوی هیچ کاری انجام نمی‌شود ( $dV = 0$  سیستم) و تغییر انرژی داخلی وجود ندارد ( $dU = 0$  سیستم) و رابطه بالا به اصل ساده افزایش آنتروپی تبدیل می‌شود.

حال موردی ساده‌تر را در نظر می‌گیریم که در آن سیستم از نظر دما و فشار در تعادل با محیط اطراف باقی می‌ماند، یعنی  $T = T_0$  و  $p = p_0$ . سپس داریم

$$dU + p dV - T dS < 0 \quad (8-22)$$

که اینک تمام خواص مربوط به سیستم است. در واقع با نوشتن نامساوی بدین صورت، برگشت‌ناپذیریهای حاصل از عکس‌العمل داخلی با محیط اطراف را از میان برداشته‌ایم. معادله (۸-۲۲) فقط یک طریقه بهتر بیان مجدد رابطه ساده زیر برای یک فرآیند برگشت‌ناپذیر است.

$$dS \geq \frac{d'Q}{T}$$

معادله (۸-۲۲) را می‌توان خیلی راحت‌تر بر حسب توابع هلمهولتز و گیبس نوشت. با یادآوری این که

$$A = U - TS \quad (8-23)$$

$$G = H - TS = U + pV - TS \quad (۸-۲۴)$$

و

$$dA = dU - TdS - SdT \quad (۸-۲۵)$$

$$dG = dU + pdV + Vdp - TdS - SdT \quad (۸-۲۶)$$

سپس

$$dU - TdS = dA + SdT = dG - pdV - Vdp + SdT$$

و معادله (۸-۲۲) را می‌توان دوباره به صورت زیر نوشت.

$$dA + SdT + pdV < 0 \quad (۸-۲۷)$$

$$dG + SdT - Vdp < 0 \quad (۸-۲۸)$$

برای فرآیندی در دمای ثابت و حجم ثابت واضح است که تابع هلمهولتز باید به سمت کمترین مقدار خود میل کند. به همین ترتیب برای یک فرآیند فشار ثابت و دما ثابت تابع گیبس باید به سمت کمترین مقدار خود میل کند. بنابراین معیار رسیدن به تعادل را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$(dA)_{T,V} < 0 \quad (۸-۲۹)$$

$$(dG)_{T,P} < 0 \quad (۸-۳۰)$$

در این جا خواننده باید بداند که تنها آن دسته از کارهایی مورد نظر است که از نوع  $pdV$  است، یعنی کار انجام شده به وسیله یک ماده ساده تراکم پذیر.

قاعده یا اصل تعادل بیان شده بوسیله رابطه (۸-۳۰) اصل مهمی است. این اصل بسادگی می‌تواند این مطلب است که تابع گیبس در فرآیندی تحت فشار و دمای ثابت کاهش می‌یابد و کمترین مقدار آن را باید به دست آورد. پس از رسیدن به این کمترین مقدار، فرآیند متوقف می‌شود و بدون تغییر بیشتر در

تابع گیبس، تعادل به دست خواهد آمد. بدین ترتیب در حال تعادل

$$(dG)_{T,P} = 0 \quad (۸-۳۱)$$

نتیجه اصلی معادله (۸-۳۱) این است که، اگر سیستمی از یک حالت تعادل به حالت تعادل دیگری در همان دما و فشار تغییر نماید، تابع گیبس باید ثابت بماند. مثال کلاسیکی از این اصل، تعادل فازهای یک ماده خالص است. برای مثال اگر سیستمی از مایع اشباع به بخار اشباع تغییر نماید، به دست می آوریم که

$$g_f = g_g \quad (۸-۳۲)$$

با بسط توابع گیبس

$$h_f - Ts_f = h_g - Ts_g$$

یا

$$h_{fg} = Ts_{fg}$$

این همان رابطه‌ای است که قبلاً به کار برده‌ایم. همچنین می‌توانیم اصل تعادل را برای به دست آوردن مجدد رابطه کلاسیوس - کلاپرون به کار گیریم. تا وقتی که سیستمی از بخار و مایع در حال تعادل است، می‌توان نوشت:

$$dg_f = dg_g \quad (۸-۳۳)$$

هنگامی که سیستم از یک حالت اشباع تعادل به حالت اشباع تعادل دیگری تغییر می‌کند. از معادله (۸-۲۶) داریم:

$$dg = vdp - sdT$$

و

$$dg_f = v_f dp - s_f dT = dg_g = v_g dp - s_g dT \quad (۸-۳۴)$$

از جمع کردن این جملات به دست می آوریم

$$\frac{dp}{dT} = \frac{s_g - s_f}{v_g - v_f} = \frac{s_{fg}}{v_{fg}} = \frac{h_{fg}}{Tv_{fg}} \quad (۸-۳۵)$$

کاربرد معادله (۸-۳۵) در سیستمهای یک-جزئی همان طور که در فصلهای قبلی توضیح داده شد، نسبتاً ساده است.

جهت به دست آوردن معیار تعادل در مخلوطی متشکل از چند جزء معادله (۸-۳۱) را بسادگی مجدداً به صورت زیر می نویسیم

$$d\left(\sum_i n_i \bar{g}_i\right)_{T,p} = 0 \quad (۸-۳۶)$$

$n_i$  تعداد مول‌های جزء  $i$  و  $\bar{g}_i$  تابع گیبس مولی آن جزء است. معادله (۸-۳۶) به عنوان پایه و اساس کار ما برای تعیین غلظت‌های تعادل در واکنشهای شیمیایی می باشد.

برای محاسبه تابع گیبس یک ماده باید یک حالت مبنای استاندارد برای آن تروپی و همین طور انتالی انتخاب نمود. روش معمول انتخاب همان مبنا یا مرجعی است که برای انتالی تشکیل به کار بردیم، یعنی ۱ atm فشار و  $25^\circ\text{C}$  ( $77^\circ\text{F}$ ). لذا

$$\bar{g}_f^\circ = \bar{h}_f^\circ - T_0 \bar{s}^\circ \quad (۸-۳۷)$$

$T_0$  برابر  $25^\circ\text{C}$  در نظر گرفته می شود. مقادیر  $\bar{g}_f^\circ$  و  $\bar{s}^\circ$  برای چندین ماده در جدول A-۶ قسمت ضمایم داده شده است. همچنین می توان علامت  $\bar{g}^\circ$  را برای نشان دادن تابع گیبس در یک حالت مبنایی تعریف شده به کار برد.

## ۸-۱۰ تعادل شیمیایی گازهای ایده آل

واکنش ساده‌ای شامل چهار گاز ایده آل را در نظر بگیرید:



$A_1$  و  $A_2$  معرف واکنش کننده‌ها و  $A_3$  و  $A_4$  بیانگر محصولات است. مقادیر  $v$  بر طبق شرایط لازم برای تعادل در دما و فشار واکنش تعیین می گردد. برای ارزیابی این کمیت‌های مولی شرایط تعادل ارائه شده در

معادله (۸-۳۶) را به کار خواهیم گرفت. ابتدا نشان می‌دهیم که چگونه تابع گیبس برای یک گاز ایده‌آل محاسبه می‌شود. داریم:

$$dg = vdp - sdT \quad (۸-۳۹)$$

اگر فرض کنیم که فشار بر حسب واحد اتمسفر بیان شده و مقادیر تابع گیبس در حالت استاندارد  $\bar{g}^\circ$  معلوم است، در آن صورت می‌توان از معادله (۸-۳۸) انتگرال گرفت تا نتیجه زیر به دست آید.

$$\bar{g} - \bar{g}^\circ = \int_{p=1}^p \bar{v}dp - \int_{T_{ref}}^T \bar{s}dT \quad (۸-۴۰)$$

سپس تابع گیبس در دمای مبنا به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$g - g^\circ = \int_{p=1}^p Vdp = \int_{p=1}^p \mathcal{R}T \frac{dp}{p} = \mathcal{R}T \ln p \quad (۸-۴۱)$$

در هر دو معادله (۸-۴۰) و (۸-۴۱) حالت مبنا را در فشار ۱ atm انتخاب می‌کنیم.

حال شرایط فیزیکی ارائه شده توسط معادله (۸-۳۸) را در نظر می‌گیریم. واکنش به سمت راست پیش رفته، اجزای ۱ و ۲ به طور دائم تقلیل می‌یابد در حالی که محصولات ۳ و ۴ تولید می‌شود. تابع گیبس مخلوط در طی این فرآیند به طور دائم در حال کاهش است. در نهایت تابع گیبس به کمترین مقدار خود رسیده و تعادل برقرار می‌گردد. اگر واکنش مذکور در دما و فشار ثابت ادامه یابد در آن صورت معادله (۸-۳۶) بیانگر شرط تعادل است و این رابطه معادل آن است که بگوییم، در حال تعادل

$$dG_{محصولات} = dG_{واکنش‌کننده‌ها}$$

یا

$$dG_{کل} = 0$$

درجه واکنش یا تجزیه

وقتی که واکنشی شامل نسبت‌های استوکیومتری به سمت تکامل پیش می‌رود، فقط  $A_3$  و  $A_4$  ظاهر شده و  $A_1$  و  $A_2$  به طور کامل مصرف می‌شود. اگر نسبت‌های استوکیومتری موجود نباشد حتی در

صورتی که واکنش به سمت تکامل پیش برود ممکنست مقداری از واکنش کننده‌ها باقی بمانند. اصطلاح درجه واکنش<sup>۱</sup>،  $\varepsilon$ ، نشان دهنده آن است که چه مقدار واکنش به سمت تکامل پیش رفته است و معمولاً بر حسب یکی از اجزای اولیه تعریف می‌شود. بر اساس جزء ۱

$$\varepsilon = \frac{n_{1, \text{حداکثر}} - n_1}{n_{1, \text{حداقل}} - n_{1, \text{حداکثر}}} \quad (۸-۴۲)$$

$n_1$  تعداد مولهای موجود جزء ۱ در مخلوط، حداکثر  $n_{1, \text{حداکثر}}$ ، معمولاً تعداد مولها در شروع واکنش و حداقل  $n_{1, \text{حداقل}}$  تعداد مولها در خاتمه واکنش است. در حالتی که فقط یک جزء اولیه وجود دارد،  $\varepsilon$  درجه تجزیه یا تفکیک<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. اگر یک جزء اولیه بتنهایی یونیزه گردد،  $\varepsilon$  درجه یونیزاسیون<sup>۳</sup> است. درک این موضوع مهم است که در خاتمه واکنش الزاماً واکنش کننده‌ها به‌طور کامل مصرف نشده‌اند. واکنش استوکیومتری برای احتراق کربن را در نظر بگیرید :



واضح است که اگر برای هر مول کربن بیشتر از یک مول اکسیژن وجود داشته باشد تمام آن مصرف نخواهد شد. برای مثال می‌توانیم رابطه زیر را داشته باشیم.



در این مورد بیشترین و کمترین تعداد مولهای  $\text{O}_2$  بترتیب ۲ و ۱ بوده و این مقادیر به‌همراه معادله (۸-۴۲) برای محاسبه درجه واکنش به کار می‌رود.

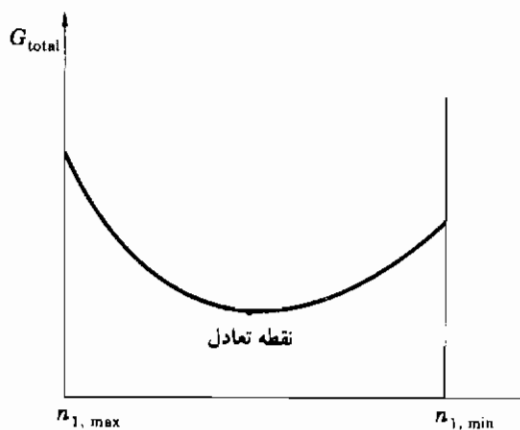
حال برگردیم به موضوع تعادل، می‌توان تصور کرد که واکنش مورد نظر همان طور که در شکل ۸-۵ نشان داده شده در دمای ثابت پیش رود.

$$\left( \frac{\partial G}{\partial n_1} \right)_T = 0 \quad (۸-۴۵)$$

1- Degree of reaction

2- Degree of dissociation

3- Degree of ionization



شکل ۸-۵ رفتار تابع گیبس در حالت تعادل

اگر معادله (۸-۳۸) مخلوطی استوکیومتری است،  $v$  ها به طریقی مرتب شده‌اند که حداکثر  $n_1$  تعداد مولهای اولیه و حداقل  $n_1$  برابر صفر است چون اجزای اولیه به طور کامل مصرف شده‌اند. بعضی عملیات جبری نشان می‌دهد که تغییر در تعداد مولهای هر کدام از اجزا تابعی خطی از تعداد مولهای اولیه،  $v$  ها، و تغییر در درجه واکنش می‌باشد. بدین ترتیب

$$dn_1 = -v_1 d\varepsilon$$

$$dn_2 = -v_2 d\varepsilon$$

$$dn_3 = v_3 d\varepsilon$$

$$dn_4 = v_4 d\varepsilon$$

بنابراین معادله (۸-۳۶) را می‌توان به صورت زیر نوشت :

$$d(\sum_i n_i \bar{g}_i)_{T,P} = (\sum_i \bar{g}_i dn_i)_{T,P} = 0$$

یا

$$(-\bar{g}_1 v_1 - \bar{g}_2 v_2 + \bar{g}_3 v_3 + \bar{g}_4 v_4) d\varepsilon = 0 \quad (۸-۴۶)$$

## انرژی آزاد

با استفاده از معادله (۸-۴۱) برای تابع گیبس در دمای مبنا، رابطه بالا به صورت زیر در می آید

$$\begin{aligned} & - \Re T (\nu_3 \ln p_3 + \nu_4 \ln p_4 - \nu_1 \ln p_1 - \nu_2 \ln p_2) \\ & = \nu_3 \bar{g}_3^\circ + \nu_4 \bar{g}_4^\circ - \nu_1 \bar{g}_1^\circ - \nu_2 \bar{g}_2^\circ \end{aligned} \quad (8-47)$$

گروه جملات سمت راست این معادله به طور وضوح عبارت است از اختلاف بین توابع گیبس استاندارد محصولات و واکنش کننده ها، و گاهی اوقات تغییر انرژی آزاد<sup>۱</sup> نامیده و با علامت  $\Delta G^\circ$  مشخص می شود. یکبار دیگر باید توجه کنیم  $\bar{g}^\circ$  برای حالت مبنای مشخصی تعریف گردیده که در این مورد حالت مبنا را فشار ۱ atm و دمای مخلوط انتخاب خواهیم نمود. پس در حقیقت

$$\Delta G^\circ = f(T, p_0)$$

$p_0$  فشار مبناست که برابر ۱ اتمسفر انتخاب می شود.

حال معادله (۸-۴۷) به صورت خیلی مختصر زیر نوشته می شود.

$$- \Re T \ln \frac{p_3^{\nu_3} p_4^{\nu_4}}{p_1^{\nu_1} p_2^{\nu_2}} = \Delta G^\circ \quad (8-48)$$

ثابت تعادل<sup>۲</sup>

ثابت تعادل  $K_p$  را به صورت زیر تعریف می کنیم

$$K_p = \frac{p_3^{\nu_3} p_4^{\nu_4}}{p_1^{\nu_1} p_2^{\nu_2}} \quad (8-49)$$

به طوری که

$$\Delta G^\circ = - \Re T \ln K_p \quad (8-50)$$

معادله (۸-۵۰) قانون فعالیت جرم خوانده می شود. جدولهای ۸-۳ و ۸-۴ مقادیر ثابت

1- Free energy change

2- Equilibrium constant

3- Law of mass action



جدول ۸-۳. تگاریتم در مبنای ۱۰ ثابت تعادل  $K_p$ 

T, K	$K_p = p_2^2 p_4^2 / p_1^2 p_3^2$ برای واکنش $v_1 A_1 + v_2 A_2 \rightleftharpoons v_3 A_3 + v_4 A_4$									
	$H_2 \rightleftharpoons 2H$	$O_2 \rightleftharpoons 2O$	$N_2 \rightleftharpoons 2N$	$H_2O(g) \rightleftharpoons H_2 + HO_2$	$H_2O(g) \rightleftharpoons OH + \dot{H}$	$CO_2 \rightleftharpoons CO + \dot{O}_2$	$NO_2 \rightleftharpoons NO + \dot{O}_2$	$CO_2 + H_2 \rightleftharpoons CO + H_2O(g)$		
298	-71.226	-81.208	-159.600	-40.048	-46.054	-45.066	-15.171	-5.018		
500	-40.318	-45.880	-92.672	-22.886	-26.130	-25.025	-8.783	-2.139		
1000	-17.292	-19.614	-43.056	-10.062	-11.280	-10.221	-4.062	-0.159		
1500	-9.514	-10.790	-26.434	-5.735	-6.284	-5.316	-2.487	+0.409		
1800	-6.896	-7.836	-20.874	-4.270	-4.613	-3.693	-1.962	+0.577		
2000	-5.582	-6.356	-18.092	-3.540	-3.776	-2.884	-1.699	+0.656		
2200	-4.502	-5.142	-15.810	-2.942	-3.091	-2.226	-1.484	+0.716		
2400	-3.600	-4.130	-13.908	-2.443	-2.520	-1.679	-1.305	+0.764		
2500	-3.202	-3.684	-13.070	-2.224	-2.270	-1.440	-1.227	+0.784		
2600	-2.836	-3.272	-12.298	-2.021	-2.038	-1.219	-1.154	+0.802		
2800	-2.178	-2.536	-10.914	-1.658	-1.624	-0.825	-1.025	+0.833		
3000	-1.606	-1.898	-9.716	-1.343	-1.265	-0.485	-0.913	+0.858		
3200	-1.106	-1.340	-8.664	-1.067	-0.951	-0.189	-0.815	+0.878		
3500	-0.462	-0.620	-7.312	-0.712	-0.547	+0.190	-0.690	+0.902		
4000	+0.400	+0.340	-5.504	-0.238	-0.011	+0.692	-0.524	+0.930		
4500	+1.074	+1.086	-4.094	+0.133	+0.408	+1.079	-0.397	+0.946		
5000	+1.612	+1.686	-2.962	+0.430	+0.741	+1.386	-0.296	+0.956		

Source: JANAF Thermochemical Tables [1] and Selected Values of Chemical Thermodynamic Properties [2].

جدول ۸-۴ لگاریتم در مبنای ۱۰ ثابتهای تعادل برای یونیزاسیون Na و Cs محاسبه شده از معادله ساها

$T, K$	$Na \rightleftharpoons Na^+ + e^-$	$Cs \rightleftharpoons Cs^+ + e^-$
298	-32.3	-25.1
400	-24.3	-17.5
600	-14.6	-10.0
800	-9.58	-6.15
1000	-6.54	-3.79
1200	-4.47	-2.18
1400	-2.97	-1.010
1600	-1.819	-0.108
1800	-0.913	+0.609
2000	-0.175	+1.194
2200	+0.438	+1.682
2400	+0.956	+2.098
2600	+1.404	+2.46
2800	+1.792	+2.77
3000	+2.13	+3.05
3200	+2.44	+3.29
3500	+2.84	+3.62
4000	+3.38	+4.07
4500	+3.82	+4.43
5000	+4.18	+4.73

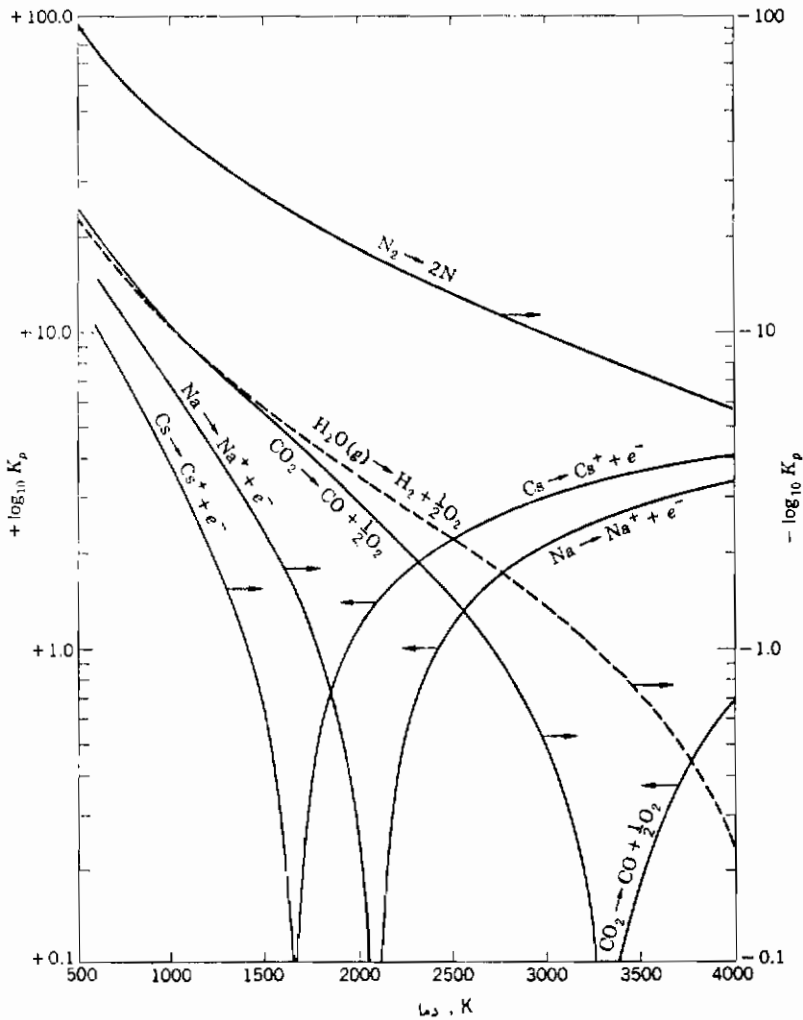
تعادل را به صورت تابعی از دما برای چندین واکنش ساده فهرست نموده است و شکل ۸-۶ نمایش ترسیمی ثابت تعادل برای تعدادی از این واکنش ها را نشان می دهد.

برای حالتی که فشار ثابت است  $\Delta G^\circ$  فقط تابعی از خواص اجزای مخلوط در دمای  $T$  بوده و در نتیجه ثابت تعادل نیز فقط تابع دما می باشد. مجدداً تأکید می کنیم که این معادلات برای گازهای کامل است. خواننده باید در بررسی این مطلب توجه کند که

۱- فشار بر حسب اتمسفر بیان می شود.

۲- مقادیر  $\nu$  به کار گرفته شده برای محاسبه ثابت تعادل، مقادیر استوکیومتری برای واکنش مورد نظر است.

فشارهای جزئی اجزای واکنش را در حالت تعادل می توان بر حسب کسرهای مولی این اجزا و فشار کل بیان کرد. بدین ترتیب



شکل ۸-۶ ثابتهای تعادل برای چندین واکنش

$$P_i = x_i P_{\text{کل}}$$

و رابطه ثابت تعادل به صورت زیر در می آید.

$$K_p = \frac{x_3^{\nu_3} x_4^{\nu_4}}{x_1^{\nu_1} x_2^{\nu_2}} P_{\text{کل}}^{\nu_3 + \nu_4 - \nu_1 - \nu_2} \quad (۸-۵۱)$$

در یک بررسی اجمالی جدول ۸-۳ می‌توان مشاهده کرد که برای واکنشهای ساده، ثابت تعادل با دما افزایش می‌یابد. این مطلب بر حسب معادله (۸-۳۸) بدان معنی است که هرچه دما بالاتر می‌رود این واکنشها بیشتر به سمت تکامل پیش می‌روند.

واضح است که مقدار  $\Delta G^\circ$  به دما بستگی دارد و بنابراین ثابت تعادل به تعادل واکنش مورد نظر در دمایی که  $\Delta G^\circ$  در آن دما تعیین شده و به فشار مخلوط بستگی دارد.

### مثال ۸-۱۱

ترکیبهای تعادل را برای تجزیه  $\text{CO}_2$  به  $\text{CO}$  و  $\text{O}_2$  در  $3200\text{ K}$  و  $1\text{ atm}$  تعیین کنید. همچنین درجه واکنش (یا درجه تجزیه) را تعیین نمایید.

**حل:** معادله شیمیایی برای تجزیه عبارت است از



باید توجه نمود که این معادله نشان دهنده ضرایب استوکیومتری به کار رفته برای محاسبه ثابت تعادل می‌باشد. بنابراین اگر معادله (a) را مجدداً به صورت زیر بنویسیم



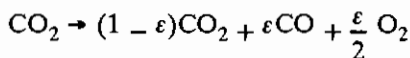
ثابت تعادل را می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

$$K_p = \frac{x_{\text{CO}}^{\nu_3} \times x_{\text{O}_2}^{\nu_4}}{x_{\text{CO}_2}^{\nu_1}} P^{\nu_3 + \nu_4 - \nu_1} \quad \text{که } \nu_1 = 1, \nu_3 = 1, \nu_4 = \frac{1}{2} \text{ و } P = 1\text{ atm}$$

$$K_p = \frac{x_{\text{CO}} x_{\text{O}_2}^{1/2}}{x_{\text{CO}_2}} (1)^{1/2} \quad (c)$$

از جدول ۸-۲ داریم  $\log K_p = -0.189$  و  $K_p = 0.647$ . هرچه واکنش به پیش می‌رود دیگر

نسبتهای استوکیومتری را در مخلوط نداریم. به عبارت دیگر  $\nu_1 \neq 1$ ،  $\nu_3 \neq 1$  و غیره. در عوض تجزیه  $\text{CO}_2$  را تا یک درجه  $\varepsilon$  داریم، به طوری که



بنابراین تعداد کل مولها در مخلوط تعادل برابر است با

$$n_{\text{کل}} = (1 - \varepsilon) + \varepsilon + \frac{\varepsilon}{2} = 1 + \frac{\varepsilon}{2} \quad (d)$$

به طوری که کسرهای مولی در حالت تعادل عبارت است از

$$x_{\text{CO}_2} = \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon/2}$$

$$x_{\text{CO}} = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon/2}$$

$$x_{\text{O}_2} = \frac{\varepsilon/2}{1 + \varepsilon/2}$$

با استفاده از معادله (c) به دست می آوریم

$$K_p = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon/2} \left( \frac{\varepsilon/2}{1 + \varepsilon/2} \right)^{1/2} / \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon/2}$$

یا

$$K_p^2 = \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2(2 + \varepsilon)} = (0.647)^2 \quad (e)$$

معادله (e) را می توان از طریق روشهای تکراری حل کرد تا  $\varepsilon$  به دست آید.

$$\varepsilon = 0.578$$

غلظتهای تعادل عبارت است از :

$$\frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon/2} = 0.327 \quad \text{برای } \text{CO}_2$$

$$\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon/2} = 0.448 \quad \text{برای } \text{CO}$$

$$\frac{\varepsilon/2}{1 + \varepsilon/2} = 0.225 \quad \text{برای } O_2$$

## مثال ۸-۱۲

$CO_2$  در فشار ثابت ۱ atm از  $77^\circ F$  تا  $3200\text{ K}$  گرم می‌شود. حرارت لازم به‌ازای هر مول را محاسبه و آن را با انرژی گرمایشی لازم در صورتی که هیچ گونه تجزیه‌ای وجود نمی‌داشت، مقایسه کنید.

**حل:** قبلاً درجه تفکیک یا تجزیه برای  $CO_2$  را در این دما در مثال ۸-۱۱ تعیین کرده‌ایم. موازنه انرژی کلی عبارت است از

$$H_R + Q = H_P \quad (a)$$

که واکنش‌کننده ۱ مول  $CO_2$  و محصولات مواد  $CO_2$ ،  $CO$  و  $O_2$  در غلظتهای معین است که از مثال ۸-۱۱ تعیین می‌گردد. تعداد مولهای کل محصولات برابر  $1/289 = 1 + \frac{0.578}{2} = 1 + \frac{\varepsilon}{2}$  و تعداد مولهای هر کدام از اجزای محصولات برابر است با

$$n_{CO_2} = 1 - \varepsilon = 0.422$$

$$n_{CO} = \varepsilon = 0.578$$

$$n_{O_2} = \frac{\varepsilon}{2} = 0.289$$

چون واکنش‌کننده‌ها در  $77^\circ F$  هستند

$$H_R = \bar{h}_{CO_2}^\circ = -169290 \text{ Btu/lbm.mol}$$

دمای محصولات برابر با  $5760^\circ R = 3200\text{ K}$  و بالاترین دمای موجود در جداول گازها A-۱۸ برابر  $5300^\circ R$  می‌باشد. بهر حال گرماهای ویژه بین این دو دما را می‌توان با تقریب مناسبی ثابت فرض نمود، و مقادیر زیر را در  $5760^\circ R$  از طریق برون‌یابی در جدولها به‌دست آورد.

$$\bar{h}_{\text{CO}_2} = 75257 \text{ Btu/lbm.mol} \quad (175273 \text{ kJ/kg.mol})$$

$$\bar{h}_{\text{CO}} = 47147 \text{ Btu/lbm.mol} \quad (109659 \text{ kJ/kg.mol})$$

$$\bar{h}_{\text{O}_2} = 49283 \text{ Btu/lbm.mol} \quad (114626 \text{ kJ/kg.mol})$$

انتالپی کل محصولات برابر است با

$$\begin{aligned} H_P &= (0.422)(\bar{h}^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{537})_{\text{CO}_2} \\ &\quad + (0.578)(\bar{h}^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{537})_{\text{CO}} \\ &\quad + (0.289)(\bar{h}_T - \bar{h}_{537})_{\text{O}_2} \\ &= (0.422)(-169290 + 75357 - 4030) \\ &\quad + (0.578)(-47540 + 47147 - 3730) \\ &\quad + (0.289)(49283 - 3725) \\ &= -30557 \text{ Btu/mol} \quad \text{واکنش کننده} \quad (-71072 \text{ kJ/mol}) \end{aligned}$$

انتقال حرارت از معادله (a) برابر است با

$$Q = H_P - H_R = -30557 - (-169290) = 138733 \text{ Btu/lbm.mol}$$

اگر هیچ گونه تجزیه‌ای وجود نمی‌داشت، مقدار گرمایش  $\text{CO}_2$  را می‌توانستیم از طریق داده‌های موجود در جداول گازها به صورت زیر محاسبه کنیم.

$$\begin{aligned} Q &= \bar{h}_T - \bar{h}_{537} = \bar{h}_{5760} - \bar{h}_{537} = 75357 - 4030 \\ &= 71327 \text{ Btu/lbm.mol} \quad (165899 \text{ kJ/kg.mol}) \end{aligned}$$

برای تجزیه  $\text{CO}_2$  انرژی اضافه‌ای برابر با  $138733 - 71327 = 67406 \text{ Btu/lbm.mol}$  لازم است.

با توجه به این مثال مشاهده می‌کنیم که اثرات تجزیه در یک فرآیند احتراق، باعث تولید دمای احتراق پایین‌تری نسبت به دمای شعله آدیاباتیک محاسبه شده در غیاب هر گونه تجزیه‌ای، می‌باشد. وقتی که تجزیه هم وجود دارد قسمتی از حرارت حاصله از احتراق در واکنشهای تجزیه جذب می‌شود و

بدین ترتیب انرژی کمتری برای گرم نمودن محصولات تا دمای بالاتر در دسترس است.

### مثال ۱۳-۸

ترکیبهای تعادل را برای یونیزاسیون سزیم در  $2000\text{ K}$  و فشار  $1\text{ atm}$  تعیین کنید.

**حل:** معادله شیمیایی برای یونیزاسیون عبارت است از



بر حسب ضرایب استوکیومتری



و ثابت تعادل به صورت زیر بیان می شود.

$$K_p = \frac{x_{\text{Cs}}^{\nu_3} + x_e^{\nu_4}}{x_{\text{Cs}}^{\nu_1}} p^{\nu_3 + \nu_4 - \nu_1}$$

داریم  $\nu_1 = \nu_3 = \nu_4 = 1$  به طوری که

$$K_p = \frac{x_{\text{Cs}} x_e}{x_{\text{Cs}}} \quad (c)$$

از جدول ۸-۳ داریم  $\log K_p = 1/194$  و  $K_p = 15/63$ . برای واکنش ناقص داریم:



$\varepsilon$  درجه واکنش است.

بدین ترتیب تعداد کل مولها در مخلوط تعادل برابر است با

$$n_{\text{کل}} = (1 - \varepsilon) + \varepsilon + \varepsilon = 1 + \varepsilon$$

و کسرهای مولی در حالت تعادل عبارت است از



$$x_{\text{Cs}} = \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon}$$

$$x_{\text{Cs}^+} = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}$$

$$x_{e^-} = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}$$

جایگزینی این روابط در معادله (c) منجر می‌شود به

$$K_p = \frac{[\varepsilon/(1 + \varepsilon)][\varepsilon/(1 + \varepsilon)]}{(1 - \varepsilon)/(1 + \varepsilon)} = \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon^2}$$

با جایگزینی  $K_p = ۱۵/۶۳$  نتیجه می‌گیریم که

$$\varepsilon = 0.97$$

غلظتهای حالت تعادل عبارت است از :

$$\frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} = 0.0152 \quad \text{برای Cs}$$

$$\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} = 0.492 \quad \text{برای Cs}^+$$

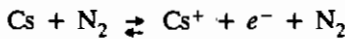
$$\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} = 0.492 \quad \text{برای } e^-$$

با توجه به این نتایج بدیهی است که یونیزاسیون سزیم در  $۲۰۰۰\text{ K}$  تقریباً کامل است.

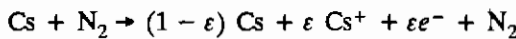
## ۸-۱۱ اثرات گازهای بی‌اثر

در مخلوطی از چند گاز معمولاً فقط یکی از اجزا به علت سطح دمای مخلوط وارد یک فرآیند تجزیه می‌شود. برای چنین حالتی سایر اجزای مخلوط در طی واکنش بدون تغییر می‌ماند. به هر حال وجود آنها بر محاسبه نسبت‌های مولی و فشارهای جزئی برای اجزای واکنش‌کننده اثر داشته و بدین ترتیب بر غلظتهای تعادل نهایی هم تأثیر می‌گذارد. برای مثال مخلوطی از ۱ مول سزیم و ۱ مول نیتروژن

در  $2000\text{ K}$  داریم. سزیم در این دما تقریباً به طور کامل یونیزه است اما تجزیه نیتروژن در این دما امکان پذیر نیست ( $\log K_p = -18/0.92$ ). بنابراین خواهیم داشت:



با استفاده از درجه واکنش  $\varepsilon$  بر اساس مصرف Cs



بنابراین تعداد کل مول‌ها در مخلوط برابر است با

$$n_{\text{کل}} = (1 - \varepsilon) + \varepsilon + \varepsilon + 1 = 2 + \varepsilon$$

برای مخلوطی از ۱ مول Cs و ۲ مول  $\text{N}_2$  مقدار  $n_{\text{کل}}$  برابر  $3 + \varepsilon$  است و به همین ترتیب نسبتهای مولی کمیت‌های به کار رفته در ثابت تعادل نیز تغییر می‌یابد به طوری که

$$x_{\text{Cs}} = \frac{1 - \varepsilon}{2 + \varepsilon} \quad x_{\text{Cs}^+} = \frac{\varepsilon}{2 + \varepsilon}$$

$$x_{e^-} = \frac{\varepsilon}{2 + \varepsilon}$$

می‌توانیم این مقادیر را در معادله (c) مثال ۱۳-۸ وارد کنیم تا به دست آوریم

$$K_p = \frac{[\varepsilon/(2 + \varepsilon)][\varepsilon/(2 + \varepsilon)]}{(1 - \varepsilon)/(2 + \varepsilon)} = \frac{\varepsilon^2}{2 - \varepsilon - \varepsilon^2}$$

با انجام محاسبه عددی در  $2000\text{ K}$ ، از مثال ۱۳-۸ داریم  $K_p = 15/63$ ، لذا از حل معادله بالا مقدار  $\varepsilon$  در حضور یک گاز بی اثر بدست می‌آید

$$\varepsilon = 0.98$$

اختلاف زیادی بین این نتیجه و مقدار  $0.97$  برای یونیزاسیون خالص سزیم وجود ندارد زیرا یونیزاسیون در هر دو مورد تقریباً کامل است. برای مقایسه بیشتر خوب است که محاسبه را در دمای پایین‌تر، مثلاً  $1400\text{ K}$ ، انجام دهیم.

برای سزیم در  $K = ۱۴۰۰$ ،  $\log K_p = - ۱/۰۱۰$  و  $K_p = ۰/۰۹۷۷$  برای یونیزاسیون خالص از مثال ۱۳-۸ داریم:

$$K_p = \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon^2}$$

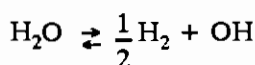
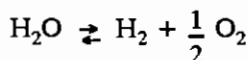
و با وارد نمودن مقدار عددی  $K_p$

$$\varepsilon = 0.298$$

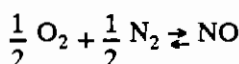
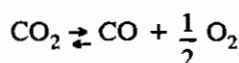
در صورت وجود یک مول نیتروژن در مخلوط مقدار  $\varepsilon$  برابر خواهد بود با  $\varepsilon = ۰/۳۷۸$ . بنابراین در دمای پایین تر تفاوت فاحشی در درجه یونیزاسیون سزیم بسته به حضور یا عدم حضور یک گاز بی اثر وجود دارد.

## ۱۲-۸ تعادل در واکنشهای چند تایی

بخش قبلی نشان داد که چگونه می توان اصول تعادل را برای محاسبه درجه واکنش فرآیندهای مربوط به گازهای ایده آل و یونیزاسیون به کار برد. حال وضعیت را با قرار دادن گازهای اضافی در مخلوط مورد نظر پیچیده تر می کنیم به طوری که بیشتر از یک واکنش ممکن است صورت پذیرد. مثالی از چنین واکنشهای چند تایی، تجزیه  $H_2O$  توسط دو واکنش زیر می باشد.



مثال دیگر تجزیه توأم  $CO_2$  و  $N_2$  است.



برای هر دو واکنش در حالت کلی می توان نوشت:

$$v_1 A_1 + v_2 A_2 \rightleftharpoons v_3 A_3 + v_4 A_4 \quad (۸-۵۲)$$

$$v_5 A_1 + v_6 A_6 \rightleftharpoons v_7 A_7 + v_8 A_8 \quad (۸-۵۳)$$

واکنش کننده  $A_1$  را به صورت مشترک در هر دو معادله و احتمالاً با نسبت استوکیومتری متفاوت در نظر می گیریم، بدین معنی که  $v_1$  الزاماً برابر با  $v_5$  نیست. معادله (۸-۵۲) را به عنوان واکنش ۱ و معادله (۸-۵۳) را به عنوان واکنش ۲ با درجه های واکنش مربوطه آنها  $\varepsilon_1$  و  $\varepsilon_2$  مشخص می کنیم. هر دو درجه واکنش بر مبنای مصرف واکنش کننده  $A_1$  در هر معادله است. برای واکنش ۱ داریم

$$\begin{aligned} dn_1 &= -v_1 d\varepsilon_1 & dn_3 &= +v_3 d\varepsilon_1 \\ dn_2 &= -v_2 d\varepsilon_1 & dn_4 &= +v_4 d\varepsilon_1 \end{aligned}$$

در حالی که برای واکنش ۲

$$\begin{aligned} dn_1 &= -v_5 d\varepsilon_2 & dn_7 &= +v_7 d\varepsilon_2 \\ dn_6 &= -v_6 d\varepsilon_2 & dn_8 &= +v_8 d\varepsilon_2 \end{aligned}$$

برای واکنشهای توأم، مصرف کل واکنش کننده  $A_1$  برابر است با

$$dn_1 = -v_1 d\varepsilon_2 - v_5 d\varepsilon_2$$

در حالی که سایر اجزا مستقل باقی می ماند. حال می توان معادله (۸-۳۶) را به عنوان شرط لازم برای تعادل در دما و فشار ثابت در نظر گرفت و نوشت:

$$(\sum \bar{g}_i dn_i)_{T,p} = 0$$

یا

$$\begin{aligned} (-\bar{g}_1 v_1 - \bar{g}_2 v_2 + \bar{g}_3 v_3 + \bar{g}_4 v_4) d\varepsilon_1 \\ + (-\bar{g}_1 v_5 - \bar{g}_6 v_6 + \bar{g}_7 v_7 + \bar{g}_8 v_8) d\varepsilon_2 = 0 \end{aligned} \quad (۸-۵۴)$$

از آن جاکه مخلوط را مخلوط گاز ایده آل فرض کرده ایم می توانیم معادله (۸-۴۱) را برای بیان تابع

گیس در دمای مینا به کار بریم به طوری که دو رابطه مشابه با فرمول مربوط به یک واکنش متقرد به دست می آوریم.

$$- \mathcal{R}T \ln \left( \frac{p_3^{\nu_3} p_4^{\nu_4}}{p_1^{\nu_1} p_2^{\nu_2}} \right) = \Delta G^\circ_1 \quad (۸-۵۵)$$

$$- \mathcal{R}T \ln \left( \frac{p_7^{\nu_7} p_8^{\nu_8}}{p_1^{\nu_5} p_6^{\nu_6}} \right) = \Delta G^\circ_2 \quad (۸-۵۶)$$

که انرژیهای آزاد عبارت است از

$$\Delta G^\circ_1 = \nu_3 \bar{g}^\circ_3 + \nu_4 \bar{g}^\circ_4 - \nu_1 \bar{g}^\circ_1 - \nu_2 \bar{g}^\circ_2 \quad (۸-۵۷)$$

$$\Delta G^\circ_2 = \nu_7 \bar{g}^\circ_7 + \nu_8 \bar{g}^\circ_8 - \nu_5 \bar{g}^\circ_1 - \nu_6 \bar{g}^\circ_6 \quad (۸-۵۸)$$

معادلات (۸-۵۴) و (۸-۵۵) را می توان در فرم ثابت تعادل به صورت زیر مرتب کرد.

$$\ln K_{p_1} = \frac{-\Delta G^\circ_1}{\mathcal{R}T} \quad (۸-۵۹)$$

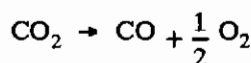
$$\ln K_{p_2} = \frac{-\Delta G^\circ_2}{\mathcal{R}T} \quad (۸-۶۰)$$

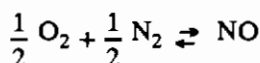
می دانیم هر دو ثابت تعادل را می توان بر حسب نسبت های مولی اجزای واکنش بر طبق معادله (۸-۵۱) بیان کرد. برای به دست آوردن غلظت های تعادلی دو معادله غیر خطی باید به طور همزمان حل شود. این مسأله برای سیستم هایی شامل چندین واکنش همزمان عملاً دشوار و بهترین روش برای حصول نتایج، محاسبات کامپیوتری است.

### مثال ۸-۱۴

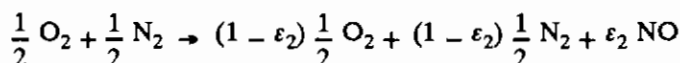
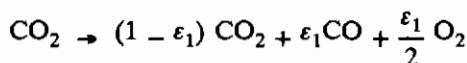
غلظت های حالت تعادل را برای دو واکنش زیر در ۱ atm و ۳۰۰۰ K محاسبه کنید در صورتی

که واکنشها با ۱ مول  $\text{CO}_2$ ،  $\frac{1}{4}$  مول  $\text{O}_2$  و  $\frac{1}{4}$  مول  $\text{N}_2$  شروع شوند.

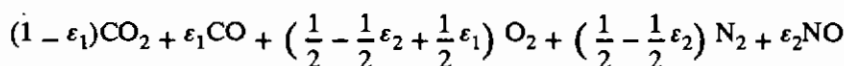




حل: دو واکنش تجزیه عبارت است از:



که  $\varepsilon_1$  و  $\varepsilon_2$  درجه واکنش‌هاست. مخلوط تعادل عبارت از جمع جمله‌های سمت راست این معادلات است یا



بنابراین تعداد کل مولها در مخلوط تعادل برابر است با

$$\begin{aligned} n_{\text{کل}} &= 1 - \varepsilon_1 + \varepsilon_1 + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \varepsilon_2 + \frac{1}{2} \varepsilon_1 + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \\ &= 2 + \frac{1}{2} \varepsilon_1 \end{aligned}$$

و کسرهای مولی در حالت تعادل عبارت است از

$$x_{\text{CO}_2} = \frac{1 - \varepsilon_1}{2 + \varepsilon_1/2}$$

$$x_{\text{CO}} = \frac{\varepsilon_1}{2 + \varepsilon_1/2}$$

$$x_{\text{O}_2} = \frac{1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_1}{4 + \varepsilon_1}$$

$$x_{\text{N}_2} = \frac{1 - \varepsilon_2}{4 + \varepsilon_1}$$

$$x_{\text{NO}} = \frac{\varepsilon_2}{2 + \varepsilon_1/2}$$

در ۳۰۰۰ K داریم

$$\log K_{p_1} = -0.485 \quad K_{p_1} = 0.3272 \quad (\text{CO}_2)$$

$$\log K_{p_2} = -0.913 \quad K_{p_2} = 0.1222 \quad (\text{O}_2, \text{N}_2)$$

چون واکنش در ۱ atm صورت می‌گیرد لذا معادله (۸-۵۱) را به کار برده و به دست می‌آوریم

$$K_{p1} = 0.3273 = \left( \frac{\varepsilon_1}{2 + \varepsilon_1/2} \right)^1 \left( \frac{1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_1}{4 + \varepsilon_1} \right)^{1/2} / \left( \frac{1 - \varepsilon_1}{2 + \varepsilon_1/2} \right)^1 \quad (a)$$

و

$$K_{p2} = 0.1222 = \left( \frac{\varepsilon_2}{2 + \varepsilon_1/2} \right)^1 / \left( \frac{1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_1}{4 + \varepsilon_1} \right)^{1/2} \left( \frac{1 - \varepsilon_2}{4 + \varepsilon_1} \right)^{1/2} \quad (b)$$

حال برای به دست آوردن مقادیر  $\varepsilon_1$  و  $\varepsilon_2$  باید معادلات (a) و (b) به طور همزمان حل گردد. نتایج عبارت است از

$$\varepsilon_1 = 0.3736 \quad \varepsilon_2 = 0.05644$$

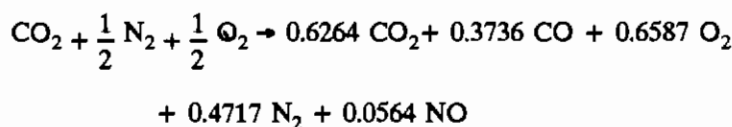
و کسرهای مولی نتیجه شده در حالت تعادل به صورت زیر به دست می‌آید.

$$x_{\text{CO}_2} = 0.2864 \quad x_{\text{CO}} = 0.1708$$

$$x_{\text{O}_2} = 0.3012 \quad x_{\text{N}_2} = 0.2157$$

$$x_{\text{NO}} = 0.0258$$

واکنش مولی نهایی به صورت زیر است:



### ۸-۱۳ معادله وانت هوف<sup>۱</sup>

بحث خود را درباره ثابتهای تعادل گسترش داده و به رابطه بسیار مفیدی بین انتالپی واکنش و ثابت تعادل برای واکنش در فشار ثابت دست می‌یابیم. حال علائم  $K_p$  را برای مشخص کردن ثابت تعادل

در فشار کل  $p$  و  $\Delta G^\circ(T, p_0)$  برای مشخص کردن انرژی آزاد گیبس مربوطه به کار می‌بریم. سپس معادله (۸-۵۰) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\Delta G^\circ(T, p_0) = - \Re T \ln K_p \quad (۸-۶۱)$$

مشتق‌گیری نسبت به  $T$  در  $p$  ثابت به دست می‌دهد:

$$\frac{d(\Delta G^\circ)}{dT} = - \Re T \frac{1}{K_p} \frac{dK_p}{dT} - \Re \ln K_p$$

که مجدداً مرتب شده و با معادله (۸-۶۱) ادغام گردیده است تا رابطه زیر به دست آید

$$\frac{dK_p}{dT} = \frac{K_p}{\Re T^2} \left[ \Delta G^\circ(T, p_0) - T \frac{d(\Delta G^\circ)}{dT} \right] \quad (۸-۶۲)$$

انرژی آزاد گیبس را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T \Delta S^\circ \quad (۸-۶۳)$$

از معادله (۶-۱۵b) می‌دانیم که

$$dg = -s dT + v dp$$

لذا برای واکنشی در فشار ثابت

$$\frac{dg}{dT} = -s$$

و

$$\frac{d(\Delta G^\circ)}{dT} = -\Delta S^\circ \quad (۸-۶۴)$$

حال از جایگزین کردن معادلات (۸-۶۳) و (۸-۶۴) در معادله (۸-۶۲) نتیجه می‌گیریم که

$$\frac{dK_p}{dT} = \frac{K_p}{\Re T^2} \Delta H^\circ$$

یا به شکل لگاریتمی چنین نوشته می‌شود:



$$\frac{d(\ln K_p)}{dT} = \frac{\Delta H^\circ(T, p_0)}{RT^2} \quad (۸-۶۵)$$

که حال مجدداً برای تأکید بر فشار مبنا  $p_0$  را داخل نموده ایم.

معادله (۸-۶۵) معادله فشار ثابت و انت هوف نامیده شده که معادله بسیار مفیدی است زیرا محاسبه تغییر انتالپی در یک واکنش را از روی ترکیبهای حالت تعادل که خود توسط  $K_p$  تعیین می گردند، میسر می سازد. بالعکس موازنه های انرژی بر روی واکنشها ممکن است اطلاعات مهمی درباره تغییر  $K_p$  با دما به دست دهد. آرایش معادله (۸-۶۵) را به صورت تابعی از  $\frac{1}{T}$  مجدداً تغییر می دهیم. پس

$$\frac{d(\ln K_p)}{d(1/T)} = \frac{-\Delta H^\circ(T, p_0)}{R} \quad (۸-۶۶)$$

معادله (۸-۶۶) نشان می دهد که در نمودار  $\ln K_p$  بر حسب  $\frac{1}{T}$ ، شیب منحنی بیانگر مقدار  $\Delta H^\circ/R$  می باشد.

برای بیشتر واکنشها مقدار  $\Delta H^\circ$  در محدوده نسبتاً وسیعی از دما تقریباً ثابت است. در چنین مواردی می توان از معادله (۸-۶۵) بین دماهای  $T_1$  و  $T_2$  انتگرال گیری نمود تا رابطه زیر به دست آید.

$$\ln \left( \frac{K_{p_2}}{K_{p_1}} \right) = \frac{\Delta H^\circ}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (۸-۶۷)$$

و اگر مقدار  $K_{p_1}$  در  $T_1$  معلوم باشد محاسبه مقدار  $K_{p_2}$  در دمای  $T_2$  کار ساده ای است.

معادله وانت هوف در تعیین رفتار گرمایی یا گرماگیری یک واکنش نیز ممکن است مفید باشد. اگر ثابت تعادل با دما افزایش یابد، یعنی  $K_{p_2} > K_{p_1}$  برای  $T_2 > T_1$ ، معادله (۸-۶۵) نشان می دهد که  $\Delta H^\circ$  باید مثبت و واکنش گرماگیر باشد. در صورتی که  $K_p$  با افزایشی در دما کاهش یابد،  $\Delta H^\circ$  منفی و واکنش گرمازا است.

### مثال ۸-۱۵

انتالپی واکنش را برای تشکیل CO و  $O_2$  از  $CO_2$  در  $2000\text{ K}$  تخمین بزنید.

**حل:** برای این منظور معادله وانت هوف را بکار می بریم و فرض می کنیم که انتالپی واکنش در

محدوده K تا ۲۲۰۰ K ثابت است. از جدول ۸-۳

$$T_1 = 1800 \text{ K} = 3240^\circ\text{R} \quad \log K_{p_1} = -3.693 \quad K_{p_1} = 2.028 \times 10^{-4}$$

$$T_2 = 2200 \text{ K} = 3960^\circ\text{R} \quad \log K_{p_2} = -2.226 \quad K_{p_2} = 1.306 \times 10^{-3}$$

بنابراین

$$\log \left( \frac{K_{p_2}}{K_{p_1}} \right) = -2.226 - (-3.693) = 1.467$$

و

$$\frac{K_{p_2}}{K_{p_1}} = 29.309$$

$\Delta H^\circ$  را در میانگین بین ۱۸۰۰ K و ۲۲۰۰ K یعنی در ۲۰۰۰ K تعیین می‌کنیم و با تغییر آرایش معادله (۸-۶۷) نتیجه می‌گیریم:

$$\begin{aligned} \Delta H &= \frac{R \ln (K_{p_2}/K_{p_1})}{(1/T_1) - (1/T_2)} \\ &= \frac{(1545) \ln (29.309)}{(1/3240 - 1/3960)(778)} \\ &= 119500 \text{ Btu/lbm.mol} \quad (277943 \text{ kJ/kg.mol}) \end{aligned}$$

## ۸-۱۴ پتانسیل شیمیایی و تعادل فازی

مخلوط همگنی از اجزای مختلف را در نظر بگیرید که ترکیب آن ممکن است در اثر تغییری در دما، فشار یا سایر خواص متمرکز تغییر نماید. اگر تعداد  $i$  جزء وجود داشته باشد، انرژی داخلی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

$$U = U(S, V, n_1, n_2, \dots, n_i) \quad (۸-۶۸)$$

تغییر بسیار جزئی در انرژی داخلی توسط رابطه زیر داده می‌شود:

$$dU = \left( \frac{\partial U}{\partial S} \right)_{V, n_i} dS + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_{S, n_i} dV + \sum_i \left( \frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{V, S, n_j} dn_i \quad (۸-۶۹)$$

روشن است که برای مخلوطی شامل یک جزء یا مخلوطی که ترکیب آن تغییر نمی‌کند،  $dn_i = 0$  است و معادله (۸-۶۹) با رابطه آشنای زیر ساده می‌شود.

$$dU = TdS - pdV$$

که در نتیجه داریم

$$T = \left( \frac{\partial U}{\partial S} \right)_{V, n_i} \quad -P = \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_{S, n_i} \quad (۸-۷۰)$$

مشتقات جزئی در جمله مجموعه معادله (۸-۶۹) به عنوان پتانسیل شیمیایی  $\mu_i$  تعریف شده است:

$$\mu_i = \left( \frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{V, S, n_j} \quad n_j \neq n_i \quad (۸-۷۱)$$

حال می‌توان معادله (۸-۶۹) را دو باره به صورت زیر نوشت:

$$dU = T dS - p dV + \sum_i \mu_i dn_i \quad (۸-۷۲)$$

برای سایر توابع ترمودینامیکی روابطی مشابه با معادله (۸-۷۲) می‌توان به دست آورد. تابع گیبس را برای مخلوطی در نظر بگیرید که فرض می‌کنیم دارای شکل زیر باشد.

$$G = G(p, T, n_1, n_2, \dots, n_i)$$

سپس

$$dG = \left( \frac{\partial G}{\partial p} \right)_{T, n_i} dp + \left( \frac{\partial G}{\partial T} \right)_{p, n_i} dT + \sum_i \left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{p, T, n_j} dn_i \quad (۸-۷۳)$$

برای مخلوطی با ترکیب ثابت از فصل ۶ [معادله (۶-۱۶b)] داریم

$$V = \left( \frac{\partial G}{\partial p} \right)_{T, n_i} \quad -S = \left( \frac{\partial G}{\partial T} \right)_{p, n_i} \quad (۸-۷۴)$$

به طوری که معادله (۸-۷۳) به صورت زیر در می‌آید.

$$dG = V dp - S dT + \sum_i \left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T, p, n_j} dn_i \quad (۸-۷۵)$$

حال برای یک جزء

$$\begin{aligned} dG &= dH - T dS - S dT \\ &= dU + p dV + V dp - T dS - S dT \end{aligned} \quad (۸-۷۶)$$

مساوی قرار دادن  $dG$  به دست آمده از معادلات (۸-۷۵) و (۸-۷۶) و مقایسه با معادله (۸-۷۲) نشان می دهد که

$$\mu_i = \left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T, p, n_j} \quad n_j \neq n_i \quad (۸-۷۷)$$

که در نتیجه داریم

$$dG = V dp - S dT + \sum_i \mu_i dn_i \quad (۸-۷۸)$$

به همین ترتیب توابع انتالپی و هلمهولتز به صورت زیر بیان می شود.

$$dH = T dS + V dp + \sum_i \mu_i dn_i \quad (۸-۷۹)$$

$$dA = - S dT + p dV + \sum_i \mu_i dn_i \quad (۸-۸۰)$$

بنابراین روابط معادل زیر را برای پتانسیل شیمیایی داریم :

$$\mu_i = \left( \frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{V, S, n_j} = \left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T, p, n_j} = \left( \frac{\partial A}{\partial n_i} \right)_{T, V, n_j} \quad (۸-۸۱)$$

حال روابط بین پتانسیلهای شیمیایی را در حالتی بررسی می کنیم که یک مخلوط در حال تعادل چندین جزء ممکن است در بیشتر از یک فاز وجود داشته باشد. به طور کلی یک مخلوط می تواند دارای فازهای زیادی باشد اما در عمل غالباً شاید فقط دو یا سه فاز موجود باشد. برای تعادل در فشار و دمای ثابت داریم

$$dG_{T, p} = 0 \quad (۸-۸۲)$$

تابع گیبس کل از جمع توابع گیبس برای هر فاز تشکیل می‌شود. فرض می‌کنیم که فازها همگن بوده تا بتوانیم دلایل استفاده شده در به دست آوردن پتانسیل شیمیایی را در مورد آنها اعمال کنیم. به خاطر سادگی مخلوطی از دو جزء  $a$  و  $b$  را در دو فاز ۱ و ۲ در نظر بگیرید. برای سیستم بسته‌ای متشکل از چند فاز که در آن انتقال جرم بین فازها صورت می‌گیرد خواهیم داشت:

$$n_{a1} + n_{a2} = n_{a, \text{کل}} = \text{ثابت}$$

$$n_{b1} + n_{b2} = n_{b, \text{کل}} = \text{ثابت}$$

یا در فرم دیفرانسیلی

$$dn_{a1} + dn_{a2} = 0 \quad (۸-۸۳)$$

$$dn_{b1} + dn_{b2} = 0 \quad (۸-۸۴)$$

اگر هر دو فاز همگن باشد، تابع گیبس را برای هر کدام از فازها می‌توان بر طبق معادله (۸-۷۸) نوشت:

$$dG_1 = Vdp - SdT + \mu_{a1}dn_{a1} + \mu_{b1}dn_{b1} \quad (۸-۸۵)$$

$$dG_2 = Vdp - SdT + \mu_{a2}dn_{a2} + \mu_{b2}dn_{b2} \quad (۸-۸۶)$$

حال برای تعادل در  $T$  و  $p$  ثابت

$$dG|_{T, p} = dG_1|_{T, p} + dG_2|_{T, p} = 0 \quad (۸-۸۷)$$

ادغام معادلات (۸-۸۳) و (۸-۸۷) نتیجه می‌دهد:

$$(\mu_{a1} - \mu_{a2}) dn_{a1} + (\mu_{b1} - \mu_{b2}) dn_{b1} = 0$$

که نشان دهنده این است که برای تعادل در  $T$  و  $p$  ثابت

$$\mu_{a1} = \mu_{a2} \quad \mu_{b1} = \mu_{b2} \quad (۸-۸۸)$$

می‌توانیم تجزیه و تحلیل مذکور را برای حالت کلی  $i$  جزء و  $k$  فاز تعمیم داده و برای تعادل بین فازها

که همگی در فشار و دمای یکسانی هستند، پیدا کنیم که

$$\mu_{i1} = \mu_{i2} = \dots = \mu_{ik} \quad (۸-۸۹)$$

به عبارت ساده تر برای تعادل در دما و فشار ثابت باید پتانسیل شیمیایی در کلیه فازها دارای مقدار یکسانی باشد.

حال یک فاز خالص را یعنی فازی که فقط از یک جزء تشکیل شده در نظر می گیریم. تغییر در تابع گیبس در  $T$  و  $p$  ثابت از معادله (۸-۷۸) در رابطه زیر خلاصه می شود.

$$dG_{T,p} = \mu \, dn \quad (۸-۹۰)$$

که نشان می دهد تغییر در تابع گیبس باید از یک افزایش در جرم فاز مورد نظر (افزایش در  $dn$ ) ناشی شود. چون تابع گیبس کل  $G$  مستقیماً متناسب با تعداد کل مولها در فاز است لذا داریم

$$\mu = \frac{G}{n} = \bar{g} \quad (۸-۹۱)$$

یا به طور خیلی ساده، پتانسیل شیمیایی برای یک فاز خالص برابر تابع گیبس مولی برای آن فاز است. به عنوان مثال ساده ای در این مورد، می توان دید که برای تعادل یک ماده خالص (نظیر آب) در  $T$  و  $p$  ثابت توابع گیبس در هر کدام از فازها باید برابر باشد همان طور که قبلاً در معادله (۸-۳۲) اشاره کرده ایم.

## ۸-۱۵ قانون فاز گیبس<sup>۱</sup>

از بحث فوق بسادگی می توان دریافت که تعیین خواص مخلوطهایی که ممکن است در چندین فاز وجود داشته باشند کار پیچیده ای است و حتی تعداد خواص لازم برای تثبیت حالت مخلوط بسادگی روشن نیست. یکی از مشهورترین روابط ترمودینامیکی قانون فازی است که جاشوا ویلارد گیبس<sup>۲</sup> در

1- Gibbs phase rule

2- Josiah Willard Gibbs

سال ۱۸۷۵ ارائه کرده است که اینک به شرح آن می‌پردازیم. فرض کنید که این مخلوط از  $C$  جزء تعداد  $P$  فاز تشکیل شده است. برای تعادل در دما و فشار ثابت بر طبق معادله (۸-۷۸) برای هر فاز می‌نویسیم

$$dG|_{T,P} = \sum_i \mu_i dn_i = 0 \quad (۸-۹۲)$$

بدین ترتیب تعداد  $C$  مقدار  $\mu_i$  خواهیم داشت که فقط تعداد  $C - ۱$  آنها مستقل است زیرا معادله مذکور تحت این محدودیت قرار دارد که تعداد کل مولها برای یک سیستم بسته مقدار ثابتی است. به جز این برای تثبیت حالت سیستم برای یک فاز انتخاب  $T$  و  $P$  را نیز در اختیار داریم یا به عبارتی تعداد

$$(C - 1) + 2 = C + 1$$

خواص مستقل خواهیم داشت. فشار و دما در معادله‌های نوشته شده برای هر فاز یکسان است، پس متغیرهای مستقل جدیدی را به وجود نمی‌آورد ولی بر اثر شرایط بیان شده در معادله (۸-۸۹) محدودیت‌های اضافی دیگری به وجود آمده است. بدین ترتیب برای دو فاز محدودیت زیر را اضافه می‌کنیم که

$$\mu_{i1} = \mu_{i2}$$

برای سه فاز دو محدودیت زیر را داریم که

$$\mu_{i1} = \mu_{i2} = \mu_{i3}$$

و به طور کلی برای  $P$  فاز تعداد  $P - ۱$  از این نوع محدودیتها وجود دارد. تعداد کل درجات آزادی  $F$  یا تعداد متغیرهای یک سیستم با در نظر گرفتن تمام عوامل عبارت است از

$$F = C + 1 - (P - 1) = C - P + 2 \quad (۸-۹۳)$$

این قانون فازگیس است و یک کاربرد سریع آن در مورد سیستم ساده آب مؤید اعتبار آن است. در

منطقه اشباع بخار-آب دو فاز ( $P = ۲$ ) و یک جزء ( $C = ۱$ ) وجود دارد لذا

$$F = 1 - 2 + 2 = 1$$

یعنی برای نگهداشتن حالت تعادل فقط یک خاصیت متمرکز را می توان به طور مستقل تغییر داد. معمولاً دما یا فشار اشباع انتخاب می گردد. وقتی که سه فاز در حال تعادلند،

$$F = 1 - 3 + 2 = 0$$

که نشان می دهد هیچ گونه انتخابی برای تغییر این حالت تعادل وجود ندارد. البته این حالت دقیقاً موردی است که در نقطه سه گانه وجود دارد. در منطقه ای حاوی یک فاز مثلاً یک گاز یا بخار، و ماده ای شامل یک جزء دارای

$$F = 1 - 1 + 2 = 2$$

است یا به عبارتی دو خاصیت وجود دارد که می توان آنها را به طور مستقل تغییر داد. این البته موردی است که در باره یک گاز ایده آل یا بخار داغ می دانیم و معمولاً برای تعریف حالت سیستم، فشار و دما به عنوان متغیرهای مستقل انتخاب می شوند.

#### قانون فاز برای واکنشهای شیمیایی

اگر برای اجزای مختلف امکان شرکت در واکنشهای شیمیایی با یکدیگر وجود داشته باشد، موضوع تعادل فازی پیچیده می گردد زیرا بسته به میزان پیشرفت واکنش اجزای گوناگون ممکن است مصرف یا ایجاد گردند. فرض کنید  $N_c$  تعداد مواد شیمیایی موجود در کل سیستم باشد. برای هر معادله تعادل واکنش از تعداد خواص متمرکز مستقل یکی کاسته می شود، اگر تعداد  $r$  معادله واکنش وجود داشته باشد، تعداد اجزای  $C$  استفاده شده در قانون فاز به صورت زیر در می آید.

$$C = N_c - r \quad (۸-۹۴)$$

بنابراین در مفهوم عمومی،  $C$  عبارت است از کمترین تعداد مواد شیمیایی که می تواند کل سیستم



را به وجود آورد. سپس قانون فاز به صورت زیر در می آید.

$$F = (N_c - r) - P + 2 \quad (۸-۹۵)$$

### مثال ۸-۱۶

برای مثال یک مخلوط در حال تعادل از کربن جامد (C(s)، O<sub>۲</sub>، CO و CO<sub>۲</sub> را در دماهای بالا در نظر بگیرید که امکان وقوع واکنشهای شیمیایی در آن وجود دارد. دو فاز گاز و جامد موجود است لذا  $P = ۲$ . معادلات واکنش برای تشکیل مواد شیمیایی عبارت است از



چون تصریح کرده ایم که اکسیژن و منواکسید کربن هر دو در سیستم وجود دارند، هیچکدام را نمی توان از معادلات واکنش حذف نمود، به عنوان مثال:



بنابراین باید حداقل دو معادله واکنش داشته باشیم، لذا  $r = ۲$ . مقدار  $N_c$  برابر ۴ است لذا

$$C = N_c - r = 4 - 2 = 2$$

سپس قانون فاز نتیجه می دهد

$$F = C - P + 2 = 2 - 2 + 2 = 2$$

### ۸-۱۶ قانون سوم ترمودینامیک

در تحلیل بیشتر واکنشهای شیمیایی تثبیت یک حالت مرجع یا مبنا برای آنالیز ضروری است. در مواقعی که فقط با یک جزء سر و کار داریم همیشه می توانیم یک تراز مبنای دلخواه را انتخاب

کنیم. برای جدولهای مرسوم بخار آب،  $32^{\circ}\text{F}$  به عنوان مبنا انتخاب شده است. پلانک<sup>۱</sup> براساس شواهدات ترنست<sup>۲</sup> و دیگران قانون سوم ترمودینامیک را در ۱۹۱۲ چنین بیان نمود:

آنتروپی کلیه جامدات بلورین کامل در دمای صفر مطلق برابر صفر است.

بلور "کامل" بلوری است که در تعادل ترمودینامیکی قرار دارد. در نتیجه قانون سوم معمولاً در شکل عمومی تر آن چنین بیان می‌گردد:

با نزدیک شدن دمای مطلق به صفر، آنتروپی هر ماده خالصی که در تعادل ترمودینامیکی قرار دارد به سمت صفر میل می‌کند.

اهمیت قانون سوم روشن است. این قانون مبنایی برای محاسبه آنتروپیهای مطلق مواد فراهم می‌کند که می‌توان بعداً آنها را در معادلات مناسبی برای تعیین جهت پیشرفت واکنشهای شیمیایی به کار برد.

بارها در مقالات علمی گزارش داده‌اند که محاسبات بر مبنای قانون سوم با تجربه و آزمایش سازگار نیست. مع‌هذا می‌توان در تمامی موارد این ناسازگاری را بر اساس "ناخالصی" بودن ماده مورد نظر تفسیر نمود، یعنی ممکن است ۲ یا چند ایزوتوپ موجود بوده، یا ملکولهای مختلفی وجود داشته و یا این که توزیع ملکولها به صورت غیر تعادلی باشد. در چنین مواردی بیشتر از یک حالت کوانتومی در صفر مطلق وجود دارد و آنتروپی به سمت صفر میل نمی‌کند.

## ۱۷-۸ مفهوم بیشترین مقدار کار

به عنوان یک بخش اضافی در این فصل به محاسبه بیشترین مقدار کاری که یک سیستم می‌تواند در ضمن تغییر از یک حالت تعادل به حالت تعادل دیگر انجام دهد، می‌پردازیم. این موضوع با تعریف قابلیت کاردهی که شرح آن در فصل پنجم رفته است، مربوط می‌باشد اما تبادل داخلی کار بین

1- Planck

2- Nernst

سیستم و محیط اطرافش را نیز در بر می‌گیرد. چون برای ما بیشترین مقدار کار خروجی یک فرآیند مهم است، کار را موقعی مثبت می‌دانیم که به وسیله سیستم انجام شده باشد. سیستم بسته‌ای را در نظر بگیرید که از محیط اطرافش در دمای ثابت  $T$  حرارت دریافت می‌کند. سیستم به مقدار  $d'W$  کار انجام می‌دهد که قسمتی از آن ممکن است کار  $pdV$  باشد. از قانون اول

$$d'W = d'Q - dU \quad (۸-۹۶)$$

از اصل افزایش آنتروپی داریم

$$dS_0 + dS_{\text{بسیستم}} \geq 0 \quad (۸-۹۷)$$

و تغییر در آنتروپی برای محیط اطراف توسط رابطه زیر داده می‌شود.

$$dS_0 = - \frac{d'Q}{T_0} \quad (۸-۹۸)$$

از جایگزین کردن معادله (۸-۹۸) در (۸-۹۷) و سپس در (۸-۹۶) نتیجه می‌گیریم که

$$d'W = d'Q - dU \leq T_0 dS - dU \quad (۸-۹۹)$$

$dS$  مربوط به سیستم است. علامت نامساوی برای فرآیندهای برگشت ناپذیر و علامت مساوی برای فرآیندهای برگشت پذیر به کار می‌رود. اگر کل فرآیند شامل سیستم و محیط اطراف آن برگشت پذیر باشد باید هیچ انتقال حرارتی در محدوده یک اختلاف دمای معین وجود نداشته باشد، یعنی دمای سیستم باید مساوی دمای محیط اطراف گردد. بدین ترتیب برای  $T = T_0$ ، معادله (۸-۹۸) به صورت زیر در می‌آید.

$$d'W \leq T dS - dU \quad (۸-۱۰۰)$$

علامت نامساوی مربوط است به برگشت ناپذیریهای داخلی ممکن در سیستم. واضح است که  $d'W$  موقعی به مقدار حداکثر خود می‌رسد که علامت تساوی به کار رود لذا این فرآیند برگشت پذیر است که بیشترین مقدار کار را تولید می‌کند. پس

$$d'W_{max} = TdS - dU \quad (۸-۱۰۱)$$

بر حسب توابع هلمهولتز و گیس

$$d'W_{max} = -dA - SdT \quad (۸-۱۰۲)$$

$$d'W_{max} = -dG + Vdp + pdV - SdT \quad (۸-۱۰۳)$$

برای فرآیندی در دمای ثابت

$$(d'W_{max})_T = (-dA)_T \quad (۸-۱۰۴)$$

معادله (۸-۱۰۳) را می‌توان دوباره نوشت.

$$d'W_{max} - pdV = -dG + Vdp - SdT$$

سپس برای فرآیندی در دما و فشار ثابت

$$(d'W_{max} - pdV)_{T, p} = (-dG)_{T, p} \quad (۸-۱۰۵)$$

حال معادلات (۸-۱۰۴) و (۸-۱۰۵) به نتایج زیر منتهی می‌شود:

۱ - بیشترین مقدار کار خروجی در فرآیندی تحت دمای ثابت برابر است با کاهش تابع

هلمهولتز می‌سیستم.

۲ - بیشترین مقدار کار خروجی در فرآیندی تحت فشار و دمای ثابت، با استثنای کار  $pdV$ ،

برابر است با کاهش تابع گیس می‌سیستم.

### خودآزمایی (سؤالات مروری)

۱ - نسبت‌های استوکیومتری چیست؟

۲ - هوای اضافی را تعریف کنید.

۳ - دستگاه اُرسات برای چه منظوری به کار می‌رود؟

- ۴ - مینا یا تراز صفر انتخاب شده برای اندازه گیری سطح (تراز) انرژی مواد شیمیایی چیست؟
- ۵ - انتالپی تشکیل را تعریف کنید.
- ۶ - واکنش های گرماگیر و گرمازا را شرح دهید؟
- ۷ - چرا حرارت واکنش با انتالپی تشکیل تفاوت دارد؟
- ۸ - چه اختلافی بین ارزش حرارتی بالایی و ارزش حرارتی پایینی وجود دارد؟
- ۹ - دمای شعله آدیاباتیک را تعریف کنید. هوای اضافی چه تأثیری بر مقدار آن دارد؟ تجزیه چه اثری بر روی مقدار آن دارد؟
- ۱۰ - برای تعیین توابع گیبس استاندارد چه حالت مبنایی به کار می رود؟
- ۱۱ - شرط لازم برای تعادل واکنشی که (الف) در دما و فشار ثابت صورت می گیرد و (ب) در دما و حجم ثابت صورت می گیرد، چیست؟
- ۱۲ - درجه واکنش را تعریف کنید.
- ۱۳ - تغییر انرژی آزاد چیست؟
- ۱۴ - قانون فعالیت جرم چیست؟
- ۱۵ - ثابت تعادل را تعریف کنید.
- ۱۶ - چرا وجود گازهای بی اثر ممکن است بر روی غلظت های حالت تعادل یک جزء واکنش کننده در یک مخلوط تأثیر بگذارد؟
- ۱۷ - چگونه می توان از ایزوبار وانت هوف استفاده مفید نمود؟
- ۱۸ - قانون سوم ترمودینامیک را بیان کنید.
- ۱۹ - درباره مفهوم سطوح مینا برای خواص ترمودینامیکی بحث کنید.
- ۲۰ - قانون فاز گیبس چیست؟
- ۲۱ - درباره عواملی که بر تولید برگشت ناپذیری در فرآیندهای با واکنش های شیمیایی مؤثرند بحث کنید.

### مسائل (آحاد انگلیسی)

- ۸-۱ دمای نقطه شبنم را برای بخار آب موجود در محصولات حاصله از احتراق واکنش های زیر در فشار اتمسفر تعیین کنید:

(الف) بنزن با ۵۰ درصد هوای اضافی

(ب) پنتان با نسبت‌های صحیح شیمیایی (نسبت‌های استوکیومتری)

(ج) سوختی با نسبت‌های حجمی ۷۰ درصد  $\text{CH}_4$  و ۳۰ درصد  $\text{C}_2\text{H}_6$  توأم با ۱۰۰ درصد هوای اضافی

(د) الکل اتیلیک با ۲۰ درصد هوای اضافی

۸-۲ مخلوطی از سوخت‌های گازی در فرآیند احتراق بخصوصی به کار رفته است. تجزیه و تحلیل حجمی سوخت به صورت زیر است:

$$\text{CH}_4 = 35 \text{ درصد}$$

$$\text{C}_3\text{H}_8 = 25 \text{ درصد}$$

$$\text{C}_6\text{H}_{12} = 40 \text{ درصد}$$

تجزیه و تحلیل حجمی محصولات خشک حاصله از احتراق نتایج زیر را به دست می‌دهد:

$$\text{CO}_2 = 12 \text{ درصد}$$

$$\text{CO} = 1 \text{ درصد}$$

$$\text{O}_2 = 4 \text{ درصد}$$

$$\text{N}_2 = 83 \text{ درصد}$$

با فرض این که احتراق در فشار اتمسفر صورت گیرد، درصد هوای تئوری و نقطه شبنم محصولات را محاسبه کنید.

۸-۳ حرارت آزاد شده به ازای هر مول سوخت را در موقع سوزاندن پروپان گازی با نسبت‌های صحیح شیمیایی هوا در  $77^\circ\text{F}$  و  $1 \text{ atm}$  محاسبه کنید.

۸-۴ با استفاده از داده‌های جدول ۸-۱ ارزش حرارتی پائینی را برای پروپان مایع در  $77^\circ\text{F}$  محاسبه کنید.

۸-۵ انتالپی احتراق را برای اکتان گازی در  $540^\circ\text{F}$  محاسبه کنید.

۸-۶ انرژی آزاد شده در موقع سوزاندن  $\text{C}_{17}\text{H}_{16}$  را با اکسیژن تئوری در  $77^\circ\text{F}$  محاسبه کنید در صورتی که آب محصولات در حالت مایع باشد.

۸-۷ سوخت هیدروکربن ویژه‌ای با هوای اضافی سوزانده شده و تجزیه و تحلیل محصولات

خشک حاصله از احتراق نسبت‌های حجمی زیر را به دست می‌دهد:

$$\text{CO}_2 = 10/4 \text{ درصد}$$

$$\text{CO} = 1 \text{ درصد}$$

$$\text{O}_2 = 5 \text{ درصد}$$

$$\text{N}_2 = 83/6 \text{ درصد}$$

ترکیب تقریبی سوخت مورد نظر و درصد هوای تئوری را تخمین بزنید.

۸-۸ تجزیه و تحلیل محصولات خشک حاصله از احتراق  $\text{CH}_4$  نتیجه زیر را به دست می‌دهد. نسبت هوا-سوخت را محاسبه کنید.

$$\text{CO}_2 = 10 \text{ درصد}$$

$$\text{CO} = 0/7 \text{ درصد}$$

$$\text{O}_2 = 2 \text{ درصد}$$

$$\text{N}_2 = 87/3 \text{ درصد}$$

۸-۹ احتراق سوخت‌های مایع - اکتان، الکل میتلیک، پروپان و الکل اتیلیک را با مقدار هوای تئوری در  $77^\circ\text{F}$  در نظر بگیرید. این واکنشها را از جنبه‌های زیر مقایسه کنید:

(الف) حجم محصولات بر واحد انرژی آزاد شده

(ب) حجم هوا بر واحد انرژی آزاد شده

(ج) انرژی آزاد شده بر واحد جرم سوخت

مقایسات خود را شرح دهید.

۸-۱۰ تجزیه شدن اکسیژن دو اتمی را در نظر بگیرید. غلظتهای حالت تعادل  $\text{O}$  و  $\text{O}_2$  در  $6000^\circ\text{R}$  را برای فشارهای ۱، ۵ و ۱۰ اتمسفر محاسبه کنید.

۸-۱۱  $\text{CO}_2$  در فشار ثابت ۵ atm از  $77^\circ\text{F}$  تا  $2800^\circ\text{K}$  گرم می‌شود. انتقال حرارت این فرآیند را محاسبه و غلظتهای نهایی را در خاتمه گرمایش تعیین کنید.

۸-۱۲ فرض کنید که سیستم متابولیک انسان را می‌توان با یک واکنش احتراق ساده معادل گرفت که در  $100^\circ\text{F}$  صورت می‌گیرد. برای کل انرژی مصرفی  $3000 \text{ kcal/day}$  چه کمیتی از متان و هوا در  $20^\circ\text{C}$  برای بردن در فرآیند احتراق لازم خواهد بود؟ چه مقدار دی‌اکسید

کربن تولید خواهد شد؟

۸-۱۳ گاز پروپان با ۵۰ درصد هوای اضافی می‌سوزد. واکنش‌کننده‌ها در  $100^{\circ}\text{F}$  وارد محفظه احتراق شده و در  $1200^{\circ}\text{F}$  خارج می‌شوند. حرارت آزاد شده را به‌ازای هر مول سوخت محاسبه کنید.

۸-۱۴ اکتان مایع با مقدار معینی هوای اضافی سوزانده شده به‌طوری که دمای شعله آدیاباتیک  $1500^{\circ}\text{F}$  است. اگر واکنش‌کننده‌ها در  $77^{\circ}\text{F}$  وارد محفظه احتراق شوند درصد هوای اضافی به‌کار رفته را محاسبه کنید.

۸-۱۵ دمای شعله آدیاباتیک را برای سوختن متان گازی با هوای تئوری محاسبه کنید. احتراق را کامل فرض نمایید.

۸-۱۶ سوخت اکتان مایع در  $77^{\circ}\text{F}$  در محفظه احتراقی با ۴۰۰ درصد هوای تئوری در  $300^{\circ}\text{F}$  مخلوط می‌شود. محصولات احتراق محفظه را در  $1200^{\circ}\text{F}$  ترک می‌کنند. اتلاف حرارتی را به‌ازای هر مول سوخت محاسبه کنید.

۸-۱۷ دمای شعله آدیاباتیک را برای سوختن کربن جامد با ۲۰۰ درصد هوای تئوری تعیین کنید. درصد هوای اضافی را برای تولید دمای شعله آدیاباتیک  $2000^{\circ}\text{R}$  تعیین نمایید. احتراق را کامل فرض کنید.

۸-۱۸ انتالپی احتراق را برای متان گازی و اکتان مایع در  $77^{\circ}\text{F}$  تعیین کنید در صورتی که پراکسید هیدروژن در حالت مایع به‌عنوان اکسیدکننده برای واکنش احتراق به‌کار رود.

۸-۱۹ دمای شعله آدیاباتیک را برای سوختن هیدروژن با ۳۰۰ درصد هوای تئوری تعیین نمایید. احتراق را کامل فرض کنید.

۸-۲۰ مقدار  $1 \text{ lbm.mol/min}$  گاز بوتان با ۱۰۰ درصد هوای اضافی در یک فرآیند جریان دائم در فشار  $1 \text{ atm}$  می‌سوزد. واکنش‌کننده‌ها در  $77^{\circ}\text{F}$  وارد محفظه احتراق می‌شوند. اگر اتلاف حرارتی در فرآیند احتراق برابر  $30000 \text{ Btu/min}$  باشد، بالاترین دمایی را محاسبه کنید که کانال عبور دهنده محصولات احتراق باید برای آن دما طراحی شود.

۸-۲۱ یک گرمکن تابشی جهت استفاده در انبارهای بزرگ، بوتان گازی را با ۲۵ درصد هوای اضافی می‌سوزاند. سوخت و هوا هر دو در  $77^{\circ}\text{F}$  وارد گرمکن می‌شوند. محصولات



- ۸-۲۲ احتراق در  $1240^{\circ}\text{F}$  از دستگاه خارج می‌گردند. گرمکن چه مقدار حرارت به‌ازای هر پوند جرم سوخت از دست می‌دهد؟ این مقدار چه درصدی از ارزش حرارتی بالایی است؟ بیشترین مقدار کار را در موقع تغییر آب اشباع به بخار اشباع در  $100\text{ psia}$  در حالات زیر محاسبه کنید: (الف) در فرآیندی با دمای ثابت، (ب) در فرآیندی تحت فشار و دمای ثابت با استثنای کار  $pdV$ . چگونه این مقادیر با کار  $pdV$  انجام شده در فرآیند مقایسه می‌شود؟
- ۸-۲۳ در کوره‌های گرمایشی منازل، متان با  $25$  درصد هوای اضافی سوزانده می‌شود و کمپانی سازنده ادعا می‌کند که  $70$  درصد ارزش حرارتی بالایی سوخت به‌صورت گرمای مفید بازیابی می‌گردد. اگر در تحت این شرایط هوا و سوخت در  $77^{\circ}\text{F}$  وارد شود، دمای خروجی محصولات احتراق چیست؟
- ۸-۲۴ در نیروگاهی هوای لازم برای احتراق در  $250^{\circ}\text{F}$  و متان در  $77^{\circ}\text{F}$  وارد کوره می‌شوند.  $20$  درصد هوای اضافی مورد استفاده قرار گرفته و محصولات احتراق کوره را در  $2140^{\circ}\text{F}$  ترک می‌کنند. چه مقدار انرژی به‌ازای هر پوند جرم از سوخت به‌دست می‌آید؟
- ۸-۲۵ مشعل توربین گازی یک نیروگاه برای سوزاندن پروپان مایع در  $77^{\circ}\text{F}$  با هوای  $350^{\circ}\text{F}$  طراحی شده است. دمای خروجی محصولات احتراق  $2040^{\circ}\text{F}$  می‌باشد. نسبت هوا به‌سوخت لازم و درصد هوای اضافی را برای شرایط جریان دائم و عدم اتلاف حرارتی از مشعل محاسبه نمایید.
- ۸-۲۶ بعضی از متخصصین علمی ادعا می‌کنند که با نقصان هرچه بیشتر منابع سوخت هیدروکربنی، هیدروژن تولید شده از طریق الکترولیز آب روز به‌روز موارد استفاده وسیعتری را به‌عنوان سوخت پیدا خواهد کرد. ارزش حرارتی بالایی و پایینی را برای هیدروژن گازی در  $77^{\circ}\text{F}$  و  $1\text{ atm}$  محاسبه کنید. برای ذخیره نمودن هیدروژن در  $2000\text{ psia}$  و  $70^{\circ}\text{F}$  مخزنی با چه ابعادی لازم خواهد بود تا انرژی برابر با انرژی یک مخزن  $25$  گالنی از بهترین (اکتان) تولید نماید؟
- ۸-۲۷ دمای آدیاباتیک شعله سوختن هیدروژن با  $400$  درصد هوای اضافی چقدر است؟
- ۸-۲۸ در توده گاز خروجی از دودکش نیروگاهها اکسیدهای ازت (یعنی  $\text{NO}$  و غیره) وجود دارد، زیرا در موقعی که گازهای داغ حاصله از احتراق در تماس سریع با سطح نسبتاً سرد لوله‌های

دیگ بخار قرار می گیرند، این اکسیدها «غیر فعال» هستند و زمان کافی برای انجام واکنش معکوس به  $N_2$  و  $O_2$  وجود ندارد. تصور کنید که گازهای احتراق در  $2140^\circ F$  و لوله های دیگ بخار در  $1340^\circ F$  قرار دارند. درصد NO موجود در مخلوط سرد شده به طور ناگهانی از دمای بالاتر را تخمین بزنید.

۸-۲۹ بیشترین مقدار کار باستانی کار  $pdV$  در موقع سوختن CO با  $O_2$  برای تشکیل  $CO_2$  در فشار ثابت ۱ atm و دمای ثابت  $77^\circ F$  چیست؟

۸-۳۰ متان ( $CH_4$ ) با نسبت های صحیح شیمیایی با اکسیژن در ۱ atm و  $77^\circ F$  سوزانده می شود. بیشترین مقدار کار خروجی در این فرآیند چیست؟ اگر این فرآیند تحت شرایط جریان دائم صورت گیرد، کار خروجی واقعی چه مقدار خواهد بود؟

۸-۳۱ برای مخلوطی در حال تعادل از  $N_2$ ،  $O_2$  و NO در دمای بالا تعداد درجات آزادی را تعیین کنید.

۸-۳۲ برای مخلوطی در حال تعادل از CO،  $CO_2$ ،  $H_2$  و  $H_2O$  در دمای بالا درجه آزادی چقدر است؟

۸-۳۳ بیشترین تعداد فازهای همگنی که ممکن است برای سیستمی متشکل از (الف) یک جزء (ب) دو جزء (ج) سه جزء وجود داشته باشد، چیست؟

۸-۳۴ مخلوطی از هوا و بخار آب را می توان به طریقی سرد کرد که مایع توأم با بخار موجود باشد، یا چنانچه دما به قدر کافی پایین باشد یک فاز جامد (یخ) توأم با بخار وجود خواهد داشت. با به کار بردن قانون فاز گیبس در مورد این سیستم، تعداد درجات آزادی را برای سه حالت (الف) هوا و بخار، (ب) هوا، بخار و مایع و (ج) هوا، بخار و یخ تعیین کنید.

۸-۳۵ برای مخلوطی از  $N_2$  و  $O_2$  در دمای اطاق چند درجه آزادی وجود دارد؟

### مسائل (آحاد متریک)

۸-۱M حرارت آزاد شده به ازای هر مول سوخت را در موقع سوزاندن پروپان گازی با نسبت های صحیح شیمیایی هوا در  $25^\circ C$  و ۱ atm محاسبه کنید.

۸-۲M با استفاده از داده‌های جدول ۸-۱ ارزش حرارتی پایینی را برای پروپان مایع در  $25^{\circ}\text{C}$  محاسبه کنید.

۸-۳M انتالپی احتراق را برای اکتان گازی در  $280^{\circ}\text{C}$  محاسبه کنید.

۸-۴M انرژی آزاد شده در موقع سوزاندن  $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$  را با اکسیژن تئوری در  $25^{\circ}\text{C}$  محاسبه کنید در صورتی که آب محصولات در حالت مایع باشد.

۸-۵M گاز پروپان با ۵۰ درصد هوای اضافی می‌سوزد. واکنش‌کننده‌ها در  $40^{\circ}\text{C}$  وارد محفظه احتراق و در  $650^{\circ}\text{C}$  از آن خارج می‌شوند. حرارت آزاد شده به‌ازای هر مول سوخت را محاسبه کنید.

۸-۶M نسبت هوا-سوخت را برای سوختن اتان ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) با ۲۵ درصد هوای اضافی محاسبه کنید. همچنین نقطه شبنم محصولات را در فشار ۱۰۰ kPa محاسبه کنید.

۸-۷M سوخت گازی خاصی دارای ترکیب زیر بر مبنای مولی است:

$\text{CH}_4 = 60\%$  درصد

$\text{C}_2\text{H}_6 = 30\%$  درصد

$\text{N}_2 = 4\%$  درصد

$\text{CO}_2 = 6\%$  درصد

نسبت هوا به سوخت را اگر سوخت با ۲۰ درصد هوای اضافی سوزانده شود محاسبه کنید. همچنین نقطه شبنم محصولات را برای فشار ۱۰۰ kPa تعیین کنید.

۸-۸M مسأله ۸-۷M را برای ۱۰۰ درصد هوای اضافی تکرار نمایید.

۸-۹M اکتان مایع با مقدار معینی هوای اضافی می‌سوزد به‌طوری‌که دمای شعله آدیاباتیک ۱۱۰۰ K است. درصد هوای اضافی را در صورتی که واکنش‌کننده‌ها در ۲۹۸ K وارد محفظه احتراق شوند محاسبه نمایید.

۸-۱۰M دمای شعله آدیاباتیک را برای متان گازی که با هوای تئوری می‌سوزد محاسبه کنید. فرض کنید احتراق کامل صورت می‌گیرد.

۸-۱۱M سوخت اکتان مایع در ۲۹۸ K در یک محفظه احتراق با ۴۰۰ درصد هوای تئوری در ۴۲۵ K مخلوط می‌شود. محصولات احتراق در ۹۰۰ K محفظه را ترک می‌کند. حرارت

از دست رفته را به ازای هر مول سوخت محاسبه کنید.

۸-۱۲M نسبت هوا به سوخت را برای بنزین مایع ( $C_6H_6$ ) اگر با ۱۳۰ درصد هوای تئوری بسوزد

محاسبه کنید. چه مقدار حرارت آزاد خواهد شد اگر واکنش در  $25^\circ C$  صورت گیرد؟

۸-۱۳M اکتان ( $C_8H_{18}$ ) با هوای سوزد و دستگاه اُرسات جهت تعیین ترکیب محصولات خشک

احتراق به کار می رود به طوری که  $CO_2 = 10\%$ ،  $CO = 2\%$  و  $O_2 = 4\%$  است. نسبت هوا به سوخت را محاسبه کنید.

۸-۱۴M چه دمایی برای تجزیه هیدروژن دو اتمی لازم است تا جایی که هیدروژن تک اتمی تولید

شده شامل ۱۵ درصد تعداد کل مولهای موجود در مخلوط باشد؟

۸-۱۵M ۱ مول  $CO$  با ۱ مول بخار آب در  $25^\circ C$  و ۱ atm فشار مخلوط می شود. سپس این مخلوط

تا  $1800\text{ K}$  گرم می گردد. گرمایش لازم و ترکیب مخلوط نهایی را محاسبه کنید.

۸-۱۶M دمای شعله آدیاباتیک را برای سوختن کربن جامد با ۲۰۰ درصد هوای تئوری تعیین کنید.

چه درصد هوای اضافی لازم است تا تولید دمای شعله آدیاباتیک  $1100\text{ K}$  بنماید؟ فرض کنید احتراق کامل صورت می گیرد.

۸-۱۷M انتالپی احتراق متان گازی و اکتان مایع در  $25^\circ C$  را تعیین کنید اگر پراکسید هیدروژن مایع

به عنوان اکسید کننده واکنش احتراق به کار رود.

۸-۱۸M  $5\text{ kg/min}$  گاز بوتان با ۱۰۰ درصد هوای اضافی در یک فرآیند جریان دائم در فشار

۱ atm سوزانده می شود. واکنش کننده ها در  $25^\circ C$  وارد محفظه احتراق می شوند. اگر

حرارت اتلافی در محفظه احتراق  $530\text{ kW}$  باشد، ماکزیمم دما برای کانال حامل

محصولات احتراق چقدر باید باشد؟

۸-۱۹M احتراق سوخت های مایع - اکتان، الکل متیلیک، پروپان و الکل اتیلیک را با کمیت های

هوای تئوری در  $25^\circ C$  در نظر بگیرید. این واکنشها را از نقطه نظر نکات زیر مقایسه نمایید:

(الف) حجم محصولات بر واحد انرژی آزاد شده

(ب) حجم هوا بر واحد انرژی آزاد شده

(ج) انرژی آزاد شده بر واحد جرم سوخت

مقایسه های خود را شرح دهید.

۸-۲۰M اکتان (مابع) در  $25^{\circ}\text{C}$  با ۳۰ درصد هوای اضافی در فشار ثابت ۱۰۰ kPa می‌سوزد. هوا در ۴۰۰ K وارد واکنش می‌شود. انرژی آزاد شده را برای دمای محصولات ۸۰۰ K محاسبه کنید.

۸-۲۱M متان گازی ( $\text{CH}_4$ ) با ۴۰۰ درصد هوای تنوری در  $25^{\circ}\text{C}$  و ۱۰۰ kPa می‌سوزد. انرژی آزاد شده برای دمای محصولات ۶۰۰ K را محاسبه کنید. همچنین دمای شعله آدیاباتیک را محاسبه کنید.

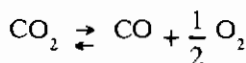
۸-۲۲M تجزیه اکسیژن دو اتمی را در نظر بگیرید. غلظتهای حالت تعادل  $\text{O}_2$  و  $\text{O}$  در ۳۳۰۰ K را برای فشارهای ۱، ۵ و ۱۰ اتمسفر محاسبه کنید.

۸-۲۳M  $\text{CO}_2$  در فشار ثابت ۵۰۰ kPa از ۲۹۸ K تا ۲۸۰۰ K گرم می‌شود. انتقال حرارت برای این فرآیند را محاسبه کرده و غلظتهای نهایی را در خاتمه گرمایش تعیین کنید.

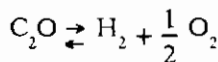
۸-۲۴M یک مول  $\text{CO}$  با یک مول بخار آب در ۲۹۸ K و فشار ۱ atm مخلوط می‌شود. مخلوط تا ۱۸۰۰ K حرارت داده می‌شود. گرمایش و ترکیب مخلوط نهایی را محاسبه کنید.

۸-۲۵M تجزیه بخار آب را به  $\text{H}_2$  و  $\text{O}_2$  در نظر بگیرید. برای بالا بردن دما در یک فرآیند جریان دائم تا ۲۵۰۰ K چه مقدار حرارت باید به ۱ مول بخار آب در ۲۰۰ K افزوده شود؟

۸-۲۶M ترکیب تعادلی برای واکنش زیر را در ۱ atm و ۲۸۰۰ K محاسبه کنید.



۸-۲۷M سؤاله ۸-۲۶M را برای واکنش زیر در ۱ atm و ۳۰۰۰ K تکرار کنید.



۸-۲۸M واکنش یونیزاسیون سزیم را همان طور که در مثال ۸-۱۳ بحث گردید، در نظر بگیرید. چگالی تعداد الکترونها (تعداد به ازای متر مکعب) را برای شرایط مثال مذکور محاسبه کنید. سؤاله را برای فشار کل ۱ atm / و ۱۰۰۰ K تکرار کنید.

۸-۲۹M در سیستمهای مولد نیروی هیدرو دینامیک مغناطیسی<sup>۱</sup> (فصل ۱۵ را ببینید) معمولاً استفاده

از گازهایی مورد توجه است که در دماهای پایین یونیزه می‌شوند. یکی از روشهای تولید چنین گازهایی عبارت است از «هسته‌گذاری»<sup>۱</sup> یک گاز با ماده‌ای نظیر سزیم که در دماهای پایین یونیزه می‌شود. آرگون را به عنوان گاز حامل در فشار کل ۱ atm و ۱۰۰۰ K در نظر بگیرید. چگالی تعداد الکترون (تعداد به ازای متر مکعب) را برای غلظتهای جرمی ۱/۵۰، ۱/۵ و ۱ درصد سزیم محاسبه کنید. وزن ملکولی سزیم ۱۳۲/۹۱ است. محاسبات را برای فشار کل ۱۰ atm تکرار کنید. رفتار الکترونها را نظیر یک گاز ایده آل تک اتمی فرض کنید.

- ۸-۳۰M مسأله ۸-۲۹M را با استفاده از سدیم به عنوان گاز هسته گذاری تکرار کنید.
- ۸-۳۱M بوتان گازی با شدت ۲ kg mol/min با هوای تثوری در ۲۵°C و ۱۰۰ kPa در یک فرآیند جریان دائم می‌سوزد. انرژی آزاد شده و برگشت ناپذیری را برای دمای محصولات ۵۰۰ K و کمترین دمای قابل دسترس ۲۵°C محاسبه کنید.
- ۸-۳۲M منواکسید کربن با هوای تثوری در ۱۰۰ kPa و ۲۵°C در یک فرآیند جریان دائم می‌سوزد. محصولات در ۱۰۰ kPa و ۲۵°C محفظه احتراق را ترک می‌کنند و کمترین دمای دسترس پذیر ۲۵°C می‌باشد. انرژی آزاد شده و برگشت ناپذیری را محاسبه کنید.
- ۸-۳۳M دمای آدیاباتیک شعله را برای سوختن منواکسید کربن با هوای تثوری در ۲۵°C و ۱ atm محاسبه کنید.
- ۸-۳۴M پروپان مایع با هوادر ۱۰۰ kPa و ۲۵°C در کوره جریان دائم می‌سوزد. محصولات در دمای ۴۰۰ K کوره را ترک می‌کنند. کوره جهت گرم کردن آب به کار می‌رود. اگر ۷۵ درصد HHV (ارزش حرارتی بالایی) سوخت به آب داده شود، مقدار هوای اضافی مورد نیاز را محاسبه کنید.
- ۸-۳۵M اتان گازی با ۲۵ درصد هوای اضافی در ۲۵°C و ۱۰۰ kPa در یک فرآیند جریان دائم می‌سوزد. محصولات در ۲۵°C و ۱۰۰ kPa محفظه را ترک می‌کنند و  $T_0 = ۲۵^\circ\text{C}$  است. انرژی آزاد شده و برگشت ناپذیری را به ازای هر مول سوخت محاسبه کنید.
- ۸-۳۶M بعضی از متخصصین علمی ادعا می‌کنند که با نقصان هرچه بیشتر منابع سوخت

هیدروکربنی، هیدروژن تولید شده از طریق الکترولیز آب روز به روز موارد استفاده وسیعتری را به عنوان سوخت پیدا خواهد نمود. ارزش حرارتی بالایی و پایینی را برای هیدروژن گازی در  $298\text{ K}$  و  $100\text{ kPa}$  محاسبه کنید. برای ذخیره نمودن هیدروژن در  $14\text{ MPa}$  و  $295\text{ K}$  مخزنی با چه ابعادی لازم خواهد بود تا انرژی برابر با انرژی یک مخزن  $95$  لیتری بنزین (اکتان) تولید نماید.

۸-۳۷M در توده گاز خروجی از دودکش نیروگاهها اکسیدهای ازت (یعنی  $\text{NO}$  و غیره) وجود دارد، زیرا موقعی که گازهای داغ احتراق در تماس سریع با سطح نسبتاً سرد لوله‌های دیگ بخار قرار می‌گیرند، این اکسیدها "غیر فعال" می‌باشند و زمان کافی برای انجام واکنش معکوس به  $\text{N}_2$  و  $\text{O}_2$  وجود ندارد. تصور کنید که گازهای احتراق در  $2000\text{ K}$  و لوله‌های دیگ بخار در  $1000\text{ K}$  قرار دارند. درصد  $\text{NO}$  موجود در مخلوط سرد شده به‌طور ناگهانی از دمایی بالاتر را تخمین بزنید.

۸-۳۸M ثابت تعادل را برای واکنش  $\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2$  در  $1000\text{ K}$  با استفاده از داده‌های حرارت واکنش محاسبه گردیده از جدول A-6 و ثابت تعادل را در  $298\text{ K}$  از جدول ۸-۳ محاسبه کنید.

۸-۳۹M برای یونیزه کردن سزیم در  $2400\text{ K}$ ،  $2800\text{ K}$  و  $4000\text{ K}$  چه مقدار انرژی لازم است؟  
۸-۴۰M درجه یونیزاسیون سزیم را در مخلوطی از  $1$  مول سزیم و  $2$  مول نیتروژن در  $2000\text{ K}$  و  $10\text{ atm}$  محاسبه کنید.

۸-۴۱M در به‌دست آوردن معادله (۸-۶۷) حرارت واکنش در محدوده‌ای از دما ثابت فرض شد. برای تجزیه  $\text{CO}_2$  در محدوده دمای  $1500\text{ K}$  تا  $3000\text{ K}$  دقت این فرضیه چقدر است؟  
۸-۴۲M انرژی لازم برای گرم کردن مخلوطی به‌نسبت مولی مساوی از نیتروژن و اکسیژن را از  $298\text{ K}$  تا  $3000\text{ K}$  تخمین بزنید.

۸-۴۳M فرض کنید که سیستم متابولیک انسان را می‌توان با یک واکنش احتراق ساده معادل گرفت که در  $20^\circ\text{C}$  صورت می‌گیرد. برای کل انرژی مصرفی  $13\text{ MJ/day}$  چه کمیتی از متان و هوا در  $20^\circ\text{C}$  برای بردن در فرآیند احتراق لازم خواهد بود؟ چه مقدار دی‌اکسید کربن

تولید خواهد شد؟

۸-۴۴M بخار آب در فشار ثابت ۲۵۰ kPa حرارت داده می‌شود تا ۱۰ درصد آن به  $H_2O$  و  $O_2$

تجزیه گردد. درجه دمایی این عمل اتفاق می‌افتد؟

۸-۴۵M دمایی را که ۱۵ درصد  $CO_2$  در فشار ۳۰۰ kPa تجزیه می‌شود محاسبه کنید.

۸-۴۶M انرژی لازم را به ازای هر مول جهت گرمایش در مسائل ۸-۴۴M و ۸-۴۵M محاسبه کنید،

اگر دمای اولیه  $25^\circ C$  باشد.

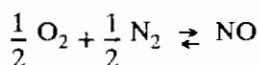
۸-۴۷M یک مول هیدروژن در یک فرآیند فشار ثابت از  $300\text{ K}$  تا  $3000\text{ K}$  در فشار کلی

۵۰ kPa حرارت می‌یابد. مقدار گرمایش لازم را محاسبه کنید.

۸-۴۸M انتالپی یونیزاسیون را برای سزیم در  $1\text{ atm}$  و  $2000\text{ K}$  محاسبه کنید و برای سدیم در

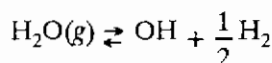
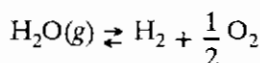
$2000\text{ K}$  تکرار نمایید.

۸-۴۹M در  $100\text{ kPa}$  و  $1500\text{ K}$ ، ترکیب تعادلی را برای واکنش زیر محاسبه کنید.



۸-۵۰M بخار آب تا  $2800\text{ K}$  حرارت می‌یابد. غلظت‌های تعادلی را محاسبه کنید با فرض این که دو

معادله واکنش زیر به کار روند:



۸-۵۱M در یک کوره حرارتی خانگی متان با ۲۵ درصد هوای اضافی می‌سوزد و کارخانه سازنده

آن ادعا می‌کند که ۷۰ درصد ارزش حرارتی بالایی سوخت به صورت حرارت مفید احیا

می‌شود. اگر هوا و سوخت در  $25^\circ C$  وارد کوره شوند، دمای خروجی محصولات احتراق

در این شرایط چقدر است؟

۸-۵۲M در احتراق یک نیروگاه خاصی هوا در  $400\text{ K}$  و سوخت متان در  $298\text{ K}$  وارد کوره

می‌شوند. ۲۰ درصد هوای اضافی به کار می‌رود و محصولات احتراق کوره را در

$1450\text{ K}$  ترک می‌کنند. مقدار انرژی به دست آمده به ازای هر کیلوگرم سوخت را



محاسبه کنید.

۸-۵۳M مشعل توربین گازی یک نیروگاه برای سوزاندن پروپان مایع در  $298\text{ K}$  با هوای  $450\text{ K}$  طراحی شده است. دمای خروجی محصولات احتراق  $1400\text{ K}$  است. نسبت هوا به سوخت لازم و درصد هوای اضافی را برای شرایط جریان دائم و عدم اتلاف حرارتی از مشعل محاسبه نمایید.

۸-۵۴M یک گرمکن تابشی جهت استفاده در انبارهای بزرگ، بوتان گازی را با  $25\%$  درصد هوای اضافی می سوزاند. سوخت و هوا هر دو در  $298\text{ K}$  وارد گرمکن می شوند. محصولات احتراق در  $950\text{ K}$  از دستگاه خارج می گردند. گرمکن چه مقدار حرارت به ازای هر پوند جرم سوخت از دست می دهد؟ این مقدار چه درصدی از ارزش حرارتی بالایی است؟  
۸-۵۵M بیشترین مقدار کار را در موقع تغییر آب اشباع به بخار اشباع در  $700\text{ kPa}$  در حالات زیر محاسبه کنید:

(الف) در فرآیندی تحت دمای ثابت، (ب) در فرآیندی تحت فشار و دمای ثابت باستانی کار  $pdV$ . چگونه این مقادیر با کار  $pdV$  انجام شده در فرآیند مقایسه می شوند؟

۸-۵۶M بیشترین مقدار کار باستانی  $pdV$  در موقع سوختن  $\text{CO}$  با  $\text{O}_2$  برای تشکیل  $\text{CO}_2$  در فشار ثابت  $1\text{ atm}$  و دمای ثابت  $298\text{ K}$  چیست؟

۸-۵۷M متان ( $\text{CH}_4$ ) با نسبتهای صحیح شیمیایی اکسیژن در  $1\text{ atm}$  و  $298\text{ K}$  سوزانده می شود. بیشترین مقدار کار خروجی در این فرآیند چیست؟ اگر این فرآیند تحت شرایط جریان دائم صورت گیرد، کار خروجی حقیقی چقدر خواهد بود؟

۸-۵۸M انرژی آزاد شده را به ازای هر کیلوگرم ذغال سنگ برای شرایط مسأله ۸-۶۶M محاسبه کنید.

۸-۵۹M یک سوخت گازی شامل  $76\%$  درصد  $\text{CH}_4$  و  $24\%$  درصد  $\text{C}_2\text{H}_6$  بر مبنای مولی می باشد. نسبت هوا به سوخت را برای احتراق استوکیومتری تعیین کنید. همچنین ارزشهای حرارتی بالایی و پایینی را در  $1\text{ atm}$  و  $25^\circ\text{C}$  به ازای یک کیلوگرم سوخت و یک کیلوگرم مخلوط هوا-سوخت محاسبه کنید.

۸-۶۰M اتان گازی  $\text{C}_2\text{H}_6$  با  $200\%$  درصد هوای تئوری در  $1\text{ atm}$  می سوزد. واکنش کننده ها در

۲۵°C طی یک فرآیند جریان دائم وارد و در ۱۰۰۰ K خارج می‌شوند. کل انرژی آزاد شده را برای جریان سوخت ۱۵ kg/s محاسبه کنید. محاسبات را به کمک انتالپیهای هر جزء و نیز استفاده از جدول A-۱۶ انجام دهید.

۸-۶۱M ۴ kg.mol متان ( $\text{CH}_4$ ) با ۹ kg.mol اکسیژن ( $\text{O}_2$ ) می‌سوزد. درصد اکسیژن ( $\text{O}_2$ ) اضافی و نقطه شبنم محصولات را برای فشار کل ۱ atm محاسبه کنید.

۸-۶۲M برای واکنش‌کننده‌های مسأله ۸-۶۰M، انرژی آزاد شده را محاسبه کنید اگر واکنش‌کننده‌ها در ۱ atm و ۲۵°C در یک دستگاه جریان دائم وارد شده و محصولات در ۱ atm و ۵۰۰ K دستگاه را ترک کنند. همچنین برگشت ناپذیری را برای این فرآیند محاسبه کنید.

۸-۶۳M ۳ kg.mol/h پروپان ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) با مقدار هوای تئوری در ۱ atm و ۲۵°C می‌سوزد. محصولات در ۴۵۰ K و ۱ atm یک دستگاه جریان دائم را ترک می‌کنند. مقدار انرژی آزاد شده در این فرآیند، دبی حجمی واکنش‌کننده‌ها و محصولات بر حسب لیتر در ساعت و برگشت ناپذیری برای واکنش را محاسبه کنید.

۸-۶۴M اکتان مایع ( $\text{C}_8\text{H}_{18}$ ) به صورت آدیاباتیک با ۴۰۰ درصد هوای تئوری در ۱ atm و ۲۵°C می‌سوزد. دمای آدیاباتیک شعله را محاسبه کنید با استفاده از (الف) انتالپی هر یک از اجزا و (ب) جدول A-۱۸

۸-۶۵M منواکسید کربن با اکسیژن تئوری در ۴ atm و ۲۵°C در یک فرآیند جریان دائم می‌سوزد. دمای آدیاباتیک شعله را با در نظر گرفتن تجزیه محاسبه کنید.

۸-۶۶M جهت تخمین جریان هوای لازم برای احتراق و مقدار محصولات زایدی که باید برای انهدام خارج گردد، تحلیلی بر روی دیگ بخار ذغال‌سنگی صورت گرفته است. تجزیه ذغال‌سنگ بر سبنای جرمی برابر است با:

۷۵ درصد C

۷ درصد  $\text{H}_2$

۷ درصد  $\text{O}_2$

۲ درصد  $\text{N}_2$

۴ درصد  $H_2O$ 

۵ درصد خاکستر

تجزیه و تحلیل اُرسات محصولات خشک احتراق بر مبنای حجمی نتیجه می‌دهد:

۱۳ درصد  $CO_2$ ، ۱/۵ درصد  $CO$ ، ۶/۵ درصد  $O_2$  و ۷۹ درصد  $N_2$ . تجزیه و تحلیل جرمی مواد زاید، ۲۱ درصد  $C$  و ۷۹ درصد خاکستر را مشخص می‌کند. برای ۱ kg ذغال سنگ ورودی حجم هوای لازم در ۱ atm و  $30^\circ C$  را بر حسب لیتر در ثانیه محاسبه کنید. همچنین جرم پس مانده را به ازای هر کیلوگرم ذغال سنگ محاسبه کنید. اگر محصولات در  $150^\circ C$  خارج شوند، دبی حجمی را به ازای هر کیلوگرم ذغال سنگ محاسبه کنید.

۸-۶۷M ۱ kg.mol متان ( $CH_4$ ) و ۲ kg.mol اکسیژن ( $O_2$ ) در ۱ atm و  $25^\circ C$  طی یک فرآیند جریان دائم واکنش کرده تولید محصولات ۱ مول  $CO_2$  و ۲ مول  $H_2O$  (بخار) در ۱ atm و  $25^\circ C$  می‌کند. تغییر آنتروپی برای این واکنش، انرژی آزاد شده و کاهش قابلیت کاردهی را برای  $T_0 = 25^\circ C$  محاسبه کنید.

۸-۶۸M مخلوطی از  $H_2$  و  $O_2$  در یک مخزن صلبی واکنش کرده و  $H_2O$  می‌دهد. جرم  $H_2$ ، ۱ kg و جرم  $O_2$ ، ۲۹ kg است و شرایط اولیه واکنش کننده‌ها ۱ atm و  $35^\circ C$  می‌باشد. حجم مخزن را محاسبه کنید. اگر محصولات تا  $25^\circ C$  خنک شوند مقدار تقطیر را محاسبه کنید.

### مراجع

- 1 JANAF Thermochemical Tables, Document PB 168-370, Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, August 1965.
- 2 Selected Values of Chemical Thermodynamic Properties, NBS Technical Notes, 270-1 and 270-2, 1955.
- 3 Selected Values of Physical and Thermodynamic Properties of Hydrocarbons and Related Compounds, API Res. Project 44, Carnegie Press, Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, Pa.
- 4 Callen, H. B. : "Thermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1960.
- 5 Kirkwood, J. G., and I. Oppenheim: "Chemical Thermodynamics," McGraw-Hill Book Company, New York, 1961.

- 6 Lewis, G. N., and M. Randall, "Thermodynamics," 2d ed. (revised by K. S. Pitzer and L. Brewer), McGraw-Hill Book Company, New York, 1961.
- 7 Reynolds, W. C.: "Thermodynamics" 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.
- 8 Wark, Kenneth: "Thermodynamics," 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1971.
- 9 Van Wylen, G. J., and R. E. Sonntag: "Fundamentals of Classical Thermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
- 10 Sears, F. W.: "Thermodynamics," 2d ed., Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1953.
- 11 Hatsopoulos, G. N., and J. H. Keenan: "Principles of General Thermodynamics," John Wiley & Sons, New York, 1965.
- 12 Keenan, J. H., and J. Kaye: "Gas Tables," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1948.
- 13 Holman, J. P.: "Experimental Methods for Engineers," 4th ed., chap. 13, McGraw-Hill Book Company, New York, 1984.

# فصل ۹

## سیکلهای قدرت و تبرید

### ۹-۱ مقدمه

یکی از اهداف اصلی مهندسی، تبدیل انرژی از یک نوع به نوع دیگر است (انرژی شیمیایی سوخت به گرما از طریق فرآیند احتراق، انرژی گرمایی به الکتریکی در نیروگاه بخار، توربین گازی، موتور احتراق داخلی یا دستگاههای دیگر). مشاهده می‌گردد که قانون دوم ترمودینامیک به عنوان راهنمایی در پیش‌بینی جهت مجاز فرآیند تبدیل انرژی به کار می‌رود. هدف ما از این فصل تشریح کردن چند دستگاه عملی مورد استفاده در تبدیل انرژی در مقیاس بزرگ و نشان دادن روشهای تجزیه و تحلیل مناسب برای این دستگاههاست. واضح است که نکته کلیدی جالب بازده یک فرآیند بخصوص تبدیل انرژی می‌باشد. بنابراین هدف، ایجاد اساس منطقی برای محاسبه چنین کمیتی است به طوری که بتوان فرآیندهای مختلف را به روشنی با یکدیگر مقایسه کرد.

واژه سیکل قدرت در عنوان این فصل، فرآیند مورد استفاده دستگاههایی را که به طور مداوم قدرت تولید می‌کنند تشریح می‌کند، یعنی فرآیند سیکلی (چرخه‌ای) قابل تکراری که انرژی را به کار مکانیکی یا الکتریکی تبدیل می‌کند. البته انرژی مکانیکی و الکتریکی از قابل استفاده‌ترین انواع انرژی است که در کاربردهای متفاوت به خدمت گرفته می‌شود.

قابلیت استفاده هر سیکل قدرت به ترتیب به هزینه و بازده بستگی دارد. همچنین تأثیرات زیست محیطی ناشی از تولید قدرت باید در نظر گرفته شود و قیمت وسایل کنترل آلودگی به صورت پارامتر

مهمی در کاربردهای اتومبیل، هواپیما و نیروی الکتریکی درآمده است. در بعضی موارد ملاحظات زیست محیطی در انتخاب بین سوختهای متفاوت اثر می‌گذارد: از قبیل مزیت سوخت مایع یا گاز نسبت به ذغال سنگ در نیروگاهها، ارجحیت گاز طبیعی نسبت به سوخت مایع در منازل و آپارتمانها.

نکته اساسی که اغلب در ملاحظات زیست محیطی در مورد آن بی‌توجهی می‌شود این است که مقدار آلودگی در اکثر طرحهای تولید قدرت مستقیماً متناسب با مقدار سوخت مصرفی است که به‌بازده تبدیل انرژی مربوط می‌شود. هرچه بازده بالاتر باشد مصرف سوخت کمتر است و بدین ترتیب مقدار کل آلودگی کمتر است. این بدین معنی است که تحلیل یا طرح ترمودینامیکی که بتواند بازده را بهبود ببخشد به کاهش تأثیرات منفی بر زیست محیطی کمک خواهد کرد.

در این فصل ما اساساً به تحلیل فنی توجه داریم، عوامل اقتصادی و زیست محیطی خارج از حیطه بحث ماست. با وجود این لازم است به‌خاطر داشته باشیم که این متغیرها باید در هر طرح نیروگاه واقعی مد نظر قرار گیرد.

## ۹-۲ ملاحظات عمومی

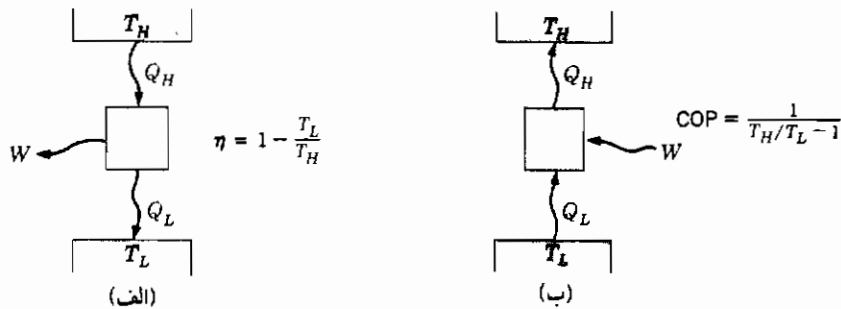
الگو برای بسیاری از سیکلها، سیکل کارنوی بحث شده در فصل ۵ می‌باشد زیرا برای دماهای معین شده، بازده حرارتی چنین سیکلی حداکثر مقدار ممکن است، یعنی

$$\eta_t = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (9-1)$$

از معادله (۹-۱) دو مفهوم اساسی قابل درک است:

- ۱ - هرچه دمایی که در آن حرارت اضافه می‌شود زیادتر باشد بازده بیشتر است.
  - ۲ - هرچه دمایی که اتلاف حرارت در آن صورت می‌پذیرد کمتر باشد، بازده سیکل بیشتر است.
- این دو مفهوم در مورد تمام سیکلهای قدرت واقعی صادق است. مفهوم اصلی بازده و به‌صورت زیر به‌خاطر خواهیم سپرد.

$$\eta = \frac{\text{اثر مفید}}{\text{انرژی مصرفی}} \quad (9-2)$$



شکل ۹-۱ (الف) سیکل قدرت کارنو (ب) یخچال کارنو

هر دو فرآیند برگشت پذیر و واقعی را در بخش‌های زیرین در نظر خواهیم گرفت و تأثیرات برگشت ناپذیری را بر روی بازده نشان خواهیم داد.

یک سیکل تبرید عکس یک سیکل قدرت است، یک کار ورودی خالص و یک حرارت خروجی خالص وجود دارد. سیکل‌های کارنو را در شکل ۹-۱ مقایسه کنید. بازده سیکل قدرت توسط معادله (۹-۱) داده می‌شود و پارامتر شاخص برای یک سیکل تبرید ضریب عملکرد<sup>۱</sup> (COP) است که توسط رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$COP = \frac{\text{اثر تبرید}}{\text{کار ورودی}} \quad (۹-۳)$$

برای سیکل تبرید برگشت پذیر کارنو این رابطه به صورت زیر در می‌آید.

$$COP = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{T_H/T_L - 1} \quad (۹-۴)$$

عجیب نیست که مقدار COP بزرگتر از واحد باشد. این حقیقت دلیلی است برای این که COP بازده نامیده نمی‌شود، هرچند مقدار آن برابر است با "اثر مفید" بخش بر "انرژی مصرفی".

### ۹-۳ سیکل‌های قدرت بخار

برای شروع بحث درباره سیکل‌های قدرت، شکل الف ۹-۲ را در نظر می‌گیریم. حرارت به

دیگ بخار داده می شود تا مایع به بخار تبدیل گردد. سپس بخار به صورت آدیاباتیک در داخل توربین منبسط شده تولید کار خروجی می کند. بخار خارج شده از توربین وارد کندانسور (چگالنده)<sup>۱</sup> می شود و دفع حرارت تا تقطیر کامل بخار به مایع ادامه می یابد. فرآیند تقطیر مکانیزم دفع حرارت در سیکل است. مایع اشباع به پمپی که فشار را تا فشار اشباع مربوط به دمای دیگ بخار افزایش می دهد تحویل می گردد و مایع پرفشار به دیگ بخار تحویل و سیکل دوباره تکرار می شود. در یک سیکل برگشت پذیر، فرآیندهای توربین و پمپ مطابق آنچه در شکل ب ۲-۹ نشان داده شده، آنتروپی ثابت است.

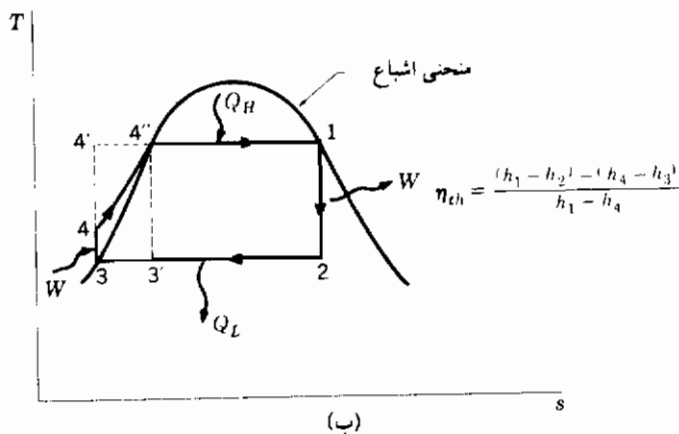
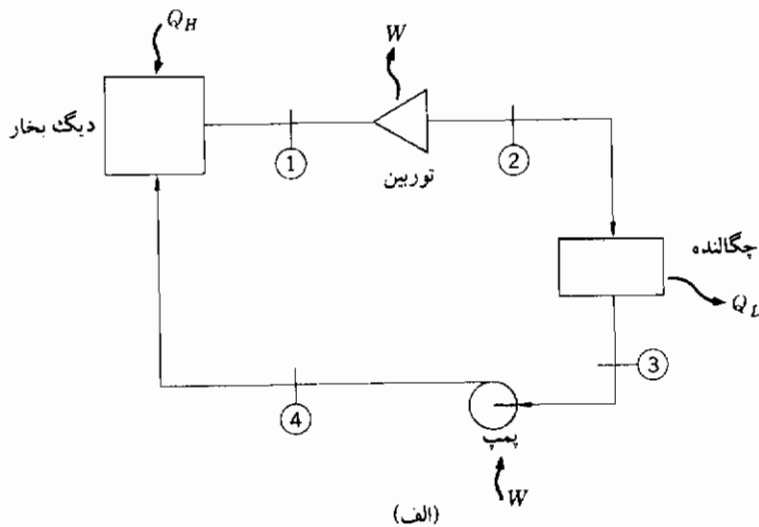
سیکل قدرت بخار شاید متداول ترین سیکل حرارتی تولید انرژی برق در جهان باشد. سیکل اصلی رانکین در شکل ۲-۹ نشان داده می شود. فرض خواهیم کرد که سیال عامل بخار آب باشد، اگرچه در بعضی از کاربردهای تخصصی سیال عامل دیگر می تواند به کار گرفته شود. سیکل اصلی رانکین با سیکل کارنو فرق می کند، به این صورت که فرآیند افزودن حرارت در دمای ثابت صورت نمی گیرد. اگر ممکن بود که سیکل به صورت "۴-۳-۲-۱ یا "۴'-۳'-۲-۱ عمل کند، دقیقاً یک سیکل کارنو حاصل می شد. مشکلات عملی از به خدمت گرفتن چنین دو آرایشی جلوگیری می کند. فرآیند "۴-۳' غیر عملی است زیرا شامل تراکم یک مخلوط تر به مایع اشباع می شود. طرح پمپی که چنین تراکمی را انجام دهد، ظاهراً عملی بنظر نمی رسد. فرآیند ۴-۳' شامل تراکم های مایع به فشارهای بسیار زیادی می باشد و همچنین ساختن پمپی که این کار سخت را انجام دهد خیلی غیر عملی به نظر می رسد. دمای متوسطی که در آن حرارت به سیکل رانکین اضافه می شود کمتر از درجه حرارت  $T_1$  می باشد زیرا قسمتی از این فرآیند صرف گرمایش مایع متراکم تا دمای اشباع در فشار بالا می شود. بدین ترتیب بازده از بازده سیکل کارنویی که بین  $T_1$  و  $T_2$  کار می کند کمتر است.

### انتخاب سیال عامل

تا این جا از این بحث می توان فهمید که نمودار  $T-s$  قابلیت استفاده از سیال خاصی را برای سیکل رانکین تعیین می کند. کمال مطلوب این است که سیالی با دمای بحرانی بالا و با خطوط مایع و بخار اشباع با شیب زیاد داشته باشیم، به طوری که سیکل رانکین هرچه بیشتر به عملکرد سیکل کارنو نزدیک



شود. در عین حال، حدود فشار لازم باید معقول باشد و در دسترس بودن و قیمت سیال نیز از عوامل مهمی است که باید بدان توجه کرد. کل مقدار سیالی که باید در گردش باشد بستگی به انتالپی تبخیر خواهد داشت زیرا مقدار انرژی را که می‌تواند در دمای بالا به سیال تحویل شود تعیین می‌کند. با در نظر گرفتن تمام این عوامل، آب به عنوان سیال عامل خوبی برای سیکل قدرت رانکین است. با هزینه پایین



شکل ۹-۲ سیکل اصلی قدرت بخار رانکین (الف) طرحواره (ب) نمودار

دما - آنتروپی

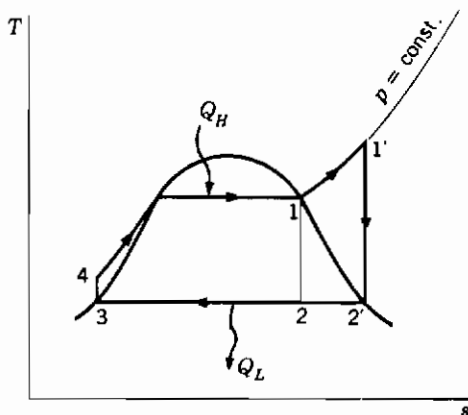
براحتی قابل تهیه است، دارای انتالپی تبخیر بالا ( $\sim 900 \text{ Btu/lbm}$ )، و دمای بحرانی نسبتاً بالایی است ( $705^\circ\text{F}$ ) و سمی هم نیست. مشکلات خوردگی با آب قابل ملاحظه است، اما می‌توان با دقت در طرح مهندسی آن را کنترل کرد.

### بهبود بازده

یک طریق بهبود بازده سیکل رانکین ادامه دادن فرآیند گرمایش در فشار ثابت از نقطه ۱ به ناحیه داغ مطابق شکل ۹-۳ می‌باشد. چنین فرآیند گرمایشی دارای دو مزیت است:

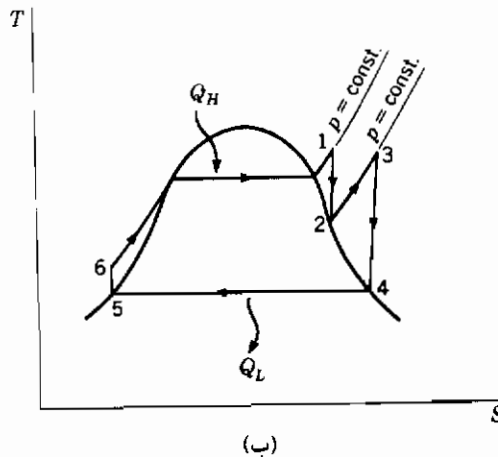
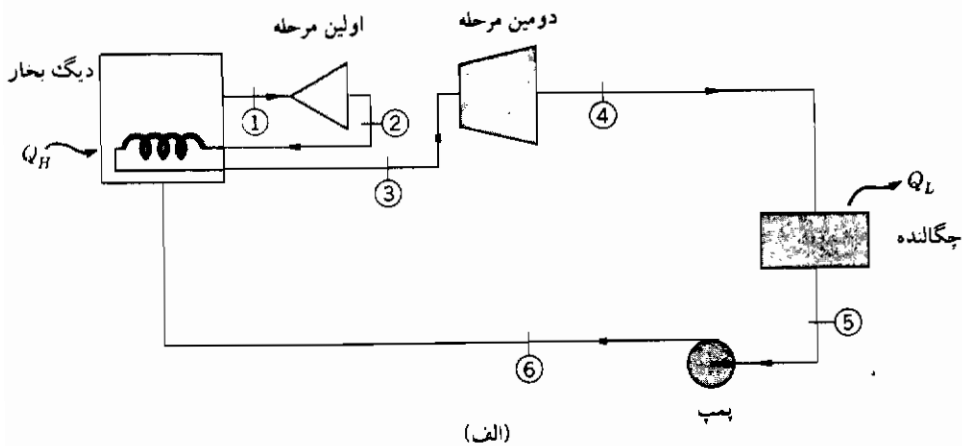
۱- دمای متوسطی را که در آن حرارت اضافه می‌شود افزایش می‌دهد و به موجب آن بازده سیکل افزایش می‌یابد.

۲- منجر به شرایط کارکردی می‌شود که رطوبت خروجی در فرآیند انبساط توربین کم گردد. منشأ اصلی فرسایش پره‌های توربین، ساییدگی با قطرات مایع است. فرآیند داغ نمودن بخار، رطوبت خروجی را کمتر می‌کند، و بدین ترتیب در جهت کاهش این مشکل عمل می‌کند.



شکل ۹-۳ نمودار دما - آنترופی برای سیکل رانکین با بخار داغ

راه دیگر بهبود بخشیدن بازده سیکل رانکین، به خدمت گرفتن یک عمل بازگرمایش<sup>۱</sup> مطابق آنچه شکل ۹-۴ نشان داده شده می‌باشد. در این حالت بخار آب در اولین مرحله توربین منبسط می‌شود تا تقریباً به خط اشباع در  $p_2$  برسد. سپس بخار آب به دیگ بخار برگشته و مجدداً در فشار ثابت تا  $T_3$



شکل ۹-۴ سیکل رانکین با بازگرمایش (الف) شکل طرحواره  
(ب) نمودار دما - آنتروپی

حرارت داده می‌شود. بخار آب سپس در دومین مرحله توربین تا فشار  $p_4$  منبسط می‌گردد. مکانیزم بازگرمایش دارای همان دو مزیت سیکل اصلی داغ می‌باشد و حتی در جلوگیری از رطوبت به‌داخل توربین مؤثرتر است.

### نرخ حرارتی<sup>۱</sup>

اصطلاح متداول مورد استفاده در میان مهندسين نیروگاه نرخ حرارتی است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود

حرارت ورودی به‌دیگ بخار (Btu) به‌ازای انرژی الکتریکی خروجی (kWh) = نرخ حرارتی  
یا بر حسب بازده حرارتی

$$\text{نرخ حرارتی} = \frac{3413}{\eta} \text{ Btu/kWh} \quad (9-5)$$

### مثال ۹-۱ سیکل رانکین

یک سیکل رانکین در بین حدود فشار ۵۰۰ psia و ۲ psia کار می‌کند. دمای بخار آب ورودی به‌توربین  $700^\circ\text{F}$  می‌باشد. بازده حرارتی سیکل را با فرض انبساط آنتروپی ثابت در توربین محاسبه کنید.

حسّل: شکل‌های الف ۹-۲ و ۹-۳ برای این مسأله به‌کار می‌رود. با استفاده از جداول بخار آب و نمودار مولیر، برای خواص بخار آب داریم

$$h_1 = 1357 \quad (500 \text{ psia}, 700^\circ\text{F})$$

$$h_2 = 935 \quad (s_1 = s_2, p_2 = 2 \text{ psia})$$

$$h_3 = 94.02 \quad (2 \text{ psia در مایع اشباع})$$

کار پمپ  $h_4 - h_3$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود (مثال ۹-۲ را ببینید)

$$h_4 - h_3 = v_f(p_4 - p_3) = \frac{(0.01623)(500 - 2)(144)}{778} = 1.496 \text{ Btu/lbm}$$

بدین ترتیب

$$h_4 = 95.52 \text{ Btu/lbm}$$

کار خالص خروجی از سیکل برابر با کار خروجی از توربین منهای کار ورودی به پمپ یا  $(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)$  است. بازده حرارتی سیکل بر اساس کار خالص خروجی و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_H} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} = \frac{(1357 - 935) - 1.496}{1357 - 95.49} = 33.3 \text{ درصد}$$

## مثال ۹-۲ سیکل رانکین با بازگرمایش

سیکل بخاری در همان حد فشار و دمای بالایی و پایینی در مثال ۹-۱ کار می‌کند. بخار آب در فشار ۱۰۰ psia گرفته شده و تا  $700^\circ\text{F}$  بازگرم می‌شود. بازده حرارتی را تحت این آرایش جدید محاسبه کنید.

**حل:** سیکل بازگرمایش در شکل ۹-۴ نشان داده می‌شود. با به کار بردن شرح علائم این شکل، انتالیهای متفاوت را می‌توان از روی نمودار مولیر به دست آورد.

$h_1 = 1357$	(500 psia, $700^\circ\text{F}$ )
$h_2 = 1194$	( $s_1 = s_2$ , $p_2 = 100 \text{ psia}$ )
$h_3 = 1379$	(100 psia, $700^\circ\text{F}$ )
$h_4 = 1047$	( $s_3 = s_4$ , $p_4 = 2 \text{ psia}$ )
$h_5 = 94.02$	(مایع اشباع در 2 psia)
$h_6 = 95.52$	(مثال ۹-۱ را ملاحظه کنید)

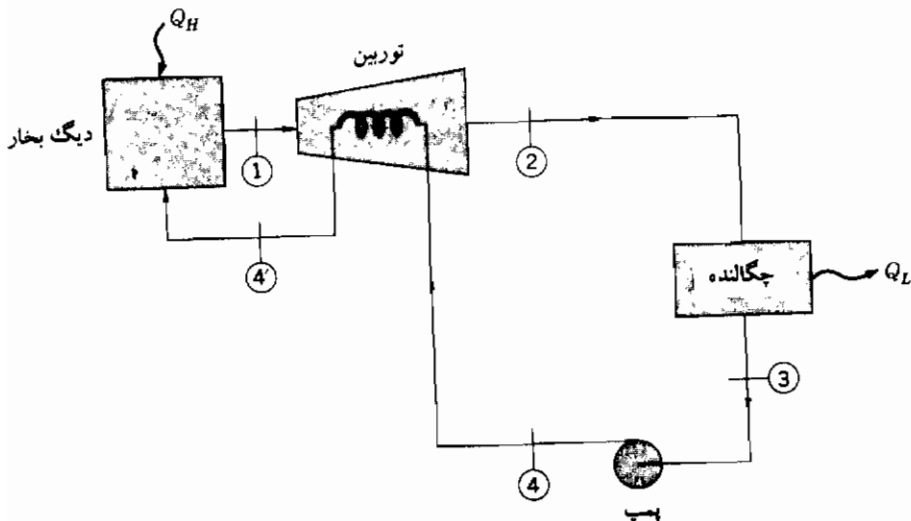
حالا بازده حرارتی به طریق زیر محاسبه می شود:

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) - (h_6 - h_5)}{(h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)}$$

$$= \frac{(1357 - 1194) + (1379 - 1047) - 1.496}{(1357 - 95) + (1379 - 1194)} = 34.2 \text{ درصد}$$

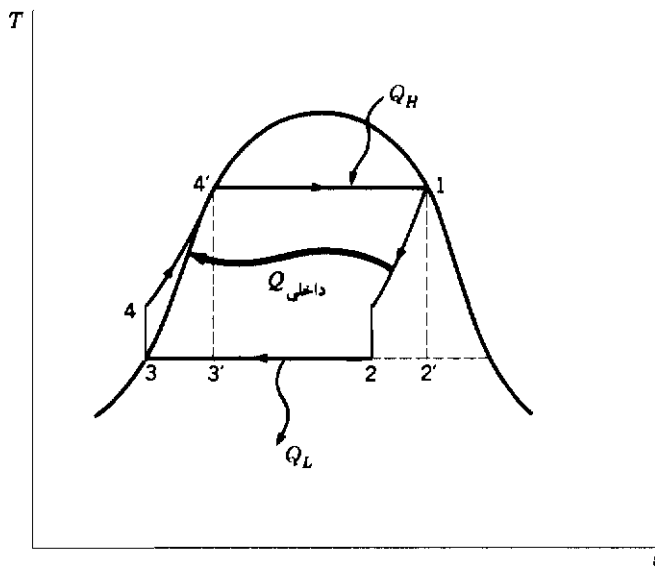
### بازیابی

هیچ کدام از دو مکانیزم داغ کردن و یا بازگرم، "افت" بازده در نتیجه فرآیند گرمایش در دمای پایین و حرارت دادن مایع از دمای خروجی پمپ تا دمای اشباع در حد فشار بالایی را جبران نمی کنند. این مشکل را می توان با استفاده از بازیاب حل کرد. یک سیکل بازیاب ایده آل در شکل ۹-۵ نشان داده شده است. هدف اصلی این است که از بخاری که در دمای بالا در توربین منبسط می شود برای پیش گرم کردن مایع قبل از ورود به دیگ بخار استفاده کرد. از این طریق حرارت منتقل شده به کل سیکل در دمای ثابت صورت می گیرد و مکانیزم دارای بازده مساوی با مقدار بازده کارنو خواهد بود. مطابق نمودار  $T-s$  در



شکل ۹-۵ سیکل بازیاب ایده آل بخار

شکل ۹-۶ سیکل واقعی ۱-۲-۳-۴-۴'-۳'-۲'-۱ می‌باشد. می‌توان تصور نمود که سیکل بازیاب ایده آل مانند سیکل کارنویی است که به یک سمت خم شده باشد. اصطلاح بازیابی به معنی بازیافت حرارت در سیکل به صورت داخلی توسط فرآیند تبادل حرارتی می‌باشد.



شکل ۹-۶ نمودار دما - آنتروپی

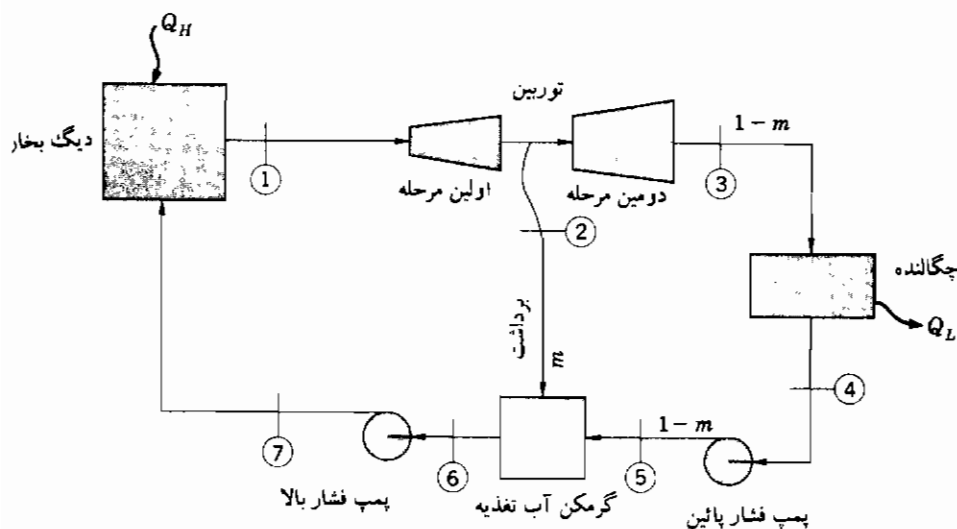
از نظر عملی مشکلاتی برای سیکل بازیاب ایده آل وجود دارد. امکان ندارد که توربینی طرح کرد که هم بعنوان یک دستگاه مولد قدرت و هم به صورت یک مبدل حرارتی کار کند. از این رو مبدل‌های حرارتی عملی که منجر به کاهش بازده سیکل واقعی بازیاب نسبت به مقدار ایده آل آن خواهد شد باید معرفی شود.

#### گرمکنهای آب تغذیه (ورودی)

آرایش سیکل بازیاب عملی با یک گرمکن آب تغذیه در شکل ۹-۷ نشان داده می‌شود. نشان داده‌ایم که بخار آب پرفشار در یک مرحله توربین منبسط گردید. سپس مقدار  $m$  برداشته شده و به

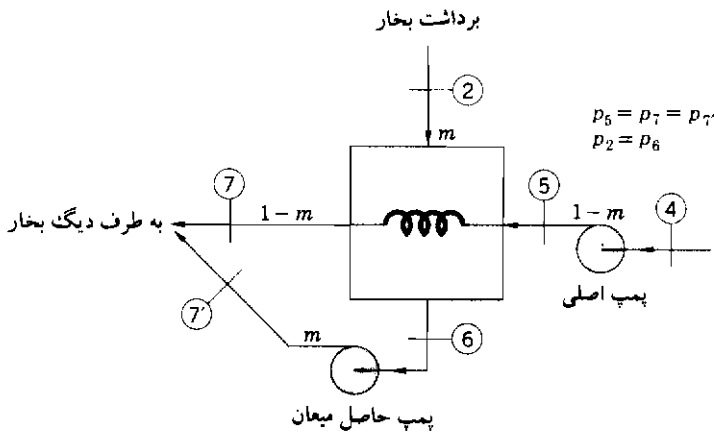
گرمکن آب تغذیه وارد می‌گردد. برای واحد جرم خروجی از دیگ بخار مقدار جرم  $1 - m$  باید در مرحله دوم توربین منبسط گردد. در این مورد گرمکن از نوع باز است بدین معنی که بخار آب گرفته شده از توربین مستقیماً با آب ورودی از پمپ در فشار پایین مخلوط می‌شود. بعضی اوقات این یک مبدل حرارتی تماس مستقیم<sup>۱</sup> نامیده می‌شود.

برای یک گرمکن آب تغذیه باز ایده آل فرض می‌کنیم که مخلوط شدن بخار و آب سرد در فشار ثابت صورت گیرد. براساس سیکل نشان داده شده در شکل ۹-۷ این به معنی  $p_5 = p_6 = p_2$  می‌باشد. آنچه می‌توانیم انتظار داشته باشیم که در این گرمکن صورت گیرد تولید مایع اشباع در نقطه ۶ است. ما نمی‌توانیم تراز انرژی بالاتری را تولید کنیم زیرا مخلوط تر بخار آب حاصل می‌شود و پمپ پرفشار طراحی شده برای مایعات غیر قابل استفاده می‌شود. در سیکل بخار آب واقعی، افت فشار می‌تواند در عرض گرمکن موجود باشد و دمای خروجی نیز در مقداری کمتر از دمای اشباع تنظیم گردد. اگرچه برای تجزیه و تحلیل سیکل در اینجا فرض می‌کنیم که افت فشار وجود نداشته باشد و دمای اشباع در خروجی گرمکن موجود باشد.



شکل ۹-۷ سیکل باز یا ب عملی با یک گرمکن آب تغذیه باز





شکل ۹-۸ گرمکن آب تغذیه بسته با پمپ حاصل میعان

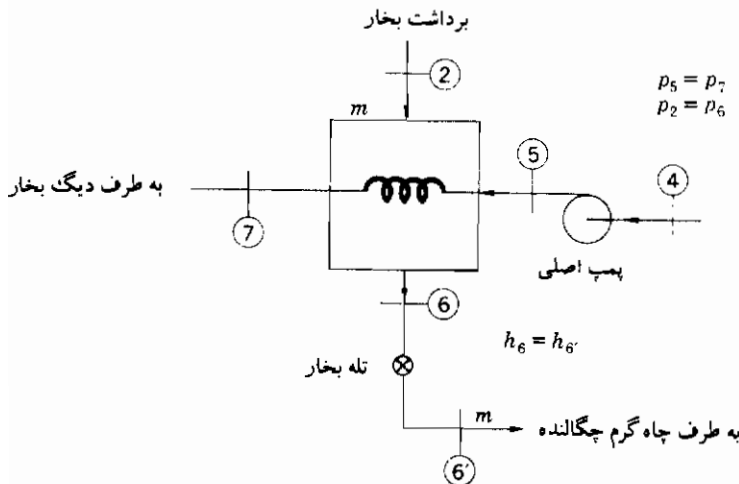
همچنین یک گرمکن آب تغذیه بسته را نیز می‌توانستیم به کار بگیریم و طرحواره چنین دستگاهی در شکل ۹-۸ نشان داده شده است. اصطلاح بسته به این معنی است که آب ورودی با بخار آب برداشت شده از توربین مخلوط نمی‌شود. از پمپ کوچکتر جداگانه‌ای برای پمپ کردن حاصل میعان<sup>۱</sup> به فشار دیگ بخار استفاده می‌شود. در این حالت تنها یک پمپ اصلی تغذیه آب وجود دارد. طرحواره دیگری برای استفاده از گرمکن آب تغذیه بسته در شکل ۹-۹ نشان داده شده است. در این مثال حاصل میعان پس از گذشتن از تله بخار<sup>۲</sup> به چاه گرم چگالنده<sup>۳</sup> می‌پیوندد. تله بخار دستگاهی است که از طریق یک شیر شناور اجازه می‌دهد مایع عبور کند اما مانع عبور بخار می‌شود.

گرمکن آب تغذیه بسته از نقطه نظر عملکرد بانوع باز آن فرق دارد. همان طوری که گفتیم، پمپ اصلی آب مایع را به فشار دیگ بخار می‌رساند به طوری که در شکل ۹-۸ فشار دیگ بخار  $p_5 = p_7 = p_{7'}$  می‌شود. برداشت بخار آب در نقطه ۲ به علت عبور از مرحله اول توربین در فشار پایین تری است. بسته به شرایط خاص سیکل بخار آب می‌تواند در ناحیه داغ یا مخلوط تر باشد. در گرمکن بسته برداشت بخار

1- Condensate

2- Steam trap

3- Condenser hot well



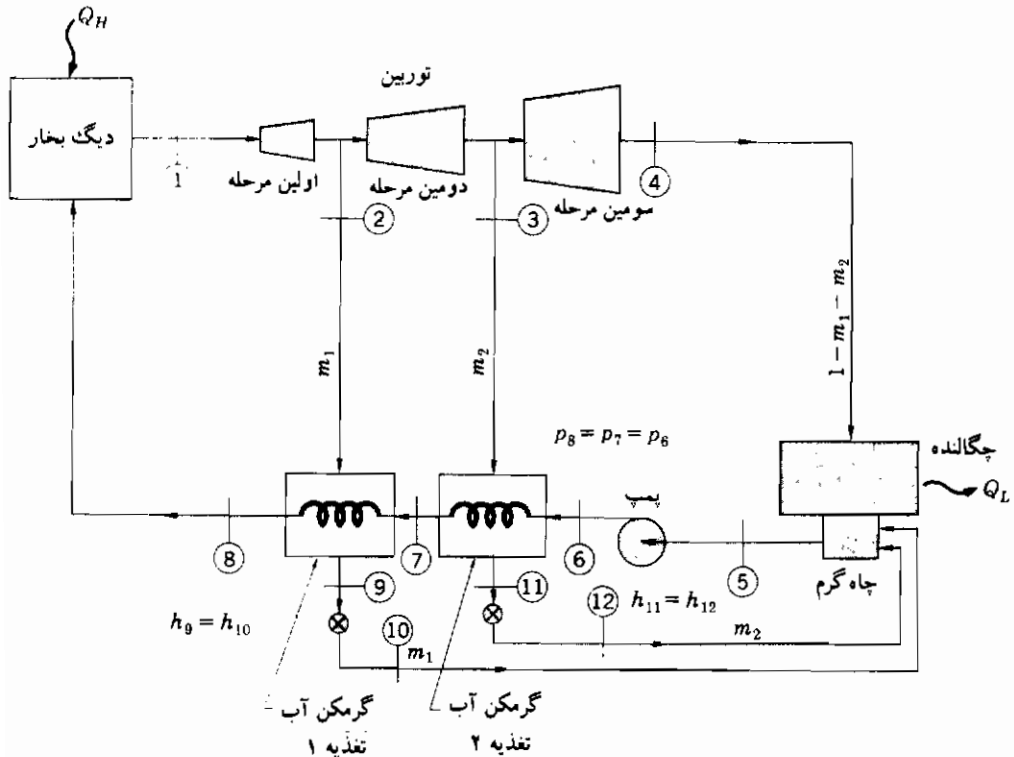
شکل ۹-۹ گرمکن آب تغذیه بسته با حاصل میعان به چاه گرم چگالنده

آب در معرض لوله‌هایی است که آب سرد پر فشار در میان آنها جریان دارد. در نتیجه بخار آب بر روی لوله‌ها تقطیر شده و انرژی آزاد شده در اثر فرآیند تقطیر، دمای آب تحویل شده به دیگ بخار را افزایش می‌دهد. می‌توان انتظار داشت که در این فرآیند آب پر فشار تا دمای اشباع مربوط به فشار برداشت گرم شود که در این دما تقطیر صورت می‌گیرد. بنابراین در نقطه ۷ مایع متراکم شده حاصل خواهد شد.

می‌توانیم بحثمان را در مورد دمای خروجی از گرمکنهای آب تغذیه به صورت جدول زیر خلاصه کنیم.

نوع گرمکن	فشار آب تغذیه خروجی	دمای آب تغذیه خروجی
باز	فشار برداشت	دمای اشباع مربوط به فشار برداشت (مایع اشباع)
بسته	فشار دیگ بخار	دمای اشباع مربوط به فشار برداشت (مایع متراکم شده)

برای نزدیک‌تر شدن به سیکل بازیاب ایده‌آل در عمل از چندین مرحله بازیاب استفاده می‌شود. طرحواره سیکلی که ۲ گرمکن آب تغذیه بسته دارد در شکل ۹-۱۰ نشان داده شده است. برای



شکل ۹-۱۰ طرحواره سیکل قدرت بخار با دو گرمکن آب تغذیه بسته.

واحد جرم خروجی از دیگ بخار بعد از برداشت  $m_1$  برای گرمکن اول  $1 - m_1$  برای انبساط در مرحله دوم توربین باقی خواهد ماند. سپس هنگامی که  $m_2$  جهت گرمکن دوم برداشت شود مقدار  $1 - m_1 - m_2$  برای مرحله سوم توربین باقی خواهد ماند.

تعداد گرمکن‌های آب تغذیه استفاده شده در نیروگاه واقعی بر اساس ملاحظات اقتصادی تعیین می‌شود. به طور کلی اگر بخواهیم مخارج اضافی را توجیه کنیم باید افزایش سرمایه گذاری ثابت برای گرمکنهای اضافی، مقدار کاهش هزینه‌های جاری در اثر بازده‌های بالاتر سیکل را جبران کند. جهت محاسبه کار خروجی و بازده‌های سیکل‌های بازیاب باید موازنه انرژی برای هر جزء

سیکل مانند سایر سیکلها صورت گیرد. جهت انجام چنین موازنه انرژی برای توربینها و پمپها نیاز به تعیین مقدار نرخ (های) برداشت می باشد. این کمیات می تواند از طریق موازنه انرژی برای گرمکنهای آب تغذیه مطابق با دمای خروجی بحث شده در بالا به دست آیند. برای مثال می توانیم موازنه انرژی را برای دو گرمکن آب تغذیه شکل ۹-۱۰ به صورت زیر بنویسیم:

$$(1)h_7 + m_1h_2 = (1)h_8 + m_1h_9$$

$$(1)h_6 + m_2h_3 = (1)h_7 + m_2h_{11}$$

زمانی که انتالیپها تعیین شدند  $m_1$  و  $m_2$  بسادگی قابل محاسبه می باشند.

حالا می توانیم طرح کلی را ببینیم. برای هر گرمکن آب تغذیه یک نقطه برداشت و یک مجهول نرخ جریان برداشت وجود دارد. برای هر گرمکن می توان موازنه انرژی را نوشت به طوری که یک معادله برای به دست آوردن جریان برداشت خواهیم داشت. حل این دسته از معادلات جریانهای برداشت لازم را به دست خواهد داد.

### مثال ۹-۳ سیکل بخار آب با بازیاب

سیکل بخار آب با بازیاب بین حدود فشار و دمای بالایی و پایینی داده شده در مثال ۹-۱ کار می کند. خروج بخار آب از توربین در ۱۰۰ psia صورت می گیرد و یک گرمکن آب تغذیه باز به کار می رود. بازده حرارتی سیکل را با فرض انبساط آنتروپی ثابت در توربین محاسبه کنید.

**حل:** این سیکل به صورت طرحواره ای در شکل ۹-۷ نشان داده شده است. برای انبساط آنتروپی ثابت در توربین

$$s_1 = s_2 = s_3$$

از نمودار مولیر به دست می آوریم

$$h_1 = 1357 \quad (500 \text{ psia}, 700^\circ\text{F})$$

$$\begin{aligned}h_2 &= 1194 && (100 \text{ psia}) \\h_3 &= 935 && (2 \text{ psia}) \\h_4 &= 94.02 && (\text{مایع اشباع در } 2 \text{ psia})\end{aligned}$$

پمپ فشار پایین، فشار حاصل میعان را به ۱۰۰ psia می‌رساند، به طوری که

$$h_5 - h_4 = v_f(p_5 - p_4) = \frac{(0.01623)(100 - 2)(144)}{778} = 0.294 \text{ Btu/lbm}$$

بدین ترتیب

$$h_5 = 0.294 + 94.02 = 94.31 \text{ Btu/lbm}$$

برای یک گرمکن آب تغذیه باز ایده آل  $p_2 = p_5 = p_6$  و فرض می‌شود شرایط مایع اشباع در نقطه ۶ وجود داشته باشد. بدین ترتیب

$$h_6 = 298.60 \quad (\text{مایع اشباع در } 100 \text{ psia})$$

برای پمپ پرفشار داریم

$$\begin{aligned}h_7 - h_6 &= v_f(p_7 - p_6) = \frac{(0.01774)(500 - 100)(144)}{778} \\&= 1.313 \text{ Btu/lbm} \quad (3.0589 \text{ kJ/kg})\end{aligned}$$

$$h_7 = 1.313 + 298.6 = 299.9 \text{ Btu/lbm} \quad (697.07 \text{ kJ/kg}) \quad \text{و}$$

حالا مادر موقعیت محاسبه نرخ برداشت  $m$  بوسیله موازنه انرژی در گرمکن آب تغذیه می‌باشیم. موازنه انرژی برای گرمکن آب تغذیه برابر است با

$$mh_2 + (1 - m)(h_5) = (1)(h_6) \quad (a)$$

با جایگزینی مقادیر عددی مناسب

$$m(1194) + (1 - m)(94.3) = 298.6$$

و

$$m = 0.186 \frac{\text{lbm برداشت شده}}{\text{lbm کل جریان}}$$

حالا بازده حرارتی سیکل از رابطه زیر به دست می آید.

$$\begin{aligned}\eta_{th} &= \frac{W}{Q_H} \\ &= \frac{(1)(h_1 - h_2) + (1 - m)(h_2 - h_3) - (1 - m)(h_5 - h_4) - (1)(h_7 - h_6)}{h_1 - h_7} \\ &= \frac{1}{1357 - 299.9} [(1)(1357 - 1194) + (1 - 0.186)(1194 - 935) \\ &\quad - (1 - 0.186)(0.3) - (1)(1.313)]\end{aligned}$$

$$\eta_{th} = 35.2 \text{ درصد}$$

#### ۹-۴ انحرافات از سیکل بخار تنوری

تمام سیکل‌های بخار که قبلاً درباره آنها بحث شد ایده آل هستند، بدین صورت که فرآیندهای انبساط و تراکم برگشت پذیر فرض می شود. به طور ضمنی فرض شده است که افتهای فشار بین اجزای سیکل در اثر اصطکاک سیال وجود ندارد. قابل ملاحظه ترین انحراف از رفتار ایده آل در فرآیند انبساط توربین اتفاق می افتد. در شکل ۹-۱۱ این انحراف بر روی نمودار  $h-s$  یا مولیر نشان داده می شود. به طور ایده آل فرآیند ۱-۲s به صورت برگشت پذیر آدیاباتیک صورت می گیرد. در واقع تأثیرهای متفاوت اصطکاک سیال سبب می شود که فرآیند مانند ۱-۲ عمل کند. هنوز فرآیند آدیاباتیک است، اما در نتیجه برگشت ناپذیرها، ازدیاد آنتروپی مشاهده می شود. بازده توربین توسط رابطه زیر تعریف می شود:

$$\eta_{\text{توربین}} = \frac{\text{کار واقعی}}{\text{کار آنتروپی ثابت}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (9-6)$$

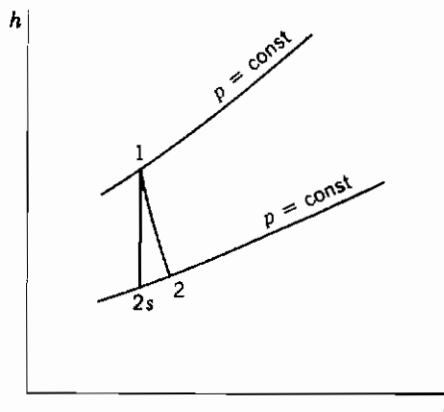
تعریف مشابهی جهت در نظر گرفتن برگشت ناپذیرها در پمپها برای سیکل اصلی رانکین به کار می رود

$$\eta_{\text{پمپ}} = \frac{\text{کار آنتروپی ثابت}}{\text{کار واقعی}} = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3} \quad (9-7)$$

در معادله (۹-۷) باید توجه داشت که کار آنتروپی ثابت برای پمپ کمتر از کار واقعی است، زیرا دستگاه قدرت می‌گیرد. به‌طور کلی بازده‌های توربین و پمپ را می‌توان فقط از طریق آزمایش تعیین کرد. تأثیر بازده‌های پمپ و توربین بر روی نمودار  $T-s$  برای سیکل اصلی رانکین در شکل ۹-۱۲ نشان داده شده است.

#### ملاحظات عملی

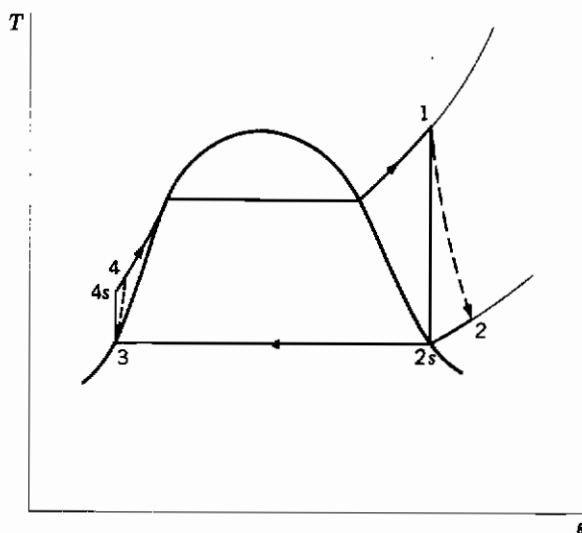
نیروگاه‌های مدرن بخار خیلی پیچیده‌تر از آن است که بتوان از بحث‌های بالا به‌همه نکات آن دست یافت. هر جزء سیکل، ماشین پیچیده‌ای است که دارای عملکرد متغیری، بسته به بار، سرعت و شرایط مختلف فشار و دما، می‌باشد. سیستم‌های کنترل دقیقی باید به‌خدمت گرفته شود تا عملکرد قابل



شکل ۹-۱۱ مقایسه فرآیندهای انبساط توربین واقعی و ایده‌آل

اعتماد و پایداری را، علاوه بر محافظت ماشین از تغییرات ناگهانی بار، دور و سایر متغیرها دارا باشد. همچنان‌که در فصل ۸ دیدیم، فرآیندهای احتراق می‌تواند شامل مسائلی باشد و این بخصوص برای دیگ‌های بخار بزرگ صادق است. نرخ جریانهای سوخت و هوا باید کاملاً کنترل شود تا از زیادی دماها که باعث صدمه دیدن لوله‌های دیگ بخار می‌شود جلوگیری گردد. در همان حال محدودیت‌های زیست محیطی می‌تواند مقدار مجاز محصولات فرآیند احتراق را که حالت کارکردی را محدود می‌کند

کنترل نماید. اگر سوخت ذغال سنگ باشد، فرآیند به خدمت گرفتن رضایتبخش آن در دیگ بخار می تواند به صورت یک مسأله کاملاً مهندسی مطرح باشد. ذغال سنگ باید استخراج شود، با کشتی حمل گردد و سپس در مکانی در واحد انبار گردد. سپس باید آن را به صورت پودر به اندازه مناسبی درآورد و به وسیله یک سیستم نقاله به دیگ بخار انتقال داد. یکی از مسائل خارج کردن و از بین بردن مقدار قابل ملاحظه ای خاکستر است که بعد از احتراق ذغال سنگ انباشت می گردد، و اگر ذغال سنگ پر گوگرد بسوزد، باید با استفاده از روشهای ماهرانه ای  $SO_2$  گازهای دودکش را خارج کرد. علی رغم تمام پیچیدگیها، نیروگاههای مدرن بخار در سرتاسر گیتی همیشه جهت تولید قابل اعتماد توان الکتریکی به کار می روند.



شکل ۹-۱۲ تأثیر فرآیندهای واقعی توربین و پمپ بر روی نمودار  $T-s$  سیکل اصلی رانکین

در این جا خواننده ممکن است به طور موقتی هدف از بازگرمایش، گرمکنهای آب تغذیه و غیره را از نظر دور کند. هدف افزایش بازده از طریق افزایش دمای متوسطی است که گرمایش به سیکل اضافه می کند. می توان پرسید که چرا شعله داغتری در دیگ بخار ایجاد نمی شود؟ جواب در ملاحظات متالورژیکی نهفته است که دماها یا فشارهایی را که لوله های دیگ بخار و پره های توربین می توانند تحمل کنند محدود می کند. همچنان که مواد بهتری ساخته می شود، می توانیم در حقیقت دماهای دیگ



بخار و توربین را افزایش دهیم و به بازده بالاتر دست یابیم. هنوز بازیابی و بازگرمایش جهت افزایش بازده به کار گرفته می‌شود.

اشاره کرده‌ایم که بازده می‌تواند با کاهش دمایی که در آن حرارت دفع می‌شود افزایش یابد، اگرچه این دما معمولاً به وسیله شرایط محلی محیط محدود می‌گردد. چون باید مقدار قابل ملاحظه‌ای انرژی از چگالنده خارج کرد، معمولاً مناسب است که محل نیروگاه به منظور سرمایه‌گذاری در نزدیکی دریاچه و یا رودخانه‌ای در نظر گرفته شود. در بعضی از موارد شرکتهای سازنده نیروگاه وقتی نیروگاهی می‌سازند دریاچه‌ای نیز به این منظور بنا می‌کنند. در بعضی جاها دریاچه و یا رودخانه وجود ندارد و فرآیند دفع حرارت با برجهای خنک‌کن صورت می‌پذیرد همان‌طوری‌که در بخش ۸-۷ توضیح داده شد. در بعضی از نقاط جهان آب برای خنک کردن براحتی در دسترس نیست و حرارت باید مستقیماً از چگالنده به هوای محیط داده شود. در این موارد به پروانه‌ها و مبدلهای حرارتی خیلی بزرگ نیاز است.

#### مثال ۹-۴ تأثیرات بازده‌های توربین

بازده حرارتی برای سیکل بازگرم مثال ۹-۲ را محاسبه کنید با فرض این که توربینها دارای بازده ۸۰ درصد باشند و فرآیندهای انبساط دیگر آنتروپی ثابت نباشد.

**حل:** فرآیندهای انبساط برای توربین‌ها به صورت طرحواره‌ای در شکل پیوست نشان داده شده است. فرآیندهای آنتروپی ثابت به صورت خط چین و فرآیندهای انبساط واقعی به صورت خطوط ممتد مشخص شده است. طرحواره کلی سیکل در شکل مثال ۹-۴ مشخص می‌شود. با به کار بردن تعریف بازده توربین از معادله (۶-۹) برای مرحله توربین اول داریم:

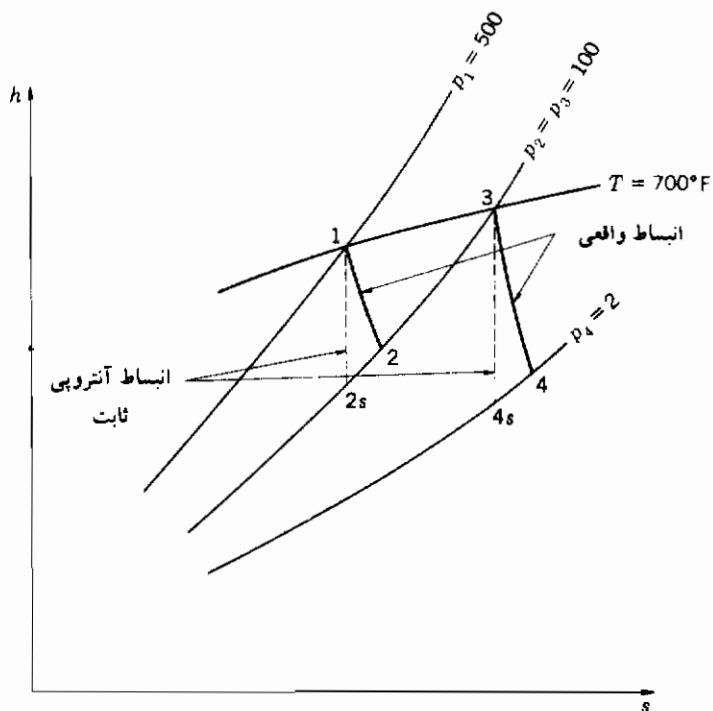
$$\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

همچنین برای مرحله توربین دوم:

$$\eta = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$$

از مثال ۹-۲،

$$\begin{aligned} h_1 &= 1357 & h_{4s} &= 1047 \\ h_{2s} &= 1194 & h_5 &= 94.02 \\ h_3 &= 1379 & h_6 &= 95.52 \end{aligned}$$



شکل مثال ۹-۲

$$0.8 = \frac{1357 - h_2}{1357 - 1194}$$

پس

$$0.8 = \frac{1379 - h_4}{1379 - 1047}$$

و

$$h_2 = 1227$$

بنابراین

$$h_4 = 1113$$

حالا بازده حرارتی به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\begin{aligned}\eta_{th} &= \frac{W}{Q_H} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) - (h_6 - h_5)}{(h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)} \\ &= \frac{(1357 - 1227) + (1379 - 1113) - 1.496}{(1357 - 95.5) + (1379 - 1227)} \\ &= 27.9 \text{ درصد}\end{aligned}$$

باید توجه داشت که کل حرارت اضافه شده در اثر انبساط غیر آتروپی ثابت در مرحله توربین اول کاهش می یابد. اگرچه این کاهش برای جبران تقلیل کار خروجی توربینها کافی نیست.

#### سیکلهای قدرت اتمی (هسته ای)

نیروگاههای اتمی که امروزه کار می کنند و آنهایی که برای آینده طرح شده اند همگی از سیکل بخار آب رانکین برای تبدیل حرارت به کار مفید استفاده می کنند. به جای احتراق سوختهای فسیلی<sup>۱</sup> یک راکتور اتمی به عنوان منبع حرارتی کار می کند. به علت خطرات رادیواکتیو، طرحهای ماهرانه ای برای جلوگیری از آلودگی سیکل قدرت بخار آب اصلی به کار می رود. سدیم مایع غالباً به عنوان سیال میانی برای تبادل حرارت از راکتور و سپس تبخیر آب تحت فشار به کار می رود. لوله کشی و پمپهای مخصوص برای این کاربردها مورد نیاز است تا از هرگونه نشت<sup>۲</sup> تماس مستقیم بین سدیم و آب جلوگیری شود.

نیروگاههای اتمی دو حسن آشکار دارند. اولاً آلودگی هوا تولید نمی کند زیرا هیچ گونه محصول احتراقی که در هوا پخش شود وجود ندارد، و ثانیاً تقاضا برای سوختهای نفتی و گاز طبیعی را که در منازل، واحدهای کوچک صنعتی و اتومبیل کاربرد دارد کاهش می دهند. اما نیروگاههای اتمی بدون ایراد هم نیستند. با افزایش مقدار قدرت تولید شده از طریق وسایل هسته ای، مشکل عمده زباله های اتمی است. دفن زباله ها در غارهای عمیق زیرزمینی یا دریایی ممکن است اما احتیاج به دقت در

ارزیابی تعیین تأثیرات احتمالی زیست محیطی دارد.

به خاطر نوع سیالی که باید در داخل راکتور گردش کند و مواد استفاده شده در ساخت نگهدارنده‌های سوخت هسته‌ای حد دمای بالایی واقعی در نیروگاه اتمی به اندازه نیروگاه سوخت فسیلی نیست. در نتیجه بازده کمتر خواهد بود و برای قدرت خروجی داده شده مقدار بیشتری حرارت باید در محیط دفع شود. بدین ترتیب، حرارت دادن نهرها و دریاچه‌ها یک مسأله خطیر از نظر زیست محیطی برای هر نیروگاه می‌باشد که برای نیروگاه اتمی بحرانی تر است. حد بالایی بازده در یک نیروگاه سوخت فسیلی حدود ۴۰ درصد و در نیروگاه اتمی فقط ۳۰ درصد است. بایک محاسبه ساده برای دو نیروگاه هر کدام با خروجی ۵۰۰ MW می‌توان دید که چگونه این کاهش در بازده در اتلاف حرارت دفع شده تأثیر می‌گذارد. در نیروگاه سوخت فسیلی

$$Q_H = \frac{500 \text{ MW}}{0.4} = 1250 \text{ MW}$$

$$Q_L = Q_H - W = 1250 - 500 = 750 \text{ MW}$$

و در نیروگاه اتمی

$$Q_H = \frac{500 \text{ MW}}{0.3} = 1667 \text{ MW}$$

$$Q_L = Q_H - W = 1667 - 500 = 1167 \text{ MW}$$

بدین ترتیب، در این مورد کاهش بازده از ۴۰ تا ۳۰ درصد، باعث افزایش حرارت خارج شده از ۷۵۰ تا ۱۱۶۷ MW یا ۵۶ درصد می‌شود. بنابراین می‌بینیم که باید بین محاسبه و معایب تولید قدرت اتمی سبک سنگین کرد. البته نکته مهم قابل توجه این است که تحلیل ترمودینامیکی سیکل رانکین بدون توجه به نوع کاربردش مانند قبل خواهد بود.

## ۹-۵ تحلیل سیکل قدرت

از بحث قبلی می‌توان دریافت که سیکل‌های قدرت بخار دارای اجزای زیادی است و برای برقراری موازنه انرژی مناسب باید دقت کرد. غالباً آدم وسوسه می‌شود که هر سیکل را به صورت خاص با روش تحلیل مخصوص به خود در نظر گیرد. روش خیلی بهتر و پذیرفته شده در این فصل برای تحلیل



نشان داده شده است.

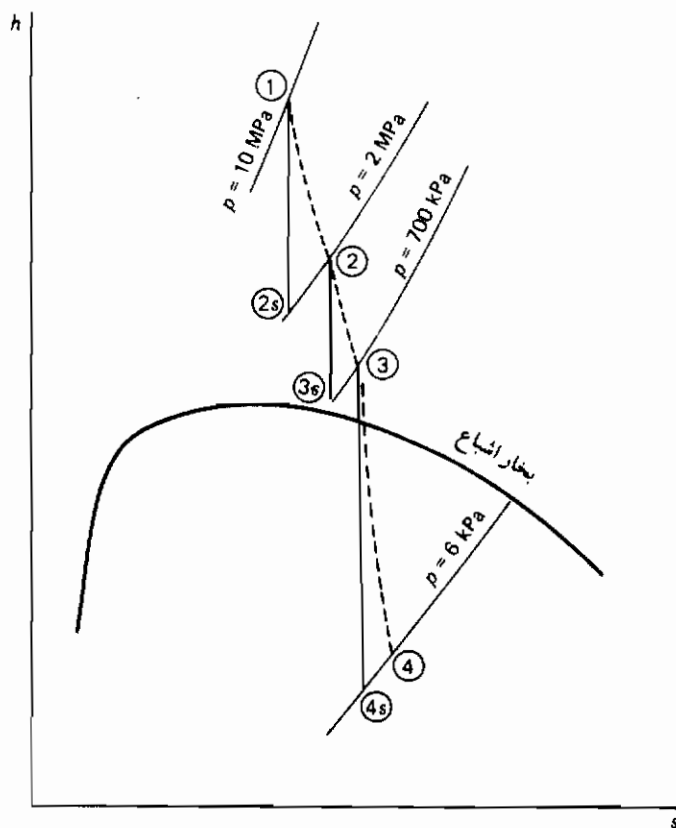
حل : از بیان مسأله داریم

$$p_1 = p_{13} = p_{12} = p_8 = p_7 = p_6 = 10 \text{ MPa}$$

$$T_1 = 540^\circ\text{C} \quad p_2 = p_{11} = 2 \text{ MPa}$$

$$p_3 = p_9 = 700 \text{ kPa} \quad p_4 = p_5 = 6 \text{ kPa}$$

از نمودار مولیر



شکل مثال الف ۵-۹

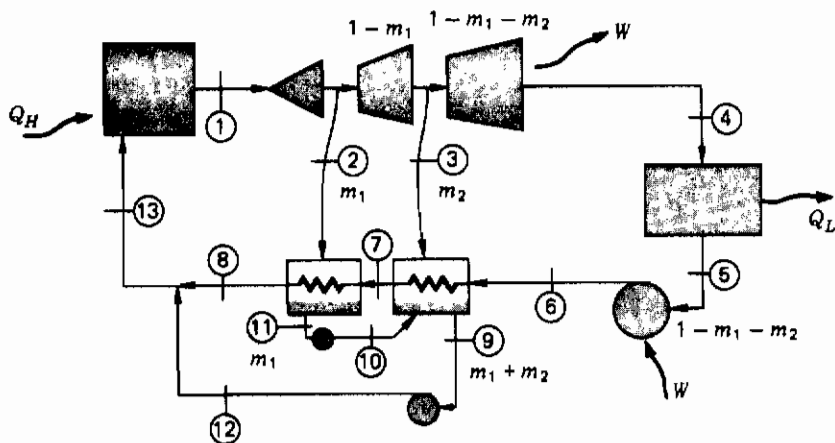
$$h_1 = 3475 \quad h_{2s} = 3005 \text{ kJ/kg}$$

با استفاده از بازده توربین

$$0.85 = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad h_2 = 3076 \text{ kJ/kg} \quad (a)$$

بنابراین

$$h_{3s} = 2828$$



شکل مثال ب ۵-۹

و

$$0.85 = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_{3s}} \quad h_3 = 2865 \text{ kJ/kg} \quad (b)$$

$$h_{4s} = 2136 \quad \text{حالا}$$

و

$$0.85 = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad h_4 = 2245 \text{ kJ/kg} \quad (c)$$

انتالپی مایعها حالا محاسبه می شود:

$$h_5 = 151.53 \quad (h_f \text{ در } 6 \text{ kPa})$$

$$\begin{aligned} h_{6s} - h_5 &= v_5(p_6 - p_5) = (1.0064 \times 10^{-3})(10000 - 6) \\ &= 10.06 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (d)$$

$$h_{6s} = 161.59 \text{ kJ/kg}$$

$$h_9 = 697.22 \quad (T = 165.0^\circ\text{C} \text{ و } 700 \text{ kPa در } h_f)$$

$$h_{11} = h_{10} = 908.79 \quad (T = 212.4^\circ\text{C} \text{ و } 2 \text{ MPa در } h_f)$$

$$\begin{aligned} h_{12s} - h_9 &= v_9(p_{12} - p_9) = (1.180 \times 10^{-3})(10000 - 700) \\ &= 10.3 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (e)$$

$$h_{12s} = 707.5 \text{ kJ/kg}$$

$$h_7 = 703.18 \quad (10 \text{ MPa}, 165^\circ\text{C}, \text{ A-10M جدول})$$

$$h_8 = 912.07 \quad (10 \text{ MPa}, 212.4^\circ\text{C}, \text{ A-10M جدول})$$

موازنه انرژی برای گرمکنها به صورت زیر است:

$$m_1 h_2 + (1 - m_1 - m_2)h_7 = (1 - m_1 - m_2)h_8 + m_1 h_1 \quad (f)$$

$$\begin{aligned} m_2 h_3 + (1 - m_1 - m_2)h_6 + m_1 h_{10} &= (1 - m_1 - m_2)h_7 \\ &+ (m_1 + m_2)h_9 \end{aligned} \quad (g)$$

مقادیر انتالپی مربوطه را می توان جایگزین کرد و معادلات را به صورت همزمان حل می کنیم تا مقادیر زیر به دست آید:

$$m_1 = 0.0721 \text{ kg} \quad m_2 = 0.1799 \text{ kg} \quad (h)$$

حال می توانیم بازده حرارتی سیکل قدرت را محاسبه کنیم:



$$\eta = \frac{(h_1 - h_2) + (1 - m_1)(h_2 - h_3) + (1 - m_1 - m_2)(h_3 - h_4) - (1 - m_1 - m_2)(h_{6s} - h_5) - (m_1 + m_2)(h_{12s} - h_9)}{h_1 - h_{13}} \quad (i)$$

انتالپی در نقطه ۱۳ از موازنه انرژی به دست می‌آید

$$(1 - m_1 - m_2)h_8 + (m_1 + m_2)h_{12} = (1)h_{13}$$

$$h_{13} = 860.5 \text{ kJ/kg} \quad (j)$$

با جایگزینی مقادیر انتالپی در معادله (i) بازده را به صورت زیر به دست می‌آوریم:

$$\eta = \frac{1048.4}{2614.5} = 40.1 \text{ درصد} \quad (k)$$

کار خروجی خالص برابر  $1048.4 \text{ kJ/kg}$  است به طوری که شدت جریان بخار لازم برای  $20000 \text{ kW}$  برابر است با

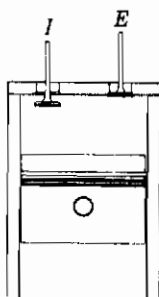
$$\dot{m} = \frac{20000}{1048.4} = 19.08 \text{ kg/s} = 6.87 \times 10^4 \text{ kg/h} \quad (l)$$

## ۹-۶ کمپرسورهای گاز

یک کمپرسور گازی را می‌توان به صورت دستگاه تبدیل انرژی در نظر گرفت چون کار مکانیکی را به انرژی پتانسیل ذخیره شده به صورت فشار بالا تبدیل می‌کند. بحث خود را با ماشین از نوع رفت و آمدی که در شکل ۹-۱۳ نشان داده شده آغاز می‌کنیم. نمودار فشار حجم ایده آل برای چنین ماشینی در شکل ۹-۱۴ نشان داده شده است. در نقطه ۴ پیستون بتازگی تراکم و تحویل گاز به سیلندر را تمام کرده و سوپاپ خروجی  $E$  بتازگی بسته شده است. حجم گاز باقی مانده در سیلندر در این زمان،  $V_4$  حجم مرده<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. همچنان که پیستون از موقعیت مرگ بالا<sup>۲</sup> ( $tdc$ ) به عقب برمی‌گردد، این حجم منبسط می‌شود تا به فشار  $p_1$  برسد. در این نقطه سوپاپ ورودی  $I$  باز می‌شود و گاز با ادامه حرکت

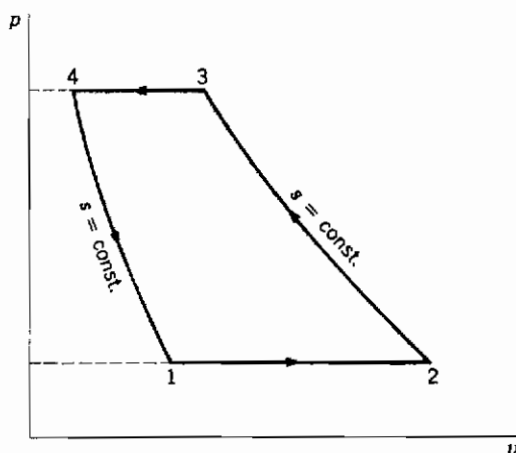
1- Clearance volume

2- Top dead center

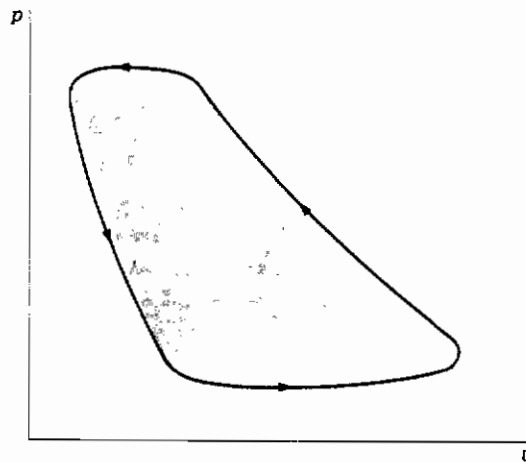


شکل ۹-۱۳ کمپرسور هوایی رلث و آمدی

به عقب پیستون، به داخل سیلندر کشیده می‌شود. هنگامی که پیستون به نقطه مرگ پایین  $1$  ( $bdc$ ) در نقطه  $2$  رسید، سوپاپ ورودی بسته می‌شود. گاز سپس از  $2$  تا  $3$  تراکم شده و سوپاپ خروجی در نقطه  $3$  باز می‌شود بنابراین اجازه می‌دهد که پیستون گاز را از سیلندر طی تحول  $3-4$  خارج کند.



شکل ۹-۱۴ نمودار  $p-v$  ایده‌آل برای کمپرسور هوایی رلث و آمدی


 شکل ۹-۱۵ نمودار  $p-v$  واقعی برای کمپرسور هوایی رفت و آمدی

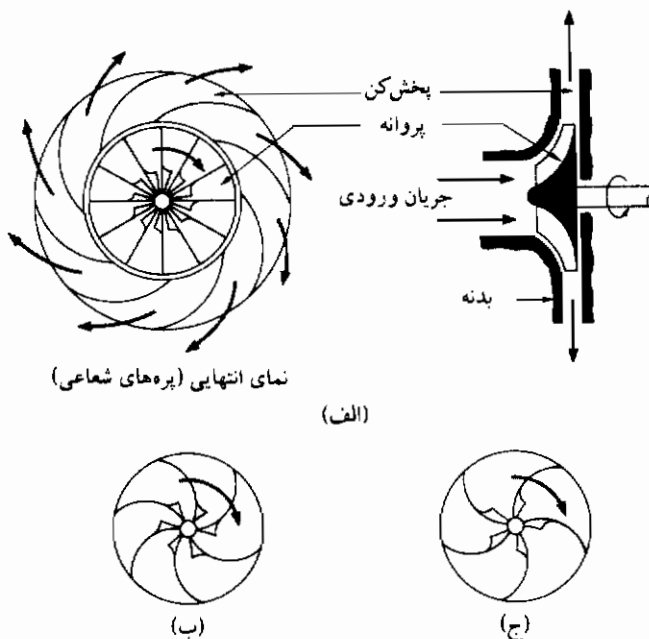
فرآیندهای واقعی تراکم و انبساط در سیلندر به صورت فرآیندهای تئوری نشان داده شده در شکل ۹-۱۴ صورت نمی‌گیرد. باز نشدن آنی سوپاپهای ورودی و خروجی و تأثیرات متفاوت افت فشار و اصطکاک می‌تواند باعث انحراف قابل ملاحظه‌ای از فرآیندهای ایده آل بشود. شکل ۹-۱۵ شکل یک  $p-v$  نمودار واقعی را که می‌تواند گرفته شود مشخص می‌کند.

شکل ۹-۱۶ اساس کمپرسورهای گریز از مرکز را نشان می‌دهد. هوا وارد بدنه شده و با پروانه پره‌دار چرخان<sup>۱</sup> به گردش در می‌آید. به خاطر عمل نیروی گریز از مرکز فشار در محیط بیرونی افزایش می‌یابد. در شکل (الف ۹-۱۶) پره‌های چرخان به طور شعاعی ساخته می‌شود. در حالی که قسمت پخش کننده<sup>۲</sup> ثابت در بدنه دارای پره‌هایی است که در جهت چرخش خم شده است. کمپرسورهای گریز از مرکز را همچنین می‌توان بسته به مشخصات فشار - سرعت دلخواه با پره‌های خمیده به جلو و عقب همان‌طور که در شکل (ب و ج ۹-۱۶) نشان داده شده ساخت. البته یک پروانه

1- Rotating- vane impeller

2- Diffuser

گریز از مرکز<sup>۱</sup> یا دمنده قفس سنجابی<sup>۲</sup> کمپرسوری است با ازدیاد فشار کم برای جابه‌جا کردن حجم جریان زیاد.



شکل ۹-۱۶ کمپرسور گریز از مرکز (الف) پره‌های شعاعی پروانه

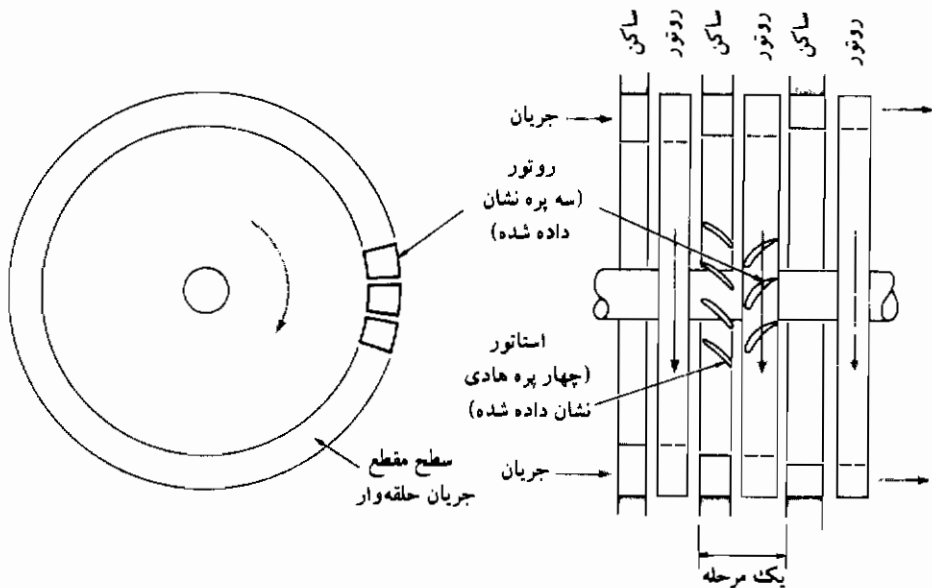
(ب) پره‌ها با خمیدگی به عقب (ج) پره‌ها با خمیدگی به جلو. نمودار بر طبق [11] Wood

عمل یک کمپرسور جریان محوری در شکل ۹-۱۷ نشان داده شده است. ماشین شامل تعدادی پره‌های چرخنده (روتور) است که یک در میان با قسمت‌های پره‌ای ثابت (استاتور) از هم جدا شده‌اند. هر مرحله از یک روتور و یک استاتور تشکیل می‌شود. روتورها همگی به یک محور مشترک متصلند در حالی که استاتورها در محفظه ثابتند. پره‌ها دارای مقطعی به شکل بال هواپیما می‌باشند و

1- Centrifugal fan

2- Squirrel-cage blower

افزایش فشار در نتیجه عمل خیزش<sup>۱</sup> بر روی پره‌ها حاصل می‌شود. به این دلیل، ازدیاد فشار در هر مرحله نسبتاً کم است و کمپرسورهای محوری همیشه از چندین مرحله پی‌درپی تشکیل می‌گردند تا بتواند نسبت تراکم قابل ملاحظه‌ای را ایجاد کند. البته طرح مقاطع به شکل بال هواپیما در روتور و استاتور، یک مسأله مهم و به طور قابل ملاحظه‌ای تابع کاربرد کمپرسور است. مثلاً کمپرسور محوری که در ورودی موتور جتی با سرعت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد کاملاً از کمپرسورهای سرعت کم مورد استفاده در یک نیروگاه ثابت متمایز است.



شکل ۹-۱۲ نمودار کمپرسور جریان محوری بر طبق [11] Wood

#### تراکم چند مرحله‌ای و خنک کردن میانی

کمپرسورهای گازی اساساً دستگاه‌های جریان دائم است. در ماشین‌های رفت و آمدی جریان دائم ضربه‌ای مشاهده می‌شود، اما کار ورودی از معادله انرژی جریان دائم محاسبه می‌شود. صرف نظر

از سرد شدنی که ممکن است بر روی دیواره سیلندر انجام پذیرد ماشین آدیاباتیکی است و کار معمولاً از تغییر انتالپی برای هوا محاسبه می‌شود. معمولاً برای حجمهای بزرگ هوا و نسبتهای فشار تقریباً پایین، کمپرسورهای گریز از مرکز یا کمپرسورهای نوع توربینی به کار می‌رود. توربوجت یکی از کاربردهای کمپرسورهای توربینی است. کمپرسورهای گریز از مرکز به طور وسیع در سیستمهای تهویه مطبوع بزرگ به کار می‌رود.

برای کمپرسور آدیاباتیکی جریان دائم که در شکل ۹-۱۸ نشان داده شده معادله انرژی به صورت زیر خواهد بود:

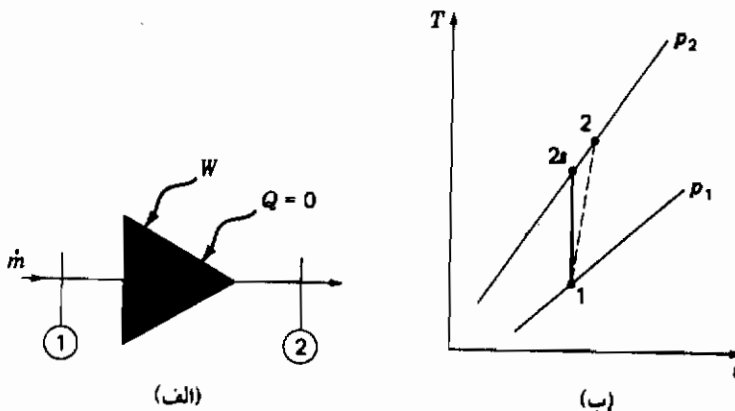
$$\dot{m}h_1 + W = \dot{m}h_2$$

یا برای گاز ایده آل

$$\dot{W} = \dot{m}c_p(T_2 - T_1)$$

اگر فرآیند برگشت پذیر باشد

$$T_{2s} = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$



شکل ۹-۱۸ کمپرسور جریان دائم آدیاباتیکی (الف) طرحواره (ب) نمودار  $T-s$

و

$$\dot{W} = \dot{m} c_p T_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] \quad (9-8)$$

بازده کمپرسور مانند پمپ به صورت زیر تعریف می‌شود:

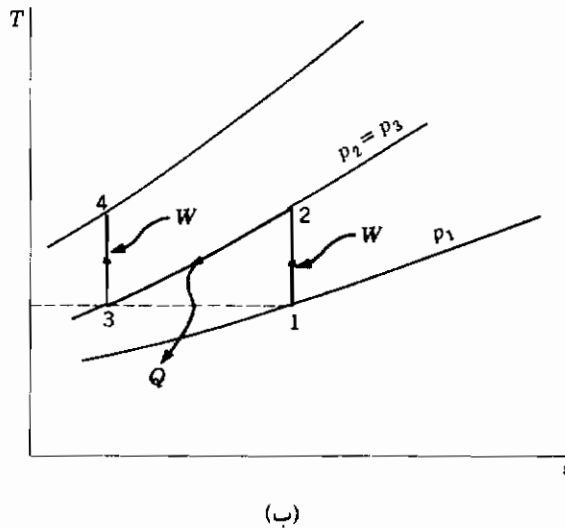
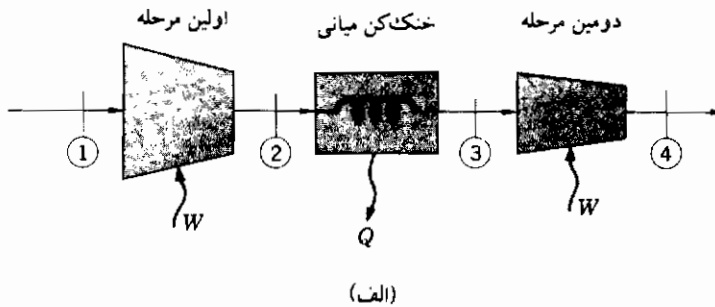
$$\eta_{\text{کمپرسور}} = \frac{\text{کار ورودی آنتروپی ثابت لازم}}{\text{کار ورودی واقعی}}$$

یا برای گاز ایده آل بر طبق نمودار  $T-s$  شکل ب ۹-۸

$$\eta_{\text{کمپرسور}} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (9-9)$$

اگر قرار است با فرآیند تراکم فشارهای خیلی زیاد ایجاد شود، این کار تنها با یک مکانیزم پیستون-سیلندر خیلی مشکل است. اولاً تراکم تا فشار بالا منجر به دمای بالای غیر مجاز در سیلندر می‌شود، به طور مثال تراکم آنتروپی ثابت از ۱ atm و ۷۰°F تا ۱۵۰۰ psia منجر به دمای ۱۵۳۰°F می‌شود. ثانیاً اگر سیلندر به اندازه کافی بزرگ باشد که بتواند جابه‌جایی حجم مشخصی از هوا را در فشار پایین انجام دهد، حجم مرده متناسب با آن در نقطه مرگ بالا خیلی کم است و با مسأله مهم نشت در اطراف رینگ‌های پیستون مواجه خواهیم بود. این مشکلات را می‌توان با اجرای تراکم در چندین مرحله همان طور که در شکل ۹-۱۹ نشان داده شده کاهش داد. مشکل دمای بالا با سرد کردن گاز بین مراحل حل می‌شود و مشکل نشت در فشار بالا به حداقل می‌رسد زیرا پیستون-سیلندر مرحله دوم می‌تواند کوچکتر باشد چون حجم ورودی گاز کاهش پیدا کرده است. البته اگر فشارهای خروجی خیلی بالا لازم باشد، مراحل تراکم زیادی را می‌توان به کار گرفت.

سرد کننده میان مرحله‌ای به طور مقتضی خنک‌کن میانی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود و برای مکانیزم ایده آل شکل ۹-۱۹ فرض می‌کنیم که گاز تا دمای ورودی ابتدایی قبل از پذیرش به مرحله بعدی سرد شود. در شکل ۹-۱۹ این بدین معنی است که برای یک خنک‌کن میانی ایده آل  $T_1 = T_2$  باشد. در یک کمپرسور چند مرحله‌ای (چند طبقه) مطلوب است که فشار میان مرحله‌ای طوری انتخاب گردد که کار کلی ورودی به حداقل برسد. با به کار بردن شرح علائم شکل ۹-۱۹ کار هر مرحله



شکل ۹-۱۹ آرایش خنک‌کن میانی برای کمپرسور هوا  
(الف) به‌طور طرحواره‌ای (ب) نمودار دما - آنترپوی

جهت تراکم آنترپوی ثابت بدین قرار است:

$$W_{12} = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1) = c_p T_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right]$$

$$W_{34} = h_4 - h_3 = c_p(T_4 - T_3) = c_p T_3 \left[ \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right]$$



کار کلی، جمع کارهای این مراحل است. امیدواریم که فشار میان مرحله‌ای  $p_2$  را طوری پیدا کنیم که کار کلی حداقل مقدار خود را داشته باشد. بنابراین مشتق می‌گیریم.

$$\frac{\partial W_{\text{کلی}}}{\partial p_2} = 0 = \frac{\partial}{\partial p_2} \left\{ c_p T_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} + \left( \frac{p_4}{p_2} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 2 \right] \right\}$$

که برای خنک‌کن میانی ایده‌آل  $p_2 = p_3$  و  $T_1 = T_3$  می‌باشد. با اجرای دیفرانسیل مشخص شده به دست می‌آوریم.

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_4}{p_3}$$

یا نسبت فشار در عرض هر مرحله یکسان است. اما  $p_2 = p_3$  بنابراین

$$\left( \frac{p_2}{p_1} \right) \left( \frac{p_4}{p_3} \right) = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^2$$

$$p_2 = (p_1 p_4)^{1/2} \quad \text{و}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{p_4}{p_1} \right)^{1/2} \quad \text{یا}$$

ما این رابطه را برای یک کمپرسور دو مرحله‌ای به دست آورده‌ایم اما تحلیل بیشتر نشان می‌دهد که نتیجه به‌طور کلی برای کمپرسور چند مرحله‌ای نیز صادق است، یعنی با شرط وجود تراکم آنتروپی ثابت و خنک‌کن میانی ایده‌آل، حداقل مقدار کار هنگامی که نسبت فشار در هر مرحله یکسان باشد حاصل می‌گردد. برای مثال، برای کمپرسور سه مرحله‌ای

$$\left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{1/3} = \text{نسبت فشار کلی} = \text{نسبت فشار یک مرحله}$$

## مثال ۹-۶

یک کمپرسور رفت و آمدی هوای جو را در  $14/7 \text{ psia}$  و  $70^\circ\text{F}$  دریافت کرده و در  $50 \text{ psia}$  خارج می‌کند. حجم مرده ۵ درصد حجم جابه‌جایی پیستون است و فرآیندهای تراکم و انبساط آنتروپی ثابت فرض می‌شود. محاسبه کنید:

(الف) حجم جابه‌جایی لازم پیستون را بر حسب فوت مکعب بر دقیقه جهت تراکم

$$100 \text{ ft}^3/\text{min} \text{ هوا در شرایط ورودی}$$

(ب) بازده حجمی را که به صورت زیر معرفی شده است:

$$\eta_{vol} = \frac{\text{جرم واقعی گاز متراکم شده}}{\text{جرم گاز اشغال کننده حجم جابه‌جایی پیستون در فشار و دمای ورودی}}$$

(ج) قدرت لازم بر حسب اسب بخار

حل: شکل ۱۴-۹ برای این مسأله به کار می‌رود. جابه‌جایی پیستون، حجم جارو شده در اثر حرکت پیستون از نقطه مرگ بالا به نقطه مرگ پایین می‌باشد. بدین ترتیب،

$$PD = V_2 - V_4 \quad (a)$$

$V_4$  حجم مرده است، بنابراین

$$V_4 = 0.05(V_2 - V_4) \quad (b)$$

حجم هوای آزادی که به داخل سیلندر کشیده می‌شود  $V_2 - V_1$  است، به طوری که

$$V_2 - V_1 = 100 \text{ ft}^3/\text{min} \quad (2832 \text{ liters/min}) \quad (c)$$

از آنجایی که فرآیندهای تراکم و انبساط آنتروپی ثابتند، داریم

$$\frac{V_1}{V_4} = \left(\frac{P_4}{P_1}\right)^{1/\gamma} = \left(\frac{50}{14.7}\right)^{1/1.4} = 2.395 \quad (d)$$

$$\frac{V_2}{V_3} = \left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{1/\gamma} = \left(\frac{50}{14.7}\right)^{1/1.4} = 2.395 \quad (e)$$

با ترکیب معادلات (b) و (c) و (d)

$$V_4 = 5.38 \text{ ft}^3/\text{min} \quad (152.3 \text{ liters/min})$$

$$V_1 = 12.9 \text{ ft}^3/\text{min} \quad (365.3 \text{ liters/min})$$

$$V_2 = 112.9 \text{ ft}^3/\text{min} \quad (3196.8 \text{ liters/min})$$

بدین ترتیب، حجم جابه‌جایی پیستون برابر است با

$$PD = V_2 - V_4 = 107.5 \text{ ft}^3/\text{min} \quad (3044 \text{ liters/min})$$

بازده حجمی می‌تواند به‌طریق زیر محاسبه شود.

$$\eta_{vol} = \frac{p_1(V_2 - V_1)/RT_1}{p_1(V_2 - V_4)/RT_1} = \frac{V_2 - V_1}{V_2 - V_4} = \frac{100}{107.5} = 93 \text{ درصد}$$

البته، اگر حجم مرده‌ای وجود نداشت، بازده حجمی ۱۰۰ درصد می‌بود اما از لحاظ عملی طراحی کمپرسوری با حجم مرده صفر امکان ندارد. ممکن است مقدار کار را با گرفتن انتگرال سطح نمودار  $p$ - $V$  محاسبه کنیم. یا برای یک سیکل بسته می‌توانیم انتگرال زیر را محاسبه کنیم

$$\oint p \, dV$$

یا به‌صورت کمی ساده‌تر در این حالت

$$W = \oint V \, dp$$

برای فرآیندهای آنتروپی ثابت داریم

$$\begin{aligned} \int_2^3 V \, dp &= \frac{\gamma}{1-\gamma} (p_3 V_3 - p_2 V_2) = \frac{\gamma p_2 V_2}{1-\gamma} \left[ \left( \frac{p_3}{p_2} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] \quad (f) \\ &= \frac{(1.4)(14.7)(144)(112.9)}{1-1.4} \left[ \left( \frac{50}{14.7} \right)^{0.4/1.4} - 1 \right] \\ &= -3.51 \times 10^5 \text{ ft.lbf/min} \quad (-7.93 \text{ kW}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_4^1 V \, dp &= \frac{\gamma p_4 V_4}{1-\gamma} \left[ \left( \frac{p_1}{p_4} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] \quad (g) \\ &= \frac{(1.4)(50)(144)(5.38)}{1-1.4} \left[ \left( \frac{14.7}{50} \right)^{0.4/1.4} - 1 \right] \\ &= 4.0 \times 10^4 \text{ ft.lbf/min} \quad (0.904 \text{ kW}) \end{aligned}$$

برای فرآیندهای فشار ثابت

$$\int_3^4 V dp = \int_1^2 V dp = 0 \quad (h)$$

بدین ترتیب

$$\begin{aligned} W_{\text{کلی}} &= -3.51 \times 10^5 + 4.0 \times 10^4 = -3.11 \times 10^5 \text{ ft.lbf/min} \\ &= -9.42 \text{ hp} \quad (-7.024 \text{ kW}) \end{aligned} \quad \text{یا}$$

این مقدار کار را گاز بر روی پیستون انجام داده است. کار ورودی به کمپرسور می‌توانست منفی این مقدار یا  $9.42 \text{ hp}$  باشد. همچنین می‌توانستیم تشخیص دهیم که کمپرسور یک دستگاه جریان دائم ضربانی<sup>۱</sup> است و شدت انجام کار برای یک فرآیند آدیاباتیک می‌توانست به‌طریق زیر محاسبه شود:

$$W = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (i)$$

که زیرنویس ۱ مربوط به شرایط ورودی و زیرنویس ۲ مربوط به شرایط خروجی است. برای رفتار گاز ایده‌آل با گرماهای ویژه ثابت

$$W = \dot{m}c_p(T_2 - T_1) \quad (j)$$

برای تراکم آنتروپی ثابت داریم

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(y-1)/y} = (530) \left( \frac{50}{14.7} \right)^{0.286} = 752^\circ\text{R} \quad (418 \text{ K})$$

شدت جریان جرمی از جریان حجمی در ورودی محاسبه می‌شود.

$$\dot{m} = \frac{P_1 \dot{V}_1}{RT_1} = \frac{(14.7)(144)(100)}{(53.35)(530)} = 7.486 \text{ lbm/min} \quad (3.396 \text{ kg/min})$$

سپس کار ورودی از معادله (j) به‌دست می‌آید.

$$W = (7.486)(0.24)(752 - 530) = 399 \text{ Btu/min}$$

$$= 9.42 \text{ hp} \quad (7.024 \text{ kW})$$

که مطابق با محاسبات قبلی است.

### مثال ۹-۷ کمپرسور دو مرحله‌ای

کمپرسور جریان دائم دو مرحله‌ای هوا را از  $14/7 \text{ psia}$  و  $70^\circ\text{F}$  تا  $100 \text{ psia}$  متراکم می‌کند. خنک‌کن میانی ایده‌آلی همراه با طبقه‌بندی بهینه به کار می‌رود. قدرت لازم بر حسب اسب بخار را اگر جریان جرمی هوا  $10 \text{ lbm/min}$  باشد محاسبه کنید. همچنین حرارت دفع شده در خنک‌کن میانی را محاسبه کنید. گرماهای ویژه را ثابت فرض کنید. مقدار کار این کمپرسور را با کار لازم جهت کمپرسور یک مرحله‌ای مقایسه کنید.

**حل :** برای این مسئله نمودارهای شکل ۹-۱۸ به کار می‌رود. داریم

$$T_1 = T_3 = 70^\circ\text{F} = 530^\circ\text{R} \quad (\text{خنک کردن میانی ایده‌آل})$$

$$p_2 = p_3 \quad p_1 = 14.7 \text{ psia} \quad p_4 = 100 \text{ psia}$$

برای طبقه‌بندی ایده‌آل

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_4}{p_3}$$

$$p_2^2 = p_1 p_4 \quad p_2 = 38.3 \text{ psia} \quad \text{یا}$$

برای تراکمهای آنتروپی ثابت

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

بدین ترتیب،

$$T_2 = (530) \left(\frac{38.3}{14.7}\right)^{0.286} = 697^\circ\text{R} \quad (387.2 \text{ K})$$

چون نسبت‌های فشار در هر مرحله مساوی است، داریم

$$T_4 = 697^\circ\text{R}$$

کار ورودی به‌ازای هر پوند جرم هوا برای دو مرحله عبارت است از

$$\begin{aligned} W &= h_2 - h_1 + h_4 - h_3 = (0.24)(697 - 530) + (0.24)(697 - 530) \\ &= 80.2 \text{ Btu/lbm} \quad (186.5 \text{ kJ/kg}) \end{aligned}$$

بنابراین، کار کلی برای جریان  $10 \text{ lbm/min}$  برابر است با

$$W_{\text{کلی}} = 802 \text{ Btu/min} \quad (14.1 \text{ kW})$$

از آنجایی که  $1 \text{ hp} = 2545 \text{ Btu/h}$

$$\text{hp} = \frac{(802)(60)}{2545} = 18.9$$

حرارت دفع شده در خنک‌کن میانی برابر است با

$$\begin{aligned} Q &= \dot{m}_a c_p (T_2 - T_3) = (10)(0.24)(697 - 530) \\ &= 401 \text{ Btu/min} \quad (7.05 \text{ kW}) \end{aligned}$$

برای تراکم آنتروپی ثابت یک طبقه، دمای خروجی از کمپرسور برابر است با

$$T_4 = T_1 \left( \frac{P_4}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} = (530) \left( \frac{100}{14.7} \right)^{0.286} = 917^\circ\text{R} \quad (509 \text{ K})$$

در این حالت مقدار کار برابر می‌شود با

$$\begin{aligned} W &= \dot{m}_a (h_4 - h_1) = (10)(0.24)(917 - 530) \\ &= 928 \text{ Btu/min} \quad (16.31 \text{ kW}) \end{aligned}$$

مزیت خنک‌کن میانی و کمپرسور چند طبقه روشن است، زیرا منجر به کاهش مقدار کار معادل  $13/5$

درصد می‌شود ( $928 \text{ Btu/min}$  تا  $802$ ). در شرایط واقعی مخارج افزوده شده بابت دستگاه خنک‌کن میانی - چند طبقه‌ای باید کاهش توان مورد نیاز جبران شود.

## ۹-۷ سیکل‌های موتور احتراق داخلی

در این بخش درباره سیکل‌های قدرت مختلفی بحث خواهیم کرد که اساس تئوری موتورهای اشتعال جرقه‌ای<sup>۱</sup> و اشتعال تراکمی<sup>۲</sup> (دیزل) را تشکیل می‌دهند. این سیکل‌ها در موتورهای رفت و آمدی به کار گرفته می‌شوند. درباره سیکلهایی که از جریان دائم سیال استفاده می‌کنند نظیر توربین‌های گازی در بخش ۹-۱۲ بحث می‌شود. از نقطه نظر عملی مفید است که سیکل‌های چهار زمانه و دو زمانه را شرح دهیم. دو شکل نمونه را که از موتور رفت و آمدی در شکل ۹-۲۰ نشان داده شده است در نظر بگیرید. اجازه دهید ابتدا سیکل موتور چهار زمانه بررسی شود. هنگامی که پیستون در نقطه مرگ بالا است ( $t_{dc}$ )، سوپاپ ورودی  $I$  باز می‌شود و همچنان که پیستون به طرف پایین حرکت می‌کند، مخلوط سوخت و هوا به داخل سیلندر کشیده می‌شود (مرحله مکش). در نقطه مرگ پایین ( $b_{dc}$ ) سوپاپها بسته می‌شوند و پیستون برای تراکم مخلوط به طرف بالا حرکت می‌کند (مرحله تراکم). در  $t_{dc}$  شمع جرقه می‌زند و باعث اشتعال سوخت و پایین آمدن مجدد پیستون می‌شود (مرحله قدرت). در  $b_{dc}$  سوپاپ خروجی  $E$  باز می‌شود و پیستون به بالا حرکت می‌کند تا محصولات احتراق را خارج کند (مرحله تخلیه). در خاتمه هنگامی که پیستون به  $t_{dc}$  می‌رسد سوپاپ خروجی بسته و سوپاپ ورودی باز می‌شود، در نتیجه سیکل دیگری آغاز می‌شود. باید توجه داشت که برای اجرای هر مرحله قدرت و جرقه زدن شمع دو دور کامل میل‌لنگ لازم است.

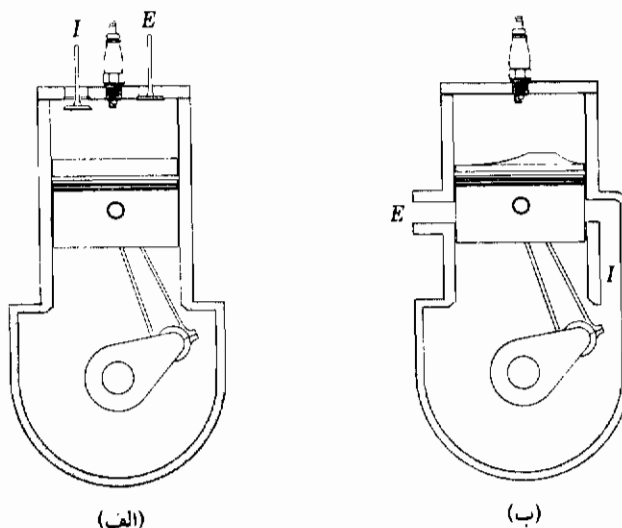
موتور دو زمانه عملیات بالا را ترکیب می‌کند به طوری که یک مرحله قدرت با یک دور میل‌لنگ حاصل می‌شود. اجازه دهید که سیکل را در لحظه  $t_{dc}$  درست موقعی که جرقه شمع عمل کرده است آغاز کنیم. در مرحله قدرت پیستون به طرف پایین حرکت می‌کند. در موتور دوزمانه محفظه میل‌لنگ آب بندی شده به صورت منبع ذخیره مخلوط سوخت و هوا به کار می‌رود. بدین ترتیب

1- Spark-ignition engines

2- Compression-ignition engines

هنگامی که در مرحله قدرت، پیستون به طرف پایین حرکت می‌کند، مخلوط سوخت و هوا در محفظه میل‌لنگ متراکم می‌شود. هنگامی که پیستون از دریچه‌های خروجی و ورودی می‌گذرد، گازهای خروجی خارج شده مخلوط سوخت و هوای متراکم شده با سرعت وارد سیلندر می‌شود. بدین ترتیب این مرحله، مرکب است از قدرت - تخلیه - مکش. با تکمیل این فرآیندها پیستون در یک مرحله تراکمی مجدداً تا جرقه زدن شمع در  $t_{dc}$  به طرف بالا حرکت می‌کند و سیکل جدیدی آغاز می‌شود.

در موتور دوزمانه، اختلاط اجتناب ناپذیر مخلوط سوخت و هوای ورودی با گازهای خروجی و حتی مقداری اتلاف سوخت از دریچه خروجی باعث می‌شود که این موتور به طور کلی از



شکل ۲۰-۹ مکانیزم اصلی موتور احتراق داخلی رفت و آمدی

(الف) چهار زمانه (ب) دو زمانه

موتور چهار زمانه بازده کمتری داشته باشد. اما این واقعیت که به ازای هر دور میل‌لنگ یک مرحله قدرت حاصل می‌گردد بدین معنی است که موتورهای دو زمانه معمولاً به ازای قدرت خروجی داده شده کوچکتر و از نظر وزن سبکترند. به همین دلیل معمولاً موتورهای دو زمانه در جایی به کار می‌روند که وزن و اندازه اهمیت دارد، مانند موتورهای خارج کشتی، اره زنجیری و موتور سیکلت.

در موتورهای احتراق داخلی واقعی مشکلاتی ایجاد می‌شود: تخلیه ناقص، احتراق ناقص،



مخلوط شدن گازهای ورودی و خروجی، میزان نبودن سوپاپها، احتراق خیلی سریع، احتراق خیلی بطئی و غیره. اگرچه پرداختن به این مشکلات از حیطه بحث ما خارج است.

در ادامه این فصل، درباره چند سیکل تئوری که می‌تواند برای تشریح رفتار موتور احتراق داخلی به کار رود تحقیق خواهیم کرد. برای تحلیل موضوع، فرض می‌کنیم که سیال عامل هوا باشد، که در این صورت سیکل‌ها به سیکل‌های استاندارد هوایی موسوم است.

## ۹-۸ سیکل اتو

ابتدا سیکل استاندارد هوایی اتو در شکل ۹-۲۱ را در نظر بگیرید. فرآیند تراکم با منحنی ۱-۲ معرفی شده و با فرآیند افزودن حرارت در حجم ثابت ۲-۳ دنبال می‌گردد، که تقریبی از احتراق سریع در موتور اشتعال جرقه‌ای است. سپس مرحله قدرت ۳-۴ انجام پذیرفته و با فرآیند دفع حرارت در حجم ثابت ۴-۱ دنبال می‌گردد که تقریباً مربوط به خارج کردن محصولات احتراق از طریق سوپاپ خروجی می‌شود. بازده حرارتی سیکل از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{mc_v(T_4 - T_1)}{mc_v(T_3 - T_2)} \quad (9-11)$$

در فرآیندهای آنتروپی ثابت

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{v_4}{v_3}\right) = \frac{T_3}{T_4}$$

با جایگزینی مناسب برای دماها در معادله (۹-۱۱)، بازده حرارتی به صورت زیر در می‌آید.

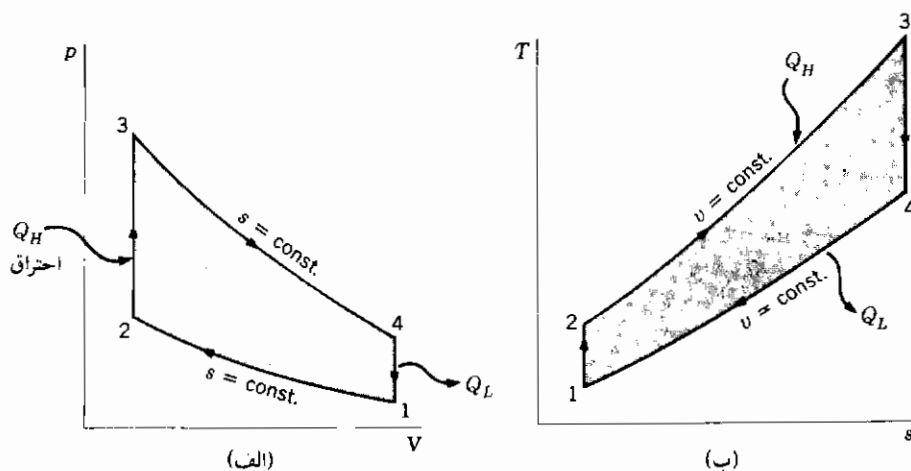
$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{1-\gamma}$$

$\frac{v_1}{v_2}$  نسبت تراکم  $r$  نامیده می‌شود به طوری که بازده را می‌توان به صورت زیر ارائه داد.

$$\eta = 1 - r^{1-\gamma} \quad (9-12)$$

واضح است که بازده حرارتی سیکل اتو با ازدیاد نسبت تراکم افزایش می‌یابد.

نسبت تراکم بالاتر یعنی دمای بالاتری که افزودن حرارت از آن شروع می‌شود و دوباره می‌بینیم که افزایش در دمایی که حرارت دادن صورت می‌گیرد باعث افزایش بازده می‌گردد. برای سالها کارخانجات موتورهای اتومبیل با استفاده از این اصل نسبت تراکم را پی در پی، بدون این که زیاد به اندازه فیزیکی موتور بیفزایند، بالا برده‌اند. نسبتهای تراکم خیلی بالا بدون عیب هم نیست. فشارها و دماهای بالاتر در  $t_{dc}$  باعث سوختن سریع‌تر می‌شود، به طوری که ضربه موتور<sup>۱</sup> در نتیجه موجهای کوبندگی<sup>۲</sup> در سیلندر حاصل می‌گردد. برای رفع چنین معایبی سوخت پرهزینه‌تری باید به کار رود تا خصوصیات زمان سوختن و ضد ضربه<sup>۳</sup> را افزایش دهد. به خصوص ترااتیل سرب به عنوان مواد افزونه سوخت برای این مقصود استفاده می‌شود. برای کاهش آلودگی محیط، امروزه در سیستم آگزیز بیشتر اتومبیل‌های مسافری مبدل‌های کاتالیزوری<sup>۴</sup> لازم است. مواد افزونه سوخت سرب‌دار مبدل‌ها را غیر فعال



شکل ۹-۲۱ نمودارهای سیکل استاندارد هوایی اتو

(الف) نمودار  $p-V$  (ب) نمودار  $T-s$

- 1- Engine knock
- 2- Detonation waves
- 3- Antiknock characteristics
- 4- Catalytic converters

می‌کند، بنابراین کارخانجات از بنزینهای بدون سرب استفاده می‌کنند و در نتیجه موتورهای با نسبت‌های تراکم پایین‌تری درست می‌کنند. این مثالی است از موازنه‌ای که باید بین حفاظت زیست محیطی و بازده در رسیدن به یک طرح مناسب مهندسی صورت گیرد. موتورهای احتراق داخلی از منابع اصلی آلودگی هوا هستند و کوششهای سختی می‌شود تا آلودگی گازهای خروجی را به حداقل برسانند. هزینه دستگاههای کنترل آلودگی و افزایش مصرف سوخت در اثر نصب این دستگاهها عوامل مهمی است که در طرحهای نهایی باید در نظر گرفته شود.

### مثال ۸-۹ بازده یک سیکل اتو

یک سیکل استاندارد هوایی اتو بین حدود دمای ۷۰ و ۱۵۰۰ °F کار می‌کند. بازده حرارتی سیکل را برای نسبت تراکمهای (الف) ۱۰:۱ (ب) ۱۲:۱ (ج) ۱۵:۱ محاسبه کنید. آن را با بازده سیکل کارنو مناسب مقایسه نمایید.

**حل:** بازده را از معادله (۹-۱۲) با به کار بردن  $\gamma = 1.4$  فوراً محاسبه می‌گردد.

$$\eta = 1 - r^{1-\gamma}$$

$$\text{در } r = 10,$$

$$\eta = 1 - (10)^{-0.4} = 60.2 \text{ درصد}$$

$$\text{در } r = 12,$$

$$\eta = 1 - (12)^{-0.4} = 63 \text{ درصد}$$

$$\text{در } r = 15,$$

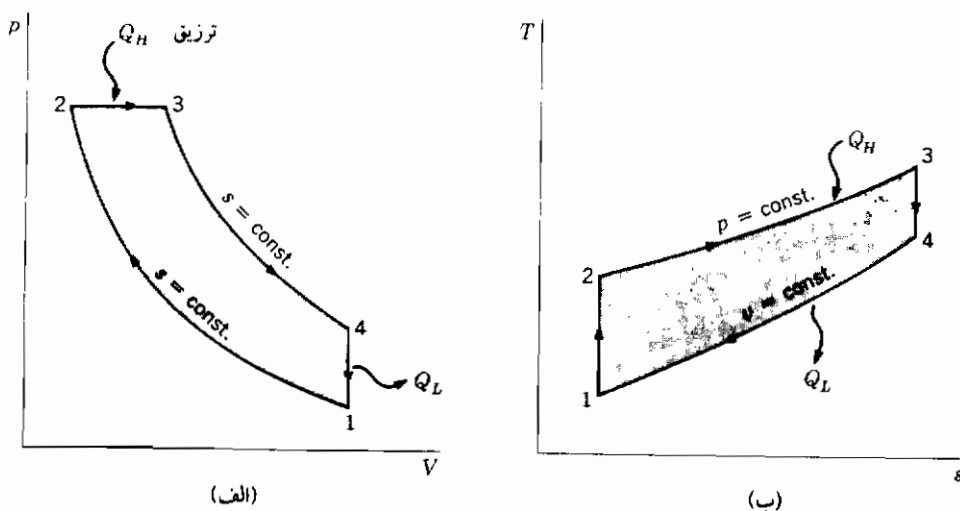
$$\eta = 1 - (15)^{-0.4} = 66.2 \text{ درصد}$$

این بازده‌ها را می‌توانستیم مستقیماً از روی شکل ۹-۲۳ بخوانیم. سیکل کارنویی که در حدود دمای داده شده کار کند دارای بازده زیر است:

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{530}{1960} = 73 \text{ درصد}$$

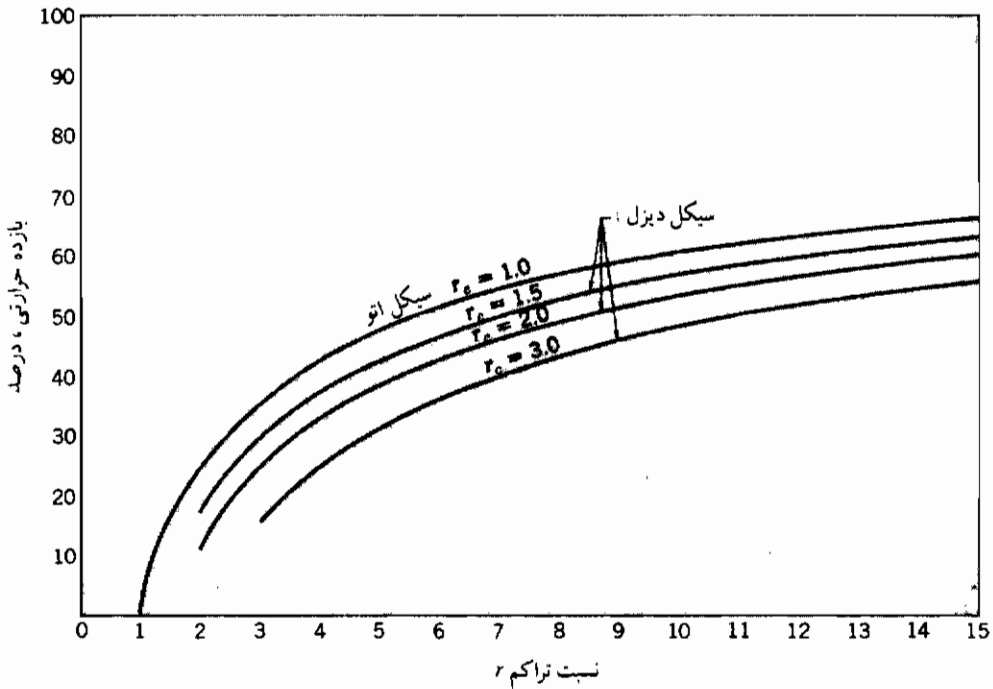
## ۹-۹ سیکل دیزل

حالا سیکل استاندارد هوایی دیزل را در شکل ۹-۲۲ ملاحظه کنید. سیکل دیزل شبیه سیکل اتو است بدین ترتیب که تراکم آنتروپی ثابت فرض می‌شود، همچنین دفع حرارت از گازهای خروجی نیز در حجم ثابت ۴-۱ صورت می‌گیرد. تفاوتی که با سیکل اتو دارد این است که افزایش حرارت در فرآیند فشار ثابت مرحله ۲-۳ صورت می‌گیرد، یعنی اشتعال و احتراق قسمتی از کل مرحله قدرت ۲-۳-۴ را تشکیل می‌دهد. سیکل دیزل اساس موتورهای اشتعال تراکمی واقعی است. در این موتورها هوا تا فشارهای بالا (نقطه ۲) و در نتیجه در دماهای بالا تراکم می‌شود. سپس سوختی با نقطه اشتعال پایین به داخل سیلندر در لحظه  $tdc$  تزریق می‌شود. دمای بالای تراکم جهت فروزش سوخت کافی است و سوختن از ۲ تا ۳ همچنان که مقدار بیشتری سوخت به داخل سیلندر تزریق می‌شود ادامه دارد. محصولات داغ احتراق سپس در داخل سیلندر طی فرآیند ۳-۴ منبسط می‌شوند. در موتورهای دیزل واقعی فرآیند تزریق مسأله خطیری است و مهندسان برای طرح مکانیزم سوخت پاش (انژکتور) کوشش زیادی می‌کنند.



شکل ۹-۲۲ نمودارهای سیکل استاندارد هوایی دیزل

(الف) نمودار  $p-V$  (ب) نمودار  $T-s$



شکل ۹-۲۳ مقایسه بازده‌های سیکل‌های استاندارد هوایی اتو و دیزل برای  $\gamma = 1.4$

بازده سیکل دیزل از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} \quad (9-13)$$

با به کار بردن رابطه‌های آنتروپی ثابت

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma-1} \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^{\gamma-1}$$

رابطه بازده به صورت زیر در می‌آید:

$$\eta = 1 - \frac{r^{1-\gamma}(r_c^\gamma - 1)}{\gamma(r_c - 1)} \quad (9-14)$$

$$r = \frac{v_1}{v_2} \text{ نسبت تراکم و } r_c = \frac{v_3}{v_2} \text{ نسبت قطع - سوخت}^1 \text{ است.}$$

بازده‌های سیکل‌های اتو و دیزل در شکل ۹-۲۳ رسم شده است. واضح است که برای نسبت تراکم داده شده‌ای، سیکل اتو از سیکل دیزل بازده بیشتری دارد. دلیل فیزیکی این رفتار این است که فرآیند افزودن حرارت در حجم ثابت منجر به انتقال حرارت در دمای بالاتری نسبت به فرآیند فشار ثابت برای نسبت تراکم یکسان می‌شود. اگرچه این بدین معنی نیست که سیکل اتو یا موتور اشتعال - جرقه‌ای همیشه نسبت به موتور دیزل مناسب‌تر است. در حقیقت موتور دیزل می‌تواند در نسبت تراکم‌های خیلی بیشتری نسبت به موتور اشتعال جرقه‌ای کار کند، زیرا کوبندگی<sup>۲</sup> (احتراق پرفشار) و پیش‌سوزی<sup>۳</sup> (پیش‌اشتعالی) به متراکم کردن مخلوط سوخت و هوا تا فشار زیاد مربوط می‌شود. اگر مخلوط سوخت و هوا تا فشار خیلی بالایی متراکم شود، ممکن است قبل از رسیدن پیستون به *tac* مشتعل شود و باعث کاهش قدرت موتور گردد. موتور دیزل با چنین مشکلاتی روبرو نیست زیرا فقط هوا را متراکم می‌کند و سوخت تا زمان مناسب برای احتراق وارد سیلندر نمی‌شود.

هیچ کس سیکل اتو (اشتعال - جرقه‌ای) یا سیکل دیزل را تنها بر اساس اطلاعات ترمودینامیکی که در بالا آمد انتخاب نمی‌کند. در طرح خاص هر نوع موتوری باید ملاحظات در نظر گرفته شود. اکثر موتورهای دیزل سیستم تزریق دقیقی را که درست مقدار مناسب سوخت را به داخل سیلندر می‌باشد به کار می‌گیرند. البته مدت تزریق و بنابراین فشار تزریق شدیداً بستگی به دور موتور دارد. نتیجه این می‌شود که اگر دستیابی به کارکرد بهینه لازم باشد، موتور دیزل باید در محدوده تغییرات سرعت کمتری کار کند. برعکس موتور اشتعال جرقه‌ای با یک طرح مناسب سیستم کاربراتور می‌تواند با بازده خوبی بین محدوده تغییرات سرعت بیشتری کار کند. به‌خاطر این دلایل معمولاً موتورهای دیزل را برای کاربردهایی که سرعت‌های ثابت لازم دارند (مانند لکوموتیو، کامیونهای بزرگ، مولدهای الکتریکی ثابت و نظایر آن) به کار می‌بریم، در حالی که موتورهای اشتعال جرقه‌ای تقریباً به‌طور انحصاری در

1- Cut-off ratio

2- Detonation

3- Preignition

خودروهای شخصی که تغییر سرعت در آنها زیاد است به کار می‌رود. شاید در آینده با ریزپردازنده الکترونیکی، کنترل فرآیند تزریق در موتورهای دیزل به طور وسیعی صورت گیرد و در نتیجه باعث بهبود عملکرد در سرعت‌های مختلف گردد.

### مثال ۹-۹ سیکل دیزل

کار خروجی به ازای هر پوند جرم برای سیکل استاندارد هوایی دیزل را با  $r = 15$  و  $r_c = 2$  محاسبه کنید. شرایط ورودی  $14/7$  psia و  $70^\circ\text{F}$  است. بازده را نیز محاسبه کنید.

حل: شکل ۹-۲۲ طرحواره فرآیند و سیکل را برای سیکل دیزل نشان می‌دهد. داریم

$$T_1 = 70^\circ\text{F} = 530^\circ\text{R}$$

$$p_1 = 14.7 \text{ psia}$$

از رابطه‌های آنتروپی ثابت داریم

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{\gamma-1}$$

$$T_2 = (530)(15)^{0.4} = 1565^\circ\text{R} \quad (869 \text{ K})$$

برای فرآیند افزودن حرارت در فشار ثابت داریم

$$\frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

بدین ترتیب

$$T_3 = (1565)(2.0) = 3130^\circ\text{R} \quad (1739 \text{ K})$$

دما در انتهای مرحله قدرت از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$\frac{T_4}{T_3} = \left( \frac{V_3}{V_4} \right)^{\gamma-1}$$

اما  $v_3 = 2v_2$ ، بنابراین

$$\frac{v_3}{v_4} = \frac{2v_2}{v_4} = \frac{2v_2}{v_1} = \frac{2}{15}$$

$$T_4 = (3130) \left( \frac{2}{15} \right)^{0.4} = 1395^\circ\text{R} \quad (775 \text{ K})$$

بدین ترتیب

حالا حرارت اضافه شده و دفع شده را می‌توان محاسبه کرد.

$$\begin{aligned} Q_H &= c_p(T_3 - T_2) \\ &= (0.24)(3130 - 1565) = 375 \text{ Btu/lbm} \quad (872.2 \text{ kJ/kg}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_L &= c_v(T_4 - T_1) \\ &= (0.1715)(1395 - 530) = 148 \text{ Btu/lbm} \quad (344.2 \text{ kJ/kg}) \end{aligned}$$

بنابراین کار خروجی به ازای هر پوند جرم برابر است با،

$$W = Q_H - Q_L = 375 - 148 = 227 \text{ Btu/lbm} \quad (528 \text{ kJ/kg})$$

بازده برابر است با

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{227}{375} = 60.5 \text{ درصد}$$

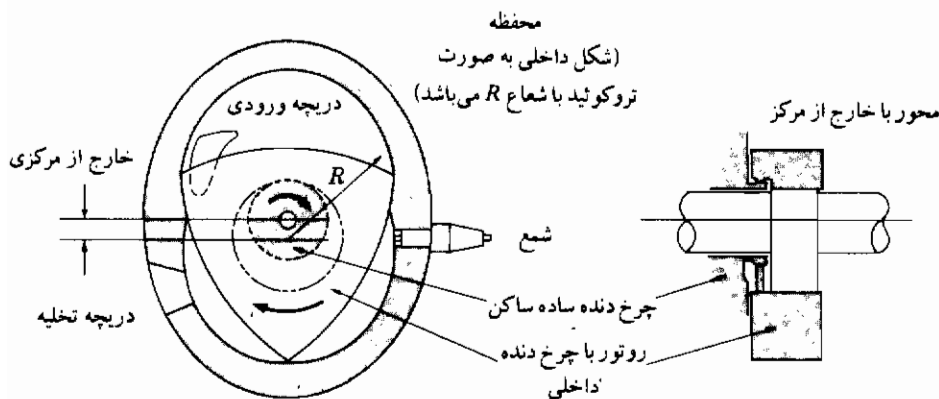
این مقدار ممکن است با مراجعه به شکل ۹-۲۳ کنترل شود.

## ۹-۱۰ موتور وانکل<sup>۱</sup>

موتور احتراق داخلی از نوع دوار با کاربردهای روبه‌افزایشی، موتور وانکل نشان داده شده در شکل ۹-۲۴ می‌باشد. در این مکانیزم روتور سه پهلویی که به‌طور خارج از مرکز بر روی محوری که متصل به چرخ دنده اقماری است سوار می‌شود، به‌طوری‌که روتور با سرعتی معادل یک سوم دور محور



می‌چرخد. سطح داخلی محفظه به شکل تروکوئیدی<sup>۱</sup> خاصی با شعاع  $R$  ایجاد شده است. همان‌طور که روتور در جهت عقربه‌های ساعت حرکت می‌کند، فرآیندهای همزمانی به ترتیب زیر در سه محفظه اتفاق می‌افتد: همچنان که روتور از قسمت دریچه هوا می‌گذرد مخلوط تازه سوخت و هوا به داخل مکیده می‌شود و حرکت بیشتر روتور باعث بسته شدن دریچه ورودی شده مخلوط متراکم می‌گردد. هنگامی که رأس روتور تقریباً به موقعیت شمع برسد، احتراق و انبساط (در مرحله قدرت) در محفظه سمت راست پایینی اتفاق می‌افتد. در خاتمه محصولات احتراق ناگزیرند که از دریچه خروجی محفظه سمت چپ پایینی خارج شوند. دستگاه خیلی آرام کار می‌کند و میزان ارتعاش و صدای آن کمتر از سیکل اتو مشابه می‌باشد. حسن دیگر آن این است که ساختمان خیلی سبکی برای قدرت خروجی داده شده دارد. مهمترین مشکلات عملی طرح با اصطکاک و آب‌بندی روتور ارتباط دارد.



شکل ۹-۲۴ طرحواره موتور احتراقی دوار و اتکل نمودار بر اساس [11] Wood .

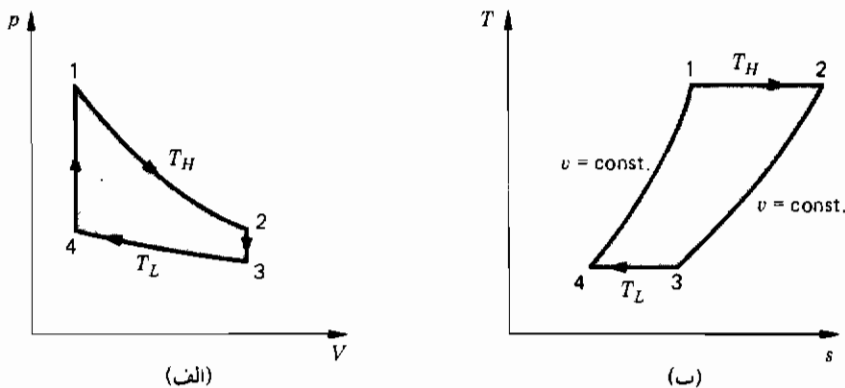
## ۹-۱۱ سیکل استرلینگ

اکنون به بررسی سیکلی می‌پردازیم که علاوه بر ارائه بازده بالا کاهش آلودگی از محصولات احتراق را نیز در بر دارد. این چرخه سیکل استرلینگ نامیده می‌شود و نمودارهای  $p-V$  و  $T-s$  آن در شکل ۹-۲۵ نشان داده شده است.

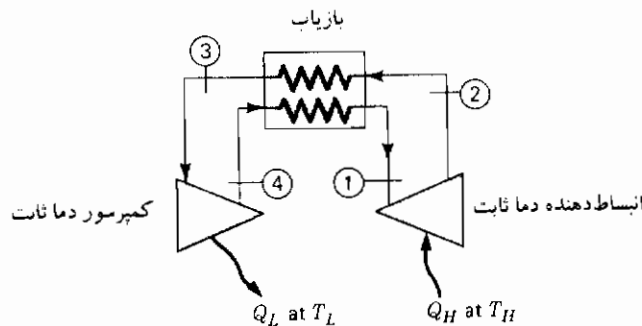
سیال عامل یک گاز است و فرآیندهای برگشت پذیر را برای سیکل ایده آل فرض می‌کنیم. در فرآیند ۱-۲ حرارت در دمای ثابت  $T_H$  اضافه می‌گردد. فرآیند ۲-۳ دفع حرارت در حجم ثابت است و فرآیند ۳-۴ دفع حرارت در دمای ثابت  $T_L$  است و بالاخره ۴-۱ افزایش حرارت در حجم ثابت می‌باشد. سیستم بسته است و رفتار گاز ایده آل را فرض می‌کنیم. از آنجا که فرآیندهای ۲-۳ و ۴-۱ در حدود دمای یکسانی صورت می‌گیرد، حرارت دفع شده در ۲-۳ باید از نظر عددی برابر با حرارت اضافه شده در ۴-۱ باشد. این واقعیت بلافاصله استفاده از بازیاب را مطرح می‌کند. اگر حرارت از ۲-۳ به فرآیند ۴-۱ به صورت داخلی در سیکل منتقل شود، ما دارای یک سیکل برگشت پذیر با افزودن و دفع حرارت در دماهای ثابت هستیم. چنین سیکلی دارای بازدهی معادل بازده سیکل کارنو است یا

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (۹-۱۵)$$

سیکل استرلینگ یا بازیاب در شکل ۹-۲۶ نشان داده شده است. سیکل می‌تواند با یک وسیله احتراق خارجی کار کند و نتایج تحقیقات نشان داده است که به عنوان وسیله‌ای جهت کاهش آلودگی اگرز در مقایسه با موتور احتراق داخلی است. مشکلاتی در مورد سیکل وجود دارد. برای آن که نسبت قدرت به وزن قابل قبول باشد باید فشارهای خیلی بالا را به کار گرفت و بازیاب شامل احتیاجات



شکل ۹-۲۵ سیکل استرلینگ (الف) نمودار  $p-V$  (ب) نمودار  $T-s$



شکل ۹-۲۶ سیکل استرلینگ با بازیاب

طراحی انتقال حرارت سختی می‌باشد. دستگاههایی ساخته‌اند که از هوا، هلیوم و هیدروژن به‌عنوان سیال عامل استفاده می‌کند.

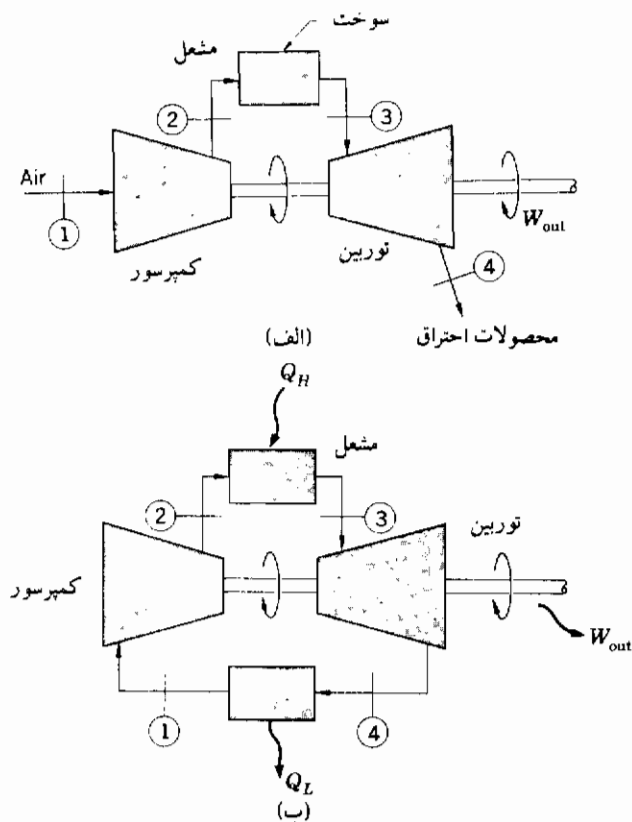
## ۹-۱۲ سیکل‌های توربین‌گازی

چرخه ترمودینامیکی به‌کار رفته در توربین‌های گازی موسوم به سیکل برایتون<sup>۱</sup> است و در شکل ۹-۲۷ نشان داده می‌شود. در سیکل باز، کمپرسور فشار هوا را بالا برده و افزودن حرارت از طریق احتراق سوخت با هوا در فشار بالا صورت می‌پذیرد. محصولات داغ احتراق سپس در توربین منبسط شده تولید کار خروجی می‌نماید. بخشی از کار توربین جهت چرخاندن کمپرسور مصرف می‌شود و باقی‌مانده برای چرخاندن مکانیزم خارجی در دسترس است. سیکل بسته توربین گازی سیال عامل را دوباره به چرخش در می‌آورد در حالی که حرارت در فشار بالا اضافه و در فشار پایین دفع می‌شود. نمودارهای دما - آنتروپی برای سیکل‌های ایده‌آل در شکل ۹-۲۸ نشان داده شده است.

در سیکل استاندارد هوایی برایتون، تحلیل با فرض هوا به‌عنوان سیال عامل در کمپرسور و توربین انجام می‌گیرد. در سیکل حقیقی جریان جرمی در توربین، به‌خاطر جرم اضافه شده سوخت، مقداری از جریان جرمی در کمپرسور بیشتر است. بعلاوه، خواص محصولات احتراق ممکن است با خواص هوا تفاوت داشته باشد. اگرچه اکثر توربین‌های گازی از مقدار قابل ملاحظه‌ای هوای اضافی

استفاده می‌کنند به طوری که تحلیل سیکل استاندارد هوایی تخمین قابل قبولی از عملکرد سیکل حقیقی می‌دهد.

سیکل توربین گازی یک دستگاه جریان دائم است به طوری که کمیات انرژی می‌تواند با اختلافات انتالپی تعیین شود. هر دو فرآیند کار کمپرسور و کار توربین آدیاباتیک فرض می‌شود، به طوری که کار خالص خروجی سیکل برابر کار خروجی توربین منهای کار ورودی به کمپرسور یا  $(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)$  است. این کار محوری است که سیکل می‌تواند به دستگاههای دیگر تحویل دهد. فرض می‌شود که مشعل به صورت یک دستگاه حرارتی فشار ثابت کار کرده، به طوری که مقدار



شکل ۲۷-۹ سیکل اصلی برای توربین‌های گازی

(الف) سیکل باز (ب) سیکل بسته

حرارت خالص ورودی برابر  $h_3 - h_2$  باشد. بر طبق این، بازده حرارتی سیکل استاندارد هوایی را می‌توان از طریق زیر محاسبه کرد.

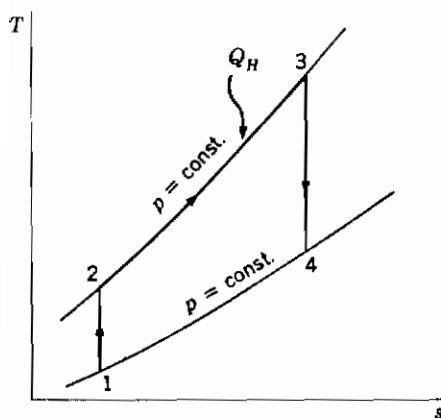
$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2} \quad (9-16)$$

که شرح علامت زیرنویسها مربوط به شکل ۹-۲۷ است. با بیان اختلافات انتالپی بر حسب اختلافات دما و به کار بردن رابطه‌های آنتروپی ثابت،

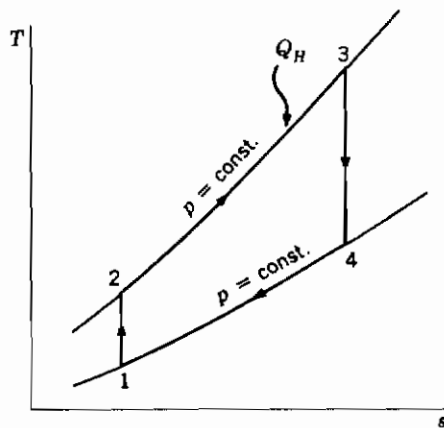
$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} = \frac{p_3}{p_4} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (9-17)$$

بازده به دست می‌آید.

$$\eta = 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(1-\gamma)/\gamma} \quad (9-18)$$



(الف)



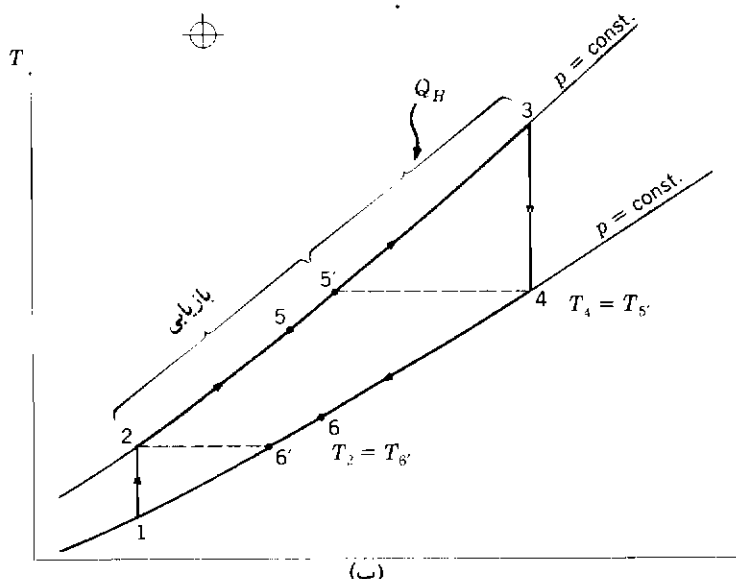
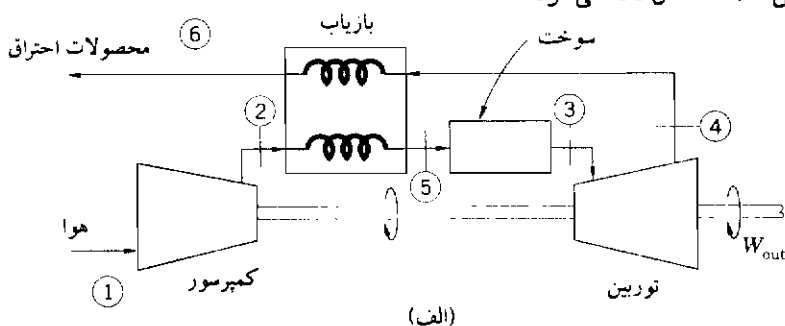
(ب)

شکل ۹-۲۸ نمودارهای دما - آنتروپی برای سیکل‌های پرایتون

(الف) سیکل باز (ب) سیکل بسته

## بازیابی

اکثر توربینهای گازی در سیکل باز کار می‌کنند و گازهای خروجی از توربین به محیط اطراف پراکنده می‌شود. در سیکل ساده فوق، این مُعرفِ افت قابل ملاحظه‌ای در گاز با انرژی بالاست. در یک بازیاب<sup>۱</sup> از این گازهای داغ برای پیش گرم کردن<sup>۲</sup> هوای فشار بالای کمپرسور قبل از ورود به محفظه احتراق استفاده می‌شود، در نتیجه به سوخت کمتری برای سیکل کلی احتیاج است. مکانیزم یک سیکل با بازیاب در شکل ۹-۲۹ نشان داده می‌شود.



شکل ۹-۲۹ سیکل توربین گازی با بازیاب ایده آل (الف) طرحواره‌ای (ب) نمودار T-s

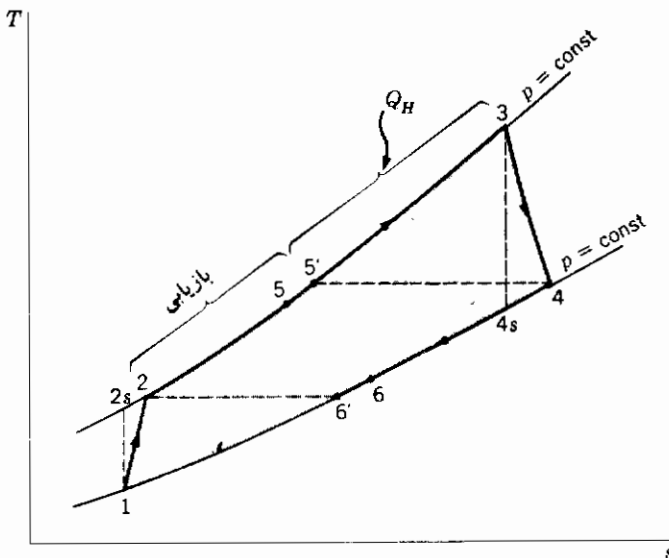
بسادگی مشاهده می‌شود که بالاترین دمایی که در نقطه ۵ می‌توان به آن دست یافت دمای خروجی از توربین  $T_4$  است. یعنی در یک حالت ایده آل هوا باید تا نقطه ۵' (معادل با  $T_4$ ) حرارت داده شود و محصولات احتراق باید تا نقطه ۶' (معادل  $T_2$ ) سرد شوند. بازایب حقیقی چنین تبادل حرارتی ایده آلی را انجام نمی‌دهد و بازده (ضریب سودمندی) بازایب معمولاً به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\eta_{reg} = \frac{\text{انتقال حرارت حقیقی}}{\text{انتقال حرارت ماکزیمم}} = \frac{h_5 - h_2}{h_{5'} - h_2} \quad (۹-۱۹)$$

برای گرماهای ویژه ثابت این رابطه به صورت زیر در می‌آید.

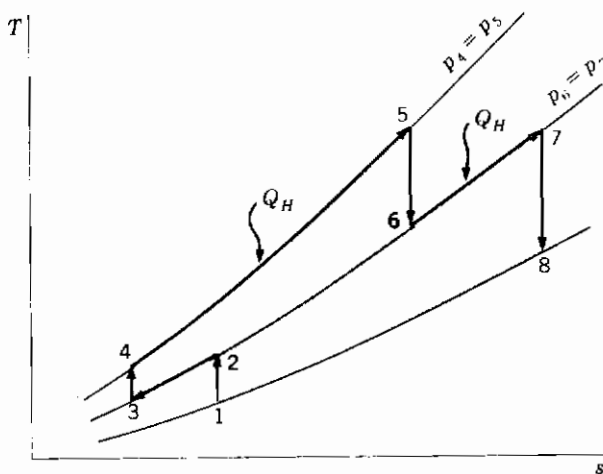
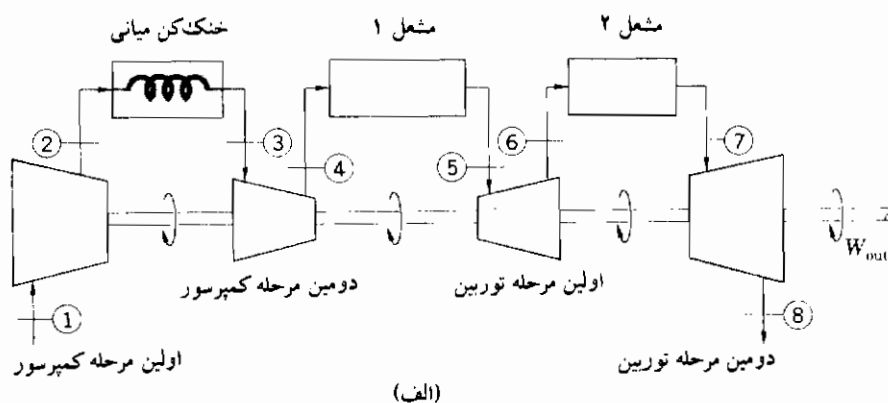
$$\eta_{reg} = \frac{T_5 - T_2}{T_{5'} - T_2} \quad (۹-۲۰)$$

سیکل‌های توربین گازی واقعی با سیکل‌های تئوری تفاوت دارد، بدین ترتیب که باید بازده‌های کمپرسور و توربین در نظر گرفته شود. نمودار  $T-s$  برای یک سیکل حقیقی شبیه آنچه در شکل ۹-۳۰ نشان داده شده می‌باشد.



شکل ۹-۳۰ تأثیر بازده‌های توربین و کمپرسور بر روی نمودار  $T-s$  سیکل توربین گازی با بازایب

می‌توان بازده سیکل توربین گازی را از طریق به کار بردن تراکم چند مرحله‌ای با خنک‌کن میانی مانند توربینهای چند مرحله‌ای با بازگرم بهبود بخشید. طرحواره‌ای از یک سیکل ایده‌آل با دو مرحله تراکم و انبساط در شکل ۹-۳۱ نشان داده شده است. بازده این سیکل از رابطه زیر بیان می‌شود:



شکل ۹-۳۱ سیکل توربین گازی ۲ مرحله‌ای با خنک‌کن میانی و بازگرم

(الف) طرحواره‌ای (ب) نمودار  $T-s$



$$\eta = \frac{\text{کار خالص خروجی}}{\text{حرارت ورودی خالص}}$$

$$= \frac{(h_5 - h_6) + (h_7 - h_8) - (h_4 - h_3) - (h_2 - h_1)}{(h_5 - h_4) + (h_7 - h_6)} \quad (9-21)$$

واضح است که می‌توان یک بازایاب را با مکانیزم خنک‌کن میانی و بازگرم ترکیب کرد.

در این جا بهتر است یادآوری شود که بحث ما به سیکل‌های استاندارد هوایی محدود بوده است و بعضی از رابطه‌های بازده - ایده آل فرض دیگر ثابت بودن گرماهای ویژه را نیز شامل بوده است. مثالها بر اساس این فرضیات است. اولین تصحیح در تحلیل ممکن است با کاربرد جداول هوا برای محاسبه انتالپهای متفاوت انجام شود. هنوز تصحیحات بیشتری را می‌توان با در نظر گرفتن مخلوطهای واقعی سوخت-هوا و محصولات احتراق مربوطه انجام داد. در این حالت ما رابطه‌های فصل ۸ را برای محاسبه دمای شعله و غیره به کار خواهیم برد. البته هنگامی که فرآیندهای واقعی احتراق در نظر گرفته می‌شود دیگر با سیکل‌های استاندارد هوایی سر و کار نداریم، اما فرآیندهای واقعی سیکل گازی خارج از حیطه بحث ماست. علی‌رغم سادگی، تحلیل سیکل استاندارد هوایی تقریب بسیار خوبی از رفتار عملکرد سیکل‌های واقعی به دست می‌دهد.

### مثال ۹-۱۰ بازده سیکل برایتون

سیکل استاندارد هوایی برایتون، هوا را در  $14.7 \text{ psia}$  و  $70^\circ\text{F}$  دریافت می‌کند. حد بالایی فشار و دمای سیکل به ترتیب برابر  $60 \text{ psia}$  و  $1500^\circ\text{F}$  است. بازده کمپرسور ۸۵ درصد و بازده توربین ۹۰ درصد است. بازده حرارتی سیکل را با فرض گرماهای ویژه ثابت محاسبه کنید.

**حل:** نمودار شکل الف ۹-۲۸ را برای این مسأله به کار می‌بریم، با این تفاوت که فرآیندهای واقعی تراکم و انبساط آنتروپی ثابت نیستند. از متن مسأله داریم

$$\begin{aligned} p_1 &= p_4 = 14.7 \text{ psia} & T_1 &= 70^\circ\text{F} = 530^\circ\text{R} \\ p_2 &= p_3 = 60 \text{ psia} & T_3 &= 1500^\circ\text{F} = 1960^\circ\text{R} \end{aligned}$$

برای فرآیندهای آنتروپی ثابت داریم:

$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \\ &= (530) \left( \frac{60}{14.7} \right)^{0.286} = 792^\circ\text{R} \quad (440 \text{ K}) \\ T_4 &= T_3 \left( \frac{P_4}{P_3} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \\ &= (1960) \left( \frac{14.7}{60} \right)^{0.286} = 1310^\circ\text{R} \quad (728 \text{ K}) \end{aligned}$$

با به کار بردن بازده‌های داده شده با گرماهای ویژه ثابت،

$$\eta_{\text{کمپرسور}} = \frac{W_{\text{isen}}}{W_{\text{act}}} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} = 0.85$$

$T_2$  دمای خروجی واقعی از کمپرسور است. با جایگزینی مقادیر عددی متناسب،

$$\frac{792 - 530}{T_2 - 530} = 0.85 \quad T_2 = 838^\circ\text{R}$$

برای توربین

$$\begin{aligned} \eta_{\text{توربین}} &= 0.90 = \frac{W_{\text{act}}}{W_{\text{isen}}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}} \\ 0.90 &= \frac{1960 - T_4}{1960 - 1310} \quad T_4 = 1375^\circ\text{R} \quad (764 \text{ K}) \end{aligned}$$

بازده حرارتی سیکل حالا به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \eta_{\text{حرارتی}} &= \frac{\dot{W}_{\text{act}}}{\dot{Q}_H} \\ &= \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \\ &= \frac{(0.24)(1960 - 1375) - (0.24)(838 - 530)}{(0.24)(1960 - 838)} \\ &= 24.7 \text{ درصد} \end{aligned}$$

## مثال ۹-۱۱

بازیابی با بازده ۸۳ درصد بر روی سیکل توربین گازی مثال ۹-۱۰ نصب می‌شود. بازده حرارتی سیکل را تحت این شرایط محاسبه کنید. محاسبه را با به کار بردن گرماهای ویژه ثابت و همچنین به کار بردن جداول هوا انجام دهید.

**حل:** نمودار شکل ۹-۳۰ را برای این مسأله به کار می‌بریم. از مثال ۹-۱۰ داریم

$$T_1 = 530^\circ\text{R}$$

$$T_2 = 838^\circ\text{R} = T_{6'}$$

$$T_3 = 1960^\circ\text{R}$$

$$T_4 = 1375^\circ\text{R} = T_{5'}$$

حالا از معادله (۹-۲۱) برای بازده بازیابی

$$\eta_{\text{بازتاب}} = \frac{T_5 - T_2}{T_{5'} - T_2}$$

$$0.83 = \frac{T_5 - 838}{1375 - 838}$$

$$T_5 = 1284^\circ\text{R} \quad (713 \text{ K})$$

بازده حرارتی سیکل حالا به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\eta_{\text{حرارتی}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_5}$$

$$= \frac{(0.24)(1960 - 1375) - (0.24)(838 - 530)}{(0.24)(1960 - 1284)} = 41 \text{ درصد}$$

حالا باید محاسبات را با به کار بردن جداول هوا که گرماهای ویژه متغیر را در نظر می‌گیرد

تکرار کنیم. ما هنوز داریم

$$T_1 = 530^\circ\text{R} \quad T_3 = 1960^\circ\text{R}$$

با به کار بردن جداول هوا برای فرآیندهای ایده آل آنتروپی ثابت

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{P_{r2}}{P_{r1}} \quad P_{r1} = 1.3004 \quad 530^\circ\text{R در}$$

$$P_{r2} = \left(\frac{60}{14.7}\right)(1.3004) = 5.308$$

بنابراین  $T_{2s} = 790 / 8^\circ\text{R}$  می باشد. همچنین داریم

$$\frac{p_4}{p_3} = \frac{P_{r4}}{P_{r3}} \quad P_{r3} = 160.37 \quad 1960^\circ\text{R در}$$

$$P_{r4} = \left(\frac{14.7}{60}\right)(160.37) = 39.291$$

و  $T_4 = 1388 / 1^\circ\text{R}$  می باشد. حالا می توانیم انتالیهای مربوطه را از جداول هوا پیدا کنیم (جدول ۱۷-A)

$$h_1 = 126.67 \text{ Btu/lbm} \quad h_2 = 189.57 \text{ Btu/lbm}$$

$$h_3 = 493.64 \text{ Btu/lbm} \quad h_4 = 339.79 \text{ Btu/lbm}$$

چون گرمای ویژه دیگر ثابت نیستند، بازدهای توربین و کمپرسور باید برحسب انتالی بیان شوند. بدین ترتیب،

$$\eta_{\text{کمپرسور}} = 0.85 = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

با حل معادله برای  $h_2$ ، به دست می آوریم

$$h_2 = 200.67 \text{ Btu/lbm}$$

و برای توربین

$$\eta_{\text{توربین}} = 0.90 = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$$

بنابراین

$$h_4 = 355.18 \text{ Btu/lbm}$$

ضریب سودمندی بازیاب همچنین بر حسب انتالپی‌ها نوشته می‌شود

$$\eta_{\text{بازیاب}} = 0.83 = \frac{h_5 - h_2}{h_{5'} - h_2} \quad \text{با } h_{5'} = h_4$$

بدین ترتیب،

$$h_5 = (0.83)(355.18 - 200.67) + 200.67 = 328.31 \text{ Btu/lbm}$$

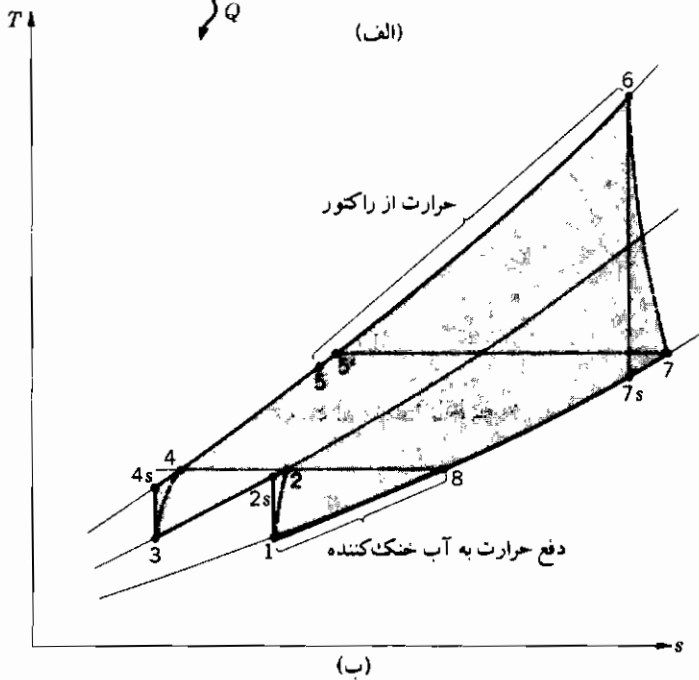
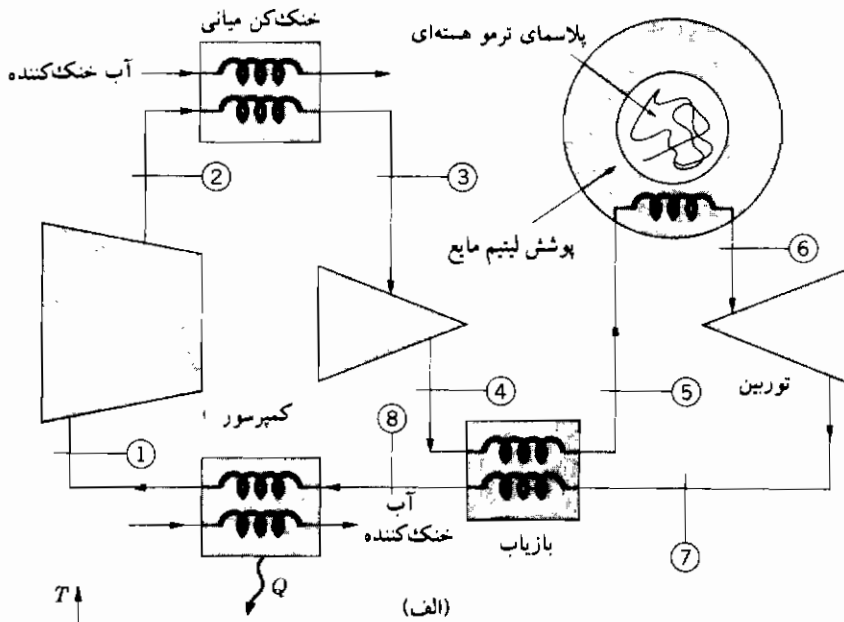
رابطه برای بازده حرارتی مانند پیش است.

$$\begin{aligned} \eta_{\text{حرارتی}} &= \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_5} \\ &= \frac{(493.64 - 355.18) - (200.67 - 126.67)}{493.64 - 328.31} = 39 \text{ درصد} \end{aligned}$$

بنابراین بسته به این که گرماهای ویژه ثابت فرض شود تغییرات ناچیزی در محاسبه وجود دارد. باید توجه داشت که کاربرد بازیاب می‌تواند بازده حرارتی سیکل توربین گازی را تا حد زیادی افزایش دهد.

## مثال ۹-۱۲ توربین گازی با سیکل بسته

تقریباً در تمام کاربردهای رایج سیکل‌های توربین گازی، سیکل باز را با احتراق سوخت هیدروکربنی برای ایجاد منبع حرارتی به کار می‌گیرند. اگر انجام واکنش هسته‌ای انرژی‌زا<sup>۱</sup> (شکست اتمی) امکان‌پذیر باشد، فون جدیدی برای اخذ انرژی از این واکنش و تبدیل آن به کار مفید می‌تواند مورد توجه باشد. گمان می‌رود که واکنش هسته‌ای انرژی‌زا تولید گاز پلاسمای داغی در بیلیون درجه دما خواهد کرد و مکانیزمی پیشنهاد کرده‌اند که انتقال اولیه انرژی را از این واکنش از طریق مایع مبرد لیتیوم مطالبه می‌کند که بعداً می‌تواند برای تأمین گرما در سیکل بسته هلیوم توربین گازی مطابق شکل ۹-۳۲ به کار رود. هلیوم به‌خاطر بالا بودن گرمای ویژه و ماهیت بی‌اثرش و دیگر عوامل طراحی چنین تأسیساتی



شکل ۹-۳۲ سیکل بسته هلیوم توربین گازی برای تولید قدرت با راکتور هسته‌ای انرژی زا

(الف) طرحواره (ب) نمودار T-s

که در مرجع [9] درباره آن بحث شد، انتخاب می‌شود. حد بالایی دما و فشار در سیکل مورد مثال برابر  $1700^{\circ}\text{F}$  و  $500 \text{ psia}$  و حدود پایینی  $100^{\circ}\text{F}$  و  $200 \text{ psia}$  است. خنک‌کن میانی و طبقه‌بندی ایده‌آل در دو مرحله تراکم همراه با بازیابی با بازده  $91\%$  به کار می‌روند. بازده توربین  $93\%$  درصد و بازده کمپرسورها  $88\%$  درصد است. بازده حرارتی سیکل و جریان جرمی هلیوم لازم را به ازای هر مگاوات قدرت خروجی محاسبه کنید. همچنین مقدار جریان آب سردکننده لازم را با فرض  $10^{\circ}\text{F}$  افزایش دمای آب در خنک‌کن میانی و خنک‌کن اصلی محاسبه کنید. گرماهای ویژه را ثابت فرض کنید.

حل: با به کار بردن شرح علائم شکل الف ۹-۳۲ داریم

$$\begin{aligned} T_1 = T_3 = 100^{\circ}\text{F} = 560^{\circ}\text{R} \quad T_6 = 1700^{\circ}\text{F} = 2160^{\circ}\text{R} \\ p_1 = 200 \text{ psia} = p_8 = p_7 \quad p_4 = p_5 = p_6 = 500 \text{ psia} \end{aligned}$$

برای طبقه‌بندی بهینه با  $p_2 = p_3$

$$\begin{aligned} \frac{p_2}{p_1} &= \frac{p_4}{p_3} \\ \frac{p_2}{p_1} &= \left( \frac{500}{200} \right)^{1.2} = 1.581 \end{aligned}$$

برای هلیوم از جدول ۲-۲ چنین به دست می‌آوریم:

$$c_p = 1.25 \text{ Btu/lbm}^{\circ}\text{F} \quad \gamma = 1.66$$

برای طبقه‌گذاری ایده‌آل، دماهای آنتروپی ثابت در تخلیه یکسانند زیرا نسبت‌های فشار و دماهای ورودی یکسانند، بدین ترتیب

$$\begin{aligned} \frac{T_{2s}}{T_1} &= \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} = (1.581)^{0.398} = 1.120 \\ T_{2s} &= (560)(1.12) = 672^{\circ}\text{R} = T_{4s} \quad (373 \text{ K}) \end{aligned}$$

نمودار  $T-s$  این سیکل در شکل ب ۹-۳۲ نشان داده شده است. دماهای تخلیه واقعی با به کار بردن

بازده‌های کمپرسور تعیین می‌شود. برای گرماهای ویژه ثابت،

$$\eta_{comp} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} = 0.88$$

بنابراین

$$T_2 = 687^\circ\text{R} = T_4 \quad (382 \text{ K})$$

برای توربین، دمای خروجی آنتروپی ثابت برابر است با

$$T_{7s} = T_6 \left( \frac{P_7}{P_6} \right)^{(v-1)/\gamma} = (2160) \left( \frac{200}{500} \right)^{0.398} = 1500^\circ\text{R} \quad (833 \text{ K})$$

و با به کار بردن بازده توربین دمای خروجی واقعی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\eta_{turb} = \frac{T_6 - T_7}{T_6 - T_{7s}} = 0.93$$

$$T_7 = 1546^\circ\text{R} \quad (859 \text{ K})$$

برای گرماهای ویژه ثابت، ضریب سودمندی بازیاب برابر است با

$$\eta_{reg} = 0.91 = \frac{T_5 - T_4}{T_{5'} - T_4} \quad T_{5'} = T_{7'}$$

بنابراین

$$0.91 = \frac{T_5 - 687}{1546 - 687} \quad T_5 = 1469^\circ\text{R} \quad (816 \text{ K})$$

بنابراین، بازده حرارتی کلی برابر است با

$$\eta_{th} = \frac{\text{کار ورودی به کمپرسور} - \text{کار خروجی توربین}}{\text{حرارت اضافه شده}} = \frac{\text{کار خالص خروجی}}{\text{حرارت اضافه شده}}$$

$$= \frac{(h_6 - h_7) - (h_2 - h_1) - (h_4 - h_3)}{h_6 - h_5}$$

که برای گرماهای ویژه ثابت به صورت زیر در می‌آید،



$$\eta_{th} = \frac{(1.25)[(2160 - 1546) - (687 - 560) - (687 - 560)]}{(1.25)(2160 - 1469)}$$

$$\eta_{th} = \frac{450 \text{ Btu/lbm}}{863.8 \text{ Btu/lbm}} = 52.1 \text{ درصد}$$

کار خالص خروجی به ازای هر پوند جرم برابر ۴۵۰ Btu است بنابراین جریان جرمی لازم جهت ۱ MW برابر است با

$$\dot{m}_{HE}(450) = 10^6 \text{ W} = 3.413 \times 10^6 \text{ Btu/h}$$

$$\dot{m}_{HE} = 7584 \text{ lbm/h.MW}$$

این جریان جرمی از خنک‌کن میانی و خنک‌کن اصلی عبور می‌کند. حرارت از دست رفته در خنک‌کن میانی برابر است با

$$\begin{aligned} Q_{int} &= \dot{m}_{HE} c_p (T_2 - T_3) \\ &= (7584)(1.25)(672 - 560) = 1.062 \times 10^6 \text{ Btu/h} \quad (311.1 \text{ kW}) \end{aligned}$$

برای محاسبه حرارت دفع شده در سردکن اصلی باید ابتدا  $T_8$ ، دمای هلیوم در ورود به سردکن را تعیین کنیم. از موازنه انرژی در بازتاب و با فرض گرماهای ویژه، داریم

$$T_7 - T_8 = T_5 - T_4$$

بنابراین

$$T_8 = 1546 - 1469 + 687 = 764^\circ\text{R} \quad (424 \text{ K})$$

پس حرارت از دست رفته از طریق هلیوم در خنک‌کن اصلی برابر است با

$$\begin{aligned} Q_{cooler} &= \dot{m}_{HE} c_p (T_8 - T_1) \\ &= (7584)(1.25)(764 - 560) = 1.934 \times 10^6 \text{ Btu/h} \quad (556.6 \text{ kW}) \end{aligned}$$

بنابراین دفع حرارتی کلی برابر است با

$$Q_{tot} = (1.062 + 1.9341) \times 10^6 = 2.996 \times 10^6 \text{ Btu/h} \quad (877.8 \text{ kW})$$

که باید به وسیله آب خنک کننده اخذ شود. با به یاد آوردن این که  $c_p \approx 1 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{F}$  برای آب مایع، داریم

$$Q_{tot} = \dot{m}_w c_w \Delta T_w = m_w(1.0)(10) = 2.996 \times 10^6 \text{ Btu/h}$$

$$\dot{m}_w = 2.996 \times 10^5 \text{ lbm/h.MW} \quad (1.359 \times 10^5 \text{ kg/h.MW})$$

و

این جریانی در حدود  $600 \text{ gal/min}$  برای هر MW قدرت خروجی است. برای این دماها یک نیروگاه با اندازه متوسط MW ۵۰۰ به  $300,000 \text{ gal/min}$  جریان آب خنک کننده احتیاج دارد. حتی با بازده خیلی مطلوب (۵۲ درصد)، این مثال نشان می دهد که نیروگاههای بزرگ بار خنک کننده خیلی زیادی بر محیط زیست می گذارند. در خیلی از موارد این بار از طریق تبخیر در برج خنک کننده در جو پراکنده می شود. در دمای هوای معمولی، انتالپی تبخیر  $1000 \text{ Btu/lbm}$  است، بنابراین نیروگاه MW ۵۰۰ احتیاج به تبخیری در این حدود دارد:

$$\frac{(2.996 \times 10^6 \text{ Btu/h.MW})(500 \text{ MW})}{1000 \text{ Btu/lbm}} = 1.498 \times 10^6 \text{ lbm/h} \\ (6.8 \times 10^5 \text{ liters/h})$$

این شدت تبخیری در حدود  $3000 \text{ gal/min}$  است که مقدار نسبتاً زیادی از آن آب است. در هوای بینهایت آرام چنین شدتهای تبخیری می تواند باعث مه زمینی در محیط اطراف نیروگاه بشود. از بحثها و مثالهایمان در می یابیم که سیکلهای توربین گازی، مزیت بازده بالا را در هنگامی که بازیاب به کار می رود عرضه می کنند. در خیلی از موارد، این سیکلها از نظر سرمایه گذاری ثابت اولیه برای تولید قدرت در حدود ۲۵ تا ۱۰۰ MW، از تجهیزات رقیب با صرفه ترند. از آنجا که این سیکلها با هوای اضافی زیادی کار می کنند، لذا نسبت به دیگر سیکلهای احتراق داخلی هوای آلاینده کمتری به صورت هیدروکربنهای نیم سوخته تولید می نمایند و فرآیندهای جریان بادمای بالا در توربین به کاهش انتشار ترکیبات  $\text{NO}_x$  کمک می کند.

البته بازده بالای سیکلهای توربین گازی از بالا بودن دمای بالایی که می توان در فرآیندهای

احتراق و توربین به کار برد منتج می‌شود. همچنان که مواد مقاوم در دماهای بالا برای پره‌های توربین تکامل می‌یابند، می‌توان انتظار داشت که بازده بیشتر افزایش یابد. بیشتر پیشرفت‌ها در تهیه مواد مقاوم در دماهای بالا در اثر تحقیق دربارهٔ طرح‌های پیشرفته موتور توربوجت هواپیما به دست خواهد آمد.

### ۹-۱۳ تحلیل قانون دوم سیکل‌های قدرت

در فصل پنجم درباره مفاهیم قابلیت کاردهی و برگشت‌ناپذیری که برای مسائل جریان دائم به کار گرفته شد بحث کردیم. سپس این مفاهیم را برای کاربرد فرآیندهای احتراق در فصل ۸ دوباره ارزیابی نمودیم. حالا چگونگی کاربرد آنها را مخصوصاً در سیکل‌های قدرت در این فصل در نظر می‌گیریم.

همان‌طور که چند بار اشاره شده است فرآیندهای واقعی برگشت‌ناپذیرند، در نتیجه ما نمی‌توانیم پمپها، کمپرسورها و توربینهای بدون اصطکاک داشته باشیم و دستگاههای مبدل حرارتی همیشه شامل انتقال حرارت بر اساس یک اختلاف دمای معین و در نتیجه برگشت‌ناپذیری خواهند بود. نهایتاً ما هدف ترمودینامیکی خود را انتخاب تولید کمترین برگشت‌ناپذیری در یک سیکل قدرت قرار می‌دهیم. به طور کلی می‌توان گفت که انتظار داریم این هدف همچنین با شرط کمترین هزینه مصرف سوخت و انرژی همراه باشد. برای مثال یک سیکل قدرت بخار با گرمکنهای آب تغذیه دارای برگشت‌ناپذیری کلی کمتری از سیکل قدرت بخار بدون گرمکن آب تغذیه می‌باشد. یک سیکل توربین‌گازی با بازیاب دارای برگشت‌ناپذیری کمتری از سیکل بدون بازیاب می‌باشد. اگرچه این حقایق چیزی در مورد صرفه‌جوییهای هزینه نمی‌گویند. مزیت تحلیل قانون دوم سیکل‌های قدرت در این است که می‌تواند راههای ممکن را که منجر به صرفه‌جویی در سوخت یا هزینه‌های دستگاه می‌شود مطرح نماید.

تحلیل قانون دوم یک سیکل قدرت معمولاً باید به وسیلهٔ یک سلسله عملیات زیر صورت

گیرد:

۱ - قابلیت کاردهی  $b = h - T_0 s$  برای هر نقطه سیکل محاسبه شود.

۲ - ماکزیمم کارخروجی برای هر جزء به صورت کاهش قابلیت کاردهی آن جزء محاسبه شود.

۳ - کار واقعی خروجی با مقدار خروجی حداکثر مقایسه شود و برگشت‌ناپذیری هر جزء از

معادله (۵-۴۹) محاسبه شود.

$$\dot{I} = \dot{W}_{\text{خروجی واقعی}} - \dot{W}_{\text{خروجی حداکثر}}$$

۴ - برگشت ناپذیری سیکل کلی به وسیله جمع برگشت ناپذیریهای تمام اجزا محاسبه شود.

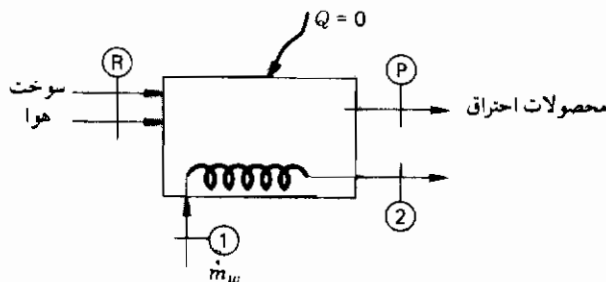
۵ - می توان بین سیکلهای مختلف، شرایط کارکردی مختلف در یک سیکل و تغییر عملکرد هر جزء در سیکل، مقایسه هایی انجام داد.

### مثال ۱۳-۹ برگشت ناپذیری در یک دیگ بخار

سیستم احتراق در مثال ۱۰-۸ برای گرم کردن آب از ۵۰۰ psia، ۲۰۰°F (مایع) تا شرایط داغ ۵۰۰ psia و ۱۰۰۰°F به کار می رود. برگشت ناپذیری کلی برای این فرآیند چقدر است؟ (توجه کنید: دمای بالای بخار آب در خروج امکان پذیر است زیرا دمای احتراق می تواند در داخل دیگ بخار کاملاً بالا باشد.)

**حل:** انرژی کلی آزاد شده به ازای هر پوند سوخت برابر ۲۰۲۸۵ Btu محاسبه شد. بر طبق طرحواره این انرژی باید برای افزایش انتالپی آب به کار رود. بنابراین

$$q = 20285 \text{ Btu} = \dot{m}_w(h_2 - h_f) \quad (a)$$



شکل مثال ۱۳-۹

از جداول بخار آب

$$h_1 = 167.65 \text{ Btu/lbm (مایع متراکم شده)}$$

$$s_1 = 0.29341 \text{ Btu/lbm}^\circ\text{R}$$

$$h_2 = 1521.7 \text{ Btu/lbm}$$

$$s_2 = 1.7471 \text{ Btu/lbm}^\circ\text{R}$$

بنابراین

$$\dot{m}_w = 14.99 \text{ lbm/lbm سوخت}$$

کاهش قابلیت کاردهی آب (بخار آب) برابر است با

$$\begin{aligned} B_1 - B_2 &= m_w[(h_1 - T_0 s_1) - h_2(T_0 s_2)] \\ &= 14.99[(167.65 - 1520.7) - (537)(0.29241 - 1.7471)] \quad (b) \\ &= -8573 \text{ Btu/lbm سوخت} \quad (-19940 \text{ kJ/kg سوخت}) \end{aligned}$$

از مثال ۸-۱۰، کاهش قابلیت کاردهی فرآیند احتراق برابر سوخت  $21516 \text{ Btu/lbm}$  است، بنابراین کاهش کلی در دیگ بخار برابر است با

$$\begin{aligned} B_R - B_P + B_1 - B_2 &= 21516 - 8573 \\ &= 12943 \text{ Btu/lbm سوخت} = 30105 \text{ kJ/kg سوخت} \end{aligned}$$

این معادل برگشت‌ناپذیری است زیرا کار واقعی صورت نگرفته است.

$$\dot{I} = 12943 \text{ Btu/lbm سوخت} = 30105 \text{ kJ/kg سوخت}$$

#### مثال ۹-۱۴ تحلیل قابلیت کاردهی یک سیکل توربین گازی

سیکل مثال ۹-۱۱ را از نظر قابلیت کاردهی و برگشت‌ناپذیری بررسی می‌کنیم. تنها با

گرماهای مخصوص ثابت و  $T_0 = 70^\circ\text{F}$  دو مورد زیر را تحلیل می‌کنیم:

(الف) با به کار بردن بازده‌های توربین، کمپرسور و بازیاب مثال ۹-۱۱

(ب) با فرض بازده‌های ۱۰۰ درصد برای اجزای سیکل

**حل:** قابلیت کاردهی برای جریان دائم طبق تعریف فصل ۵ عبارت است از:

$$b = h - T_0 s \quad (a)$$

و برگشت ناپذیری برای فرآیند به ازای واحد جرم برابر است با

$$\dot{I} = \dot{W} - \dot{W}_{\text{خارجی وافی}} - \dot{W}_{\text{خارجی حداکثر}} \quad (b)$$

$$= -\Delta b - \dot{W}_{act}$$

$$= -\Delta h + T_0 \Delta s - \dot{W}_{act} \quad (c)$$

برای گازهای ایده آل تغییر آنتروپی را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد

$$\Delta s = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (d)$$

(الف) برای این حالت، مطابق مثال ۹-۱۱ می‌توانیم با چرخش به دور سیکل کمیات لازم را

محاسبه کنیم.

کمپرسور: برای کمپرسور

$$\begin{aligned} h_2 - h_1 &= c_p(T_2 - T_1) = (0.24)(838 - 530) \\ &= 73.92 \text{ Btu/lbm} \quad (165.3 \text{ kJ/kg}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= 0.24 \ln\left(\frac{838}{530}\right) - \frac{53.35}{778} \ln\left(\frac{60}{14.7}\right) \\ &= 0.0135 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R} \quad (0.0565 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

$$b_2 - b_1 = 73.92 - (530)(0.0135) = 66.76 \text{ Btu/lbm} \quad (155.3 \text{ kJ/kg})$$

این مقدار منفی حداکثر کار خروجی است.

کار واقعی خروجی برابر با منهای تغییر انتالپی است یا

$$\dot{W}_{\text{خروجی واقعی}} = -(h_2 - h_1) = -73.92 \text{ Btu/lbm}$$

به طوری که برگشت ناپذیری برابر است با:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1,2} &= -\Delta b_{1,2} - \dot{W}_{\text{دراستی}} \\ &= -66.76 - (73.92) = 7.16 \text{ Btu/lbm} \quad (16.65 \text{ kJ/kg}) \end{aligned}$$

بازیاب: همان طور که هوا در بازیاب حرارت می‌یابد، مقدار کار واقعی برای فرآیند فشار ثابت

صفر است. بنابراین محاسبه می‌کنیم

$$h_5 - h_2 = (0.24)(1284 - 838) = 107.04 \text{ Btu/lbm} \quad (248.98 \text{ kJ/kg})$$

$$s_2 - s_1 = 0.24 \ln\left(\frac{1284}{838}\right) - \frac{53.35}{778} \ln\left(\frac{60}{60}\right) = 0.1024 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$$

$$h_5 - h_2 = 107.04 - (530)(0.1024) = 52.76 \text{ Btu/lbm} \quad (122.7 \text{ kJ/kg})$$

در طرف دیگر بازیاب گازهای خروجی داغ از نقطه ۴ تا نقطه ۶ سرد می‌شوند. دما در نقطه ۶ از موازنه انرژی در بازیاب به دست می‌آید.

$$h_5 - h_2 = h_4 - h_6$$

به طوری که

$$T_6 = T_4 - T_5 + T_2 = 1375 - 1284 + 838 = 929^\circ\text{R}$$

یا افزایش دمای هوا از کمپرسور مساوی کاهش دمای گازهای خروجی داغ می‌باشد. حالا می‌توانیم خواص مورد نظر را محاسبه کنیم:

$$h_6 - h_4 = (0.24)(929 - 1375) = -107.04 \text{ Btu/lbm}$$

$$s_6 - s_4 = 0.24 \ln\left(\frac{929}{1375}\right) - \frac{53.35}{778} \ln\left(\frac{14.7}{14.7}\right) = -0.0941 \text{ Btu/lbm.}^\circ\text{R}$$

$$b_6 - b_4 = -107.04 - (530)(-0.0941) = -57.16 \text{ Btu/lbm}$$

حالا برگشت ناپذیری کلی برای بازیاب برابر است با منهای افزایش در قابلیت کاردهی منهای کار واقعی خروجی (که برابر صفر است) یا

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\text{بازیاب}} &= -(b_5 - b_2) - (b_6 - b_4) - \dot{W}_{\text{واقعی}} \\ &= -(52.76) - (-57.16) - 0 = 4.40 \text{ Btu/lbm} \quad (10.23 \text{ kJ/kg}) \end{aligned}$$

مشعل: در مشعل هوا از نقطه ۵ تا نقطه ۳ (برای یک سیکل استاندارد هوایی) حرارت می یابد. از نقطه نظر عملی این کار با سوزاندن سوخت صورت می گیرد و مقداری برگشت ناپذیری همان طور که در فصل ۸ تشریح شد، حاصل می شود. در این مسأله اطلاعات کافی برای تعیین برگشت ناپذیری فرآیند احتراق نداریم بنابراین تنها تغییر در قابلیت کاردهی هوا را محاسبه می کنیم:

$$h_3 - h_5 = (0.24)(1960 - 1284) = 162.24 \text{ Btu/lbm}$$

$$s_3 - s_5 = 0.24 \ln\left(\frac{1960}{1284}\right) - \frac{53.35}{778} \ln\left(\frac{60}{60}\right) = +0.1015 \text{ Btu/lbm.}^\circ\text{R}$$

$$b_3 - b_5 = -162.24 - (530)(+0.1015) = 108.44 \text{ Btu/lbm} \quad (252.23 \text{ kJ/kg})$$

توربین: محاسبات برای توربین به صورت زیر است:

$$h_4 - h_3 = (0.24)(1375 - 1960) = -140.4 \text{ Btu/lbm}$$

$$\begin{aligned} s_4 - s_3 &= 0.24 \ln\left(\frac{1375}{1960}\right) - \frac{53.35}{778} \ln\left(\frac{14.7}{60}\right) \\ &= +0.01137 \text{ Btu/lbm.}^\circ\text{R} \quad (0.0476 \text{ kJ/kg.K}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_4 - b_3 &= -140.4 - (530)(0.01137) \\ &= -146.43 \text{ Btu/lbm} \quad (-340.6 \text{ kJ/kg}) \end{aligned}$$



کار واقعی خروجی برابر است با  $h_3 - h_4 = 140 / 4 \text{ Btu/lbm}$ ، به طوری که برگشت ناپذیری برابر است با

$$\begin{aligned}\dot{I}_{3,4} &= -\Delta b_{3,4} - W_{act\ 3,4} \\ &= -(-146.43) - 140.4 \\ &= +6.03 \text{ Btu/lbm} \quad (14.03 \text{ kJ/kg})\end{aligned}$$

کمیات مختلفی در جدول زیر نشان داده شده است تا رفتار کلی سیکل را به نمایش بگذارد. همان طور که در بالا ذکر شد، فرآیند احتراق در مشعل در این تحلیل در نظر گرفته نشده است. برای تخمین اثر احتراق نتایج مثال ۱۰-۸ را بررسی می‌کنیم. در این مثال دماها و فشارهای ورودی و خروجی تقریباً همان مقداری است که در این جا آمده است. با خلاصه کردن آن مثال

قابلیت کاردهی برای سیکل واقعی توربین گازی

جزء	فرآیند (ها)	$\Delta h$ Btu/lbm	$\Delta b$ Btu/lbm	$\dot{W}_{max}$ Btu/lbm	$\dot{W}_{act}$ Btu/lbm	$\dot{I}$ Btu/lbm
کمپرسور	۱-۲	۷۳ / ۹۲	۶۶ / ۷۶	-۶۶ / ۷۶	-۷۳ / ۹۲	۷ / ۱۶
بازیاب	۲-۵	۱۰۷ / ۰۴	۵۲ / ۷۶			
	۴-۶	-۱۰۷ / ۰۴	-۵۷ / ۱۶			
کل		۰	-۴ / ۴۰	۴ / ۴۰	۰	۴ / ۴۰
مشعل	۵-۳	۱۶۲ / ۲۴	۱۰۸ / ۴۴	-	۰	-
توربین	۳-۴	-۱۴۰ / ۴	-۱۴۶ / ۴۳	۱۴۶ / ۴۳	۱۴۰ / ۴	۶ / ۰۳
سیکل کلی بجز فرآیند احتراق		۹۵ / ۷۶	۲۴ / ۳۷	۸۴ / ۰۷	۶۶ / ۴۸	۱۷ / ۵۹

سوخت اکتان در فشار ۴ atm و  $25^\circ\text{C}$  ( $58/8 \text{ psia}$ ،  $77^\circ\text{F}$ )

هوا در فشار ۴ atm و  $710 \text{ K}$  ( $58/8 \text{ psia}$ ،  $1278^\circ\text{R}$ )

محصولات در فشار ۴ atm و  $1100 \text{ K}$  ( $58/8 \text{ psia}$ ،  $1980^\circ\text{R}$ ) خارج می‌شود

برگشت ناپذیری واکنش احتراق = واکنش کننده‌ها  $226/31 \text{ kJ/kg}$

= واکنش کننده‌ها  $97/29 \text{ Btu/lbm}$

این نتیجه خیلی نزدیک به تغییر قابلیت کاردهی محاسبه شده در مثال حاضر می باشد. البته نسبت هوا به سوخت در مثال ۹M-۸ خیلی بالاست (۷۴/۹۴) به طوری که واکنش می تواند با تقریب خیلی نزدیکی به وسیله محاسبه بر اساس تنها هوا معرفی گردد.

(ب) در سیکل ایده آل با فرض بازده های صد درصد برای اجزا متوجه تغییر قابل ملاحظه ای در عملکرد می شویم. توربین و کمپرسور هر دو دارای برگشت ناپذیری صفرند (زیرا فرآیند برگشت پذیر است) و کار خروجی واقعی مساوی حداکثر مقدار ممکن خواهد بود. با استفاده از لیست علائم شکل ۹-۲۹، دمای بازیاب برای ۱۰۰٪ بازیاب  $\eta$  برابر است با:

$$T_4 = T_5 = 1310^\circ\text{R} \quad \text{و} \quad T_6 = T_2 = 792^\circ\text{R}$$

پس محاسبات زیر را داریم:

$$\begin{aligned} h_2 - h_1 &= b_2 - b_1 = -\dot{W}_{\max} = \dot{W}_{\text{act}} \quad (s_1 = s_2 \text{ زیرا}) \\ &= (0.24)(792 - 530) = 62.88 \text{ Btu/lbm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_4 - h_3 &= b_4 - b_3 = -\dot{W}_{\text{حداکثر}} = \dot{W}_{\text{واقعی}} \quad (s_3 = s_4) \\ &= (0.24)(1310 - 1960) = -156 \text{ Btu/lbm} \end{aligned}$$

برای بازیاب

$$h_5 - h_2 = (0.24)(1310 - 792) = 124.32 \text{ Btu/lbm}$$

$$\begin{aligned} s_5 - s_2 &= 0.24 \ln\left(\frac{1310}{792}\right) - \frac{53.35}{778} \ln\left(\frac{60}{60}\right) \\ &= 0.1208 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R} \quad (0.5058 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

$$b_5 - b_2 = 60.31 \text{ Btu/lbm} \quad (140.3 \text{ kJ/kg})$$

$$h_6 - h_4 = (0.24)(792 - 1310) = -124.32 \text{ Btu/lbm}$$

$$s_6 - s_4 = 0.24 \ln\left(\frac{792}{1310}\right) - \frac{53.35}{778} \ln\left(\frac{14.7}{14.7}\right) = -0.1208 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$$

$$b_6 - b_4 = -60.31 \text{ Btu/lbm}$$

به‌طوری که  $\Delta b = 0$  کلی همراه با  $\dot{W}_{\text{واقعی}} = 0$

$$\dot{I}_{\text{reg}} = \dot{W}_{\text{max}} - \dot{W}_{\text{act}} = 0$$

در مشعل داریم

$$h_3 - h_5 = (0.24)(1960 - 1310) = 156 \text{ Btu/lbm}$$

$$s_3 - s_5 = 0.24 \ln\left(\frac{1960}{1310}\right) - \frac{53.35}{778} \ln\left(\frac{60}{60}\right)$$

$$= 0.0967 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R} \quad (0.4049 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})$$

$$b_3 - b_5 = 104.75 \text{ Btu/lbm} \quad (243.6 \text{ kJ/kg})$$

حالا می‌توانیم خواص سیکل ایده‌آل را در جدول زیر ارائه نماییم:

قابلیت کاردهی در سیکل ایده‌آل توربین گازی

جزء	فرآیند (ها)	$\Delta h$ Btu/lbm	$\Delta b$ Btu/lbm	حداکثر $\dot{W}$ Btu/lbm	$\dot{W}_{\text{واقعی}}$ Btu/lbm	$\dot{I}$ Btu/lbm
کمپرسور	۱-۲	۶۲ / ۸۸	۶۲ / ۸۸	-۶۲ / ۸۸	-۶۲ / ۸۸	۰
بازیاب	۲-۵	۱۲۴ / ۳۲	-۶۰ / ۳۱			
	۴-۶	-۱۲۴ / ۳۲	-۶۰ / ۳۱			
	کل	۰	۰	۰	۰	۰
مشعل	۵-۳	۱۵۶	۱۰۴ / ۷۵			-
توربین	۳-۴	-۱۵۶	-۱۵۶	۱۵۶	۱۵۶	۰
سیکل کلی بجز						
فرآیند احتراق		۶۲ / ۸۸	۱۱ / ۶۳	۹۳ / ۱۲	۹۳ / ۱۲	۰

بازده حرارتی این سیکل ایده آل برابر است با

$$\eta = \frac{\dot{W}_{\text{نافع}}}{\dot{Q}_{\text{منبع}}} = \frac{93.12}{156} = 59.7 \text{ درصد}$$

#### ۹-۱۴ سیکل‌های پیوندی<sup>۱</sup> (Hybrid)

بسته به کاربرد، ممکن است ترکیب توربین گازی و سیکل قدرت بخار در یک آرایش پیوندی به شکل ۹-۳۳ دارای مزایایی باشد. به جای استفاده از یک بازیاب، گازهای خروجی داغ در تهیه حرارت دیگ بخار برای راندن سیکل بخار مورد استفاده قرار گیرد. اگر گازهای خروجی تنها منبع انرژی دیگ بخار باشند، موازنه انرژی دیگ بخار به صورت زیر خواهد بود

$$\dot{m}_a(h_4 - h_5) = \dot{m}_s(h_6 - h_9) \quad (9-22)$$

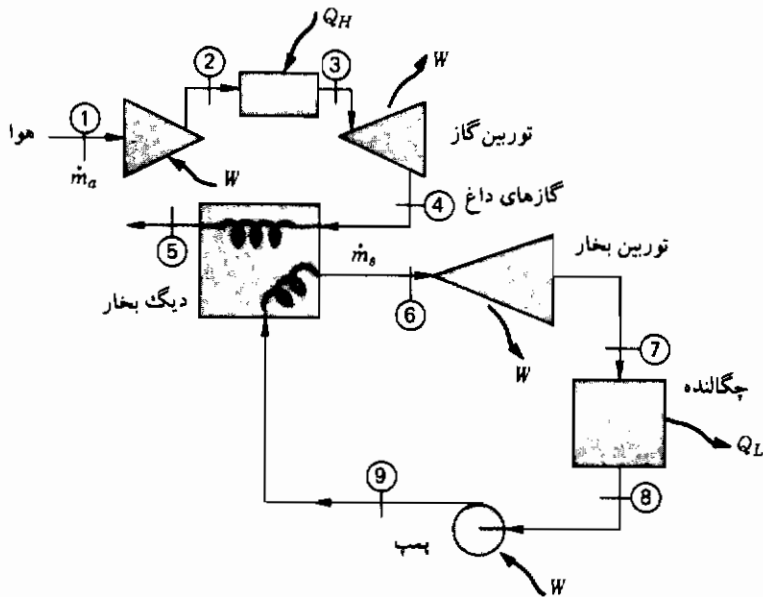
اگر  $\dot{Q}$  مقدار حرارت اضافه شده به دیگ بخار باشد باید مقدار آن به طرف چپ معادله اضافه شود. مزیت سیکل پیوندی یا مرکب این است که از افزودن حرارت در دمای بالا برای توربین گازی، مشابه دفع حرارت در دمای پایین برای سیکل بخار استفاده می‌گردد. از این مزیت که محصولات احتراق از توربین گازی "تمیز ترند" نیز استفاده می‌کنیم، این به خاطر استفاده از نرخ زیاد هوای اضافی می‌باشد. برای سیکل شکل ۹-۳۳ کار خروجی کلی سیکل برابر است با

$$\begin{aligned} W_{\text{پمپ}} - W_{\text{توربین بخار}} + W_{\text{کمپرسور هوایی}} - W_{\text{توربین گازی}} &= W_{\text{کل}} \\ &= \dot{m}_a[(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)] + \dot{m}_s[(h_6 - h_7) - (h_9 - h_8)] \quad (9-23) \end{aligned}$$

رابطه بین  $\dot{m}_s$  و  $\dot{m}_a$  از موازنه انرژی دیگ بخار معادله (۹-۲۲) به دست می‌آید. برای زمانی که حرارت اضافی به دیگ بخار افزوده نمی‌شود، تنها حرارت اضافه شده به سیکل مرکب از منابع خارجی، در مشعل از نقطه ۲ تا نقطه ۳ صورت می‌گیرد. بنابراین:

۱- در منابع مختلف از اصطلاحات سیکل‌های مرکب (Combined cycles) و سیکل‌های دو مولد

(Cogeneration cycles) بطور مترادف با سیکل‌های پیوندی استفاده شده است. (مترجم)



شکل ۹-۳۳ طرحواره سیکل پیوندی برای سیکل توربین گازی - قدرت بخار

$$Q_H = \dot{m}_a(h_3 - h_2) \quad (9-24)$$

و بازده حرارتی نسبت معادله (۹-۲۳) به معادله (۹-۲۴) می‌باشد.

حرارت دفع شده در چگالنده از نقطه ۷ تا نقطه ۸ و با گازها در نقطه ۵ صورت می‌گیرد، به‌طوری‌که حرارت دفع شده کلی می‌تواند به‌صورت زیر محاسبه شود:

$$Q_L = \dot{m}_s(h_7 - h_8) + \dot{m}_a h_5 \quad (9-25)$$

از نقطه نظر موازنه انرژی کلی، کل کار خروجی می‌تواند به‌صورت زیر محاسبه شود.

$$W = Q_H - Q_L \quad (9-26)$$

البته، یک سیکل پیوندی می‌تواند شامل بازیاب برای قسمت سیکل بخار و تراکم چند مرحله‌ای با خنک‌کن میانی برای قسمت سیکل گازی باشد.

### ۹-۱۵ توربین گازی محرک جت<sup>۱</sup>

موتور توربوجت که به طور وسیع برای به حرکت درآوردن هواپیما به کار می رود، ساده شده سیکل باز توربین گازی می باشد و به صورت طرحواره در شکل ۹-۳۴ نشان داده شده است. گازهای داغ حاصل از احتراق در توربین تنها به اندازه تولید کار لازم برای چرخاندن کمپرسور منبسط می شوند. سپس انرژی باقی مانده با انبساط در شیبوره<sup>۲</sup> پایین دست جریان توربین به انرژی جنبشی با سرعت بالا تبدیل می گردد. نیروی پیش برنده<sup>۲</sup> جت در نتیجه اختلاف ممتنم جریان هوای ورودی به کمپرسور و گازهای خروجی با سرعت بالا حاصل می شود. این نیروی پیش برنده از رابطه زیر به دست می آید.

$$F = \frac{\dot{m}}{g_c} (V_I - V_S) \quad (9-27)$$

$\dot{m}$  نرخ جریان جرمی در سیکل استاندارد هوایی و  $V_I$  و  $V_S$  سرعتهای جریان در رابطه با نقاط شکل ۹-۳۴ است. درباره اصول سیستمهای جریان تراکم پذیر با سرعتهای بالا و اصول طراحی که باید در تعیین شکل شیبوره و هندسه خروجی جریان در نظر گرفت، در فصل ۱۰ بحث خواهیم کرد. فعلاً تنها ارائه مثالی که اصول ترمودینامیکی درگیر در سیکل توربوجت را نشان می دهد کفایت می کند.

### مثال ۹-۱۵ موتور توربوجت

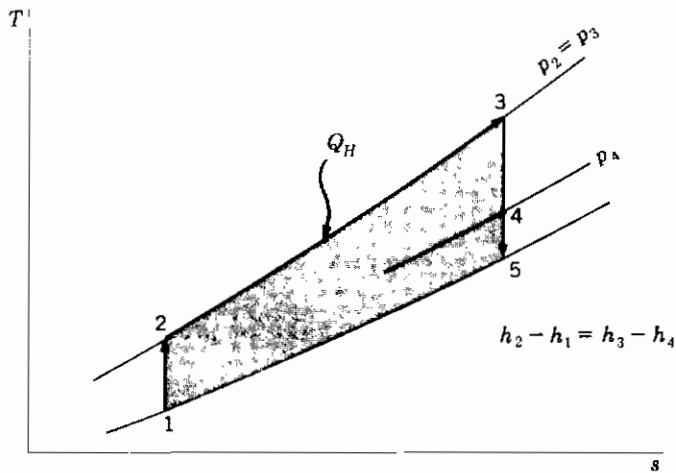
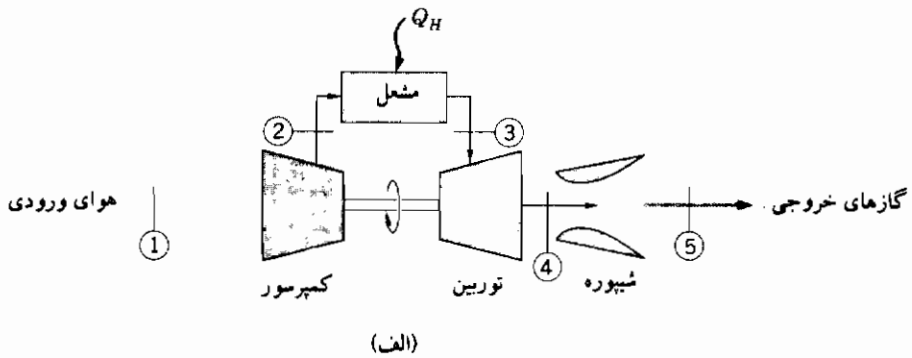
موتور توربوجتی بین حدود فشار ۵ و ۵۰ psia کار می کند. دمای هوای ورودی به کمپرسور ۴۰°F - و دمای بالایی موتور ۲۰۰۰°F می باشد. نیروی پیش برنده را برای ۱ lbm/s جریان هوا با فرض تراکم و انبساط آنتروپی ثابت و سرعت ورودی ۳۰۰ ft/s محاسبه کنید. گرماهای ویژه را ثابت فرض کنید. همچنین حرارت ورودی به ازای پوند جرم هوا را محاسبه کنید.

**حل:** طرحواره شکل ۹-۳۴، برای حل این مسأله به کار می رود، داریم

$$T_I = -40^\circ\text{F} = 420^\circ\text{R} \quad (233 \text{ K})$$

1- Jet propulsion

2- Thrust



شکل ۹-۳۴ سیکل توربین گازی برای نیروی پیش برنده جت

(الف) طرحواره‌ای (ب) نمودار  $T-s$

$$T_3 = 2000^\circ\text{F} = 2460^\circ\text{R} \quad (1367 \text{ K})$$

$$V_1 = 300 \text{ ft/s} \quad (91.44 \text{ m/s})$$

$$p_1 = p_5 = 5 \text{ psia} \quad (34.5 \text{ kPa})$$

$$p_2 = p_3 = 50 \text{ psia} \quad (345 \text{ kPa})$$

برای فرآیند تراکمی آنتروپی ثابت داریم،

$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} = (420) \left( \frac{50}{5} \right)^{0.286} \\ &= 812^\circ\text{R} \quad (451 \text{ K}) \end{aligned}$$

از آنجا که کارهای کمپرسور و توربین مساوی هستند،

$$h_2 - h_1 = h_3 - h_4$$

یا برای گرماهای ویژه ثابت داریم

$$T_2 - T_1 = T_3 - T_4$$

بدین ترتیب

$$T_4 = 2460 - 812 + 420 = 2068^\circ\text{R} \quad (1149 \text{ K})$$

برای فرآیند آنتروپی ثابت در شیوره خروجی توربین داریم

$$\begin{aligned} T_5 &= T_3 \left( \frac{P_5}{P_3} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} = (2460) \left( \frac{5}{50} \right)^{0.286} \\ &= 1272^\circ\text{R} \quad (707 \text{ K}) \end{aligned}$$

برای شیوره

$$h_4 + \frac{V_4^2}{2g_c} = h_5 + \frac{V_5^2}{2g_c}$$

فرض خواهیم کرد که  $V_4$  خیلی کوچک باشد، بنابراین

$$\begin{aligned} V_5 &= [2g_c(h_4 - h_5)]^{1/2} = [2g_c c_p (T_4 - T_5)]^{1/2} \\ &= [(2)(32.2)(0.24)(2068 - 1272)(778)]^{1/2} \\ &= 3093 \text{ ft/s} \quad (943 \text{ m/s}) \end{aligned}$$



حالا نیروی پیش‌برنده به صورت زیر از معادله ۲۷ - ۹ محاسبه می‌شود.

$$F = T = m(V_1 - V_5) = \frac{(1)(300 - 3093)}{32.2}$$

$$T = -96.8 \text{ lbf}$$

علامت منفی مشخص می‌کند که نیروی پیش‌برنده در جهت مخالف سرعت می‌باشد.

حرارت اضافه شده به‌ازای هر پوند جرم برابر است با

$$Q_H = \dot{m}(h_3 - h_2) = (1)(0.24)(2460 - 812) = 395 \text{ Btu/s}$$

اگر فرض کنیم که توربوجت با سرعتی معادل سرعت ورودی حرکت کند، قدرت ایجاد شده به وسیله نیروی پیش‌برنده برابر است با

$$P = TV_1 = (86.8)(300) = 26000 \text{ ft.lbf/s}$$

یا

$$P = 33.46 \text{ Btu/s} = 47.3 \text{ hp} \quad (35.3 \text{ kW})$$

این محاسبات برای نرخ جریان  $1 \text{ lbm/s}$  می‌باشد و به تناسب برای جریانهای زیاده‌تر بیشتر خواهد شد.

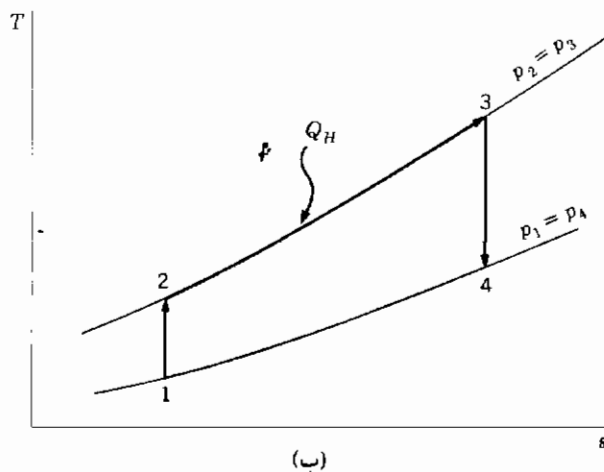
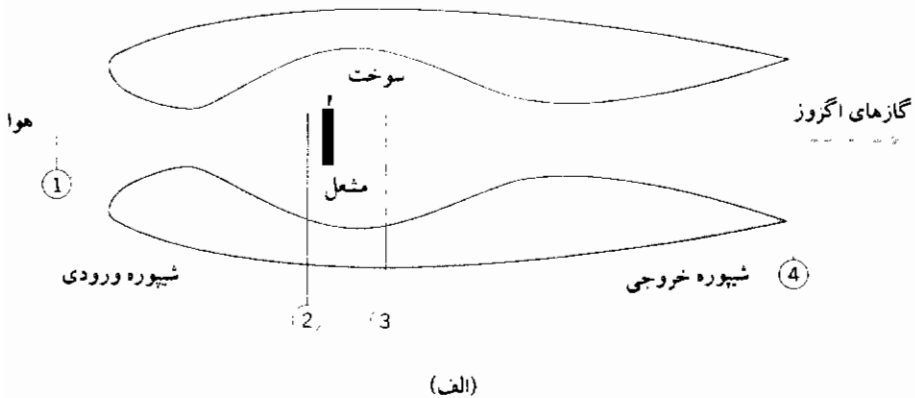
## ۹-۱۶ رام‌جت<sup>۱</sup>

رام‌جت دستگاه محرک هوایما در سرعت‌های خیلی بالاست. رام‌جت بر همان اساس توربوجت کار می‌کند، با این تفاوت که از گذرگاه جریانی جهت تبدیل انرژی جنبشی جریان ورودی به فشار استفاده می‌شود. طرحواره دستگاه در شکل ۳۵ - ۹ نشان داده شده است. سرعت جریان وارده طی فرآیند ۱-۲ در شیوره ورودی کاهش می‌یابد، در فرآیند ۲-۳، سوخت در فشار ثابت می‌سوزد، در نتیجه دما افزایش می‌یابد. در خاتمه جریان تا سرعت بالایی در شیوره خروجی منبسط می‌شود. چون به جریان انرژی اضافه شده است، سرعت در خروج  $V_4$  خیلی بیشتر از سرعت در وزود است. نیروی

پیش‌برنده خالص به وسیله تغییر شار ممتنم داده می‌شود

$$T = F = \frac{\dot{m}}{g_c} (V_4 - V_1) \quad (۹-۲۸)$$

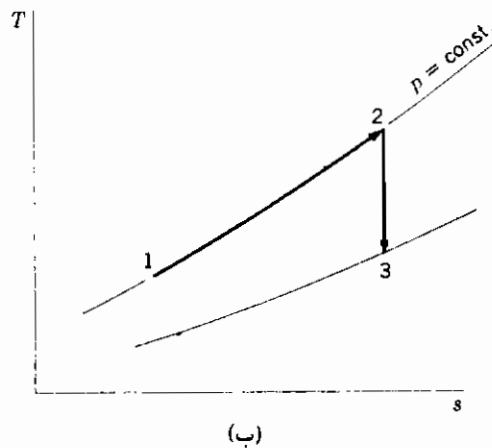
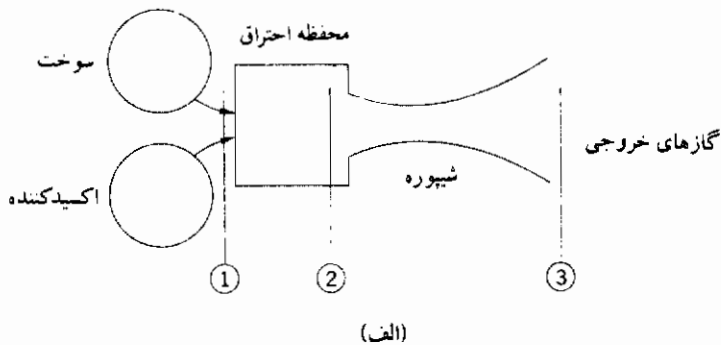
$\dot{m}$  نرخ جرمی جریان می‌باشد. رام‌جت فقط برای سرعتهای جریان ورودی خیلی بالا عملی می‌باشد و در غیر این صورت امکان ندارد که نسبت تراکم بالایی در ورود جهت خشی کردن تلفات ناشی از اصطکاک و برگشت‌ناپذیرهای موتور به‌دست آید.



شکل ۹-۳۵ رام‌جت (الف) طرحواره‌ای (ب) نمودار

۹-۱۲ راکت<sup>۱</sup>

راکت دستگاه ساده‌ای است که از طریق آن سوخت و اکسیدکننده‌ای در فشار بالا به محفظه احتراق (مشعل) رسانده می‌شود. سپس محصولات احتراق در فشار بالا از طریق شیبوره‌ای تا سرعت‌های بالا منبسط می‌شود در نتیجه تولید نیروی پیش‌برنده می‌کند. طرحواره موتور راکت در شکل ۹-۳۶



شکل ۹-۳۶ راکت (الف) طرحواره‌ای (ب) نمودار  $T-s$

نشان داده شده است. خرجهای<sup>۱</sup> (سوختهای) مایع و جامد هر دو می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. نیروی پیش‌برنده مجدداً به صورت تغییر شار ممتد داده می‌شود یا

$$T = F = \frac{\dot{m}}{g_c} V_3 \quad (9-29)$$

البته، جرم کلی موتور راکت به طور پیوسته کاهش می‌یابد، زیرا مقدار بیشتری از محصولات احتراق شیوره خروجی را ترک می‌کنند.

### ۹-۱۸ ضربه مخصوص<sup>۲</sup>

پارامتری که غالباً برای مقایسه سیستمهای دارای نیروی محرکه به کار می‌رود ضربه مخصوص است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$I_{sp} = \frac{\text{نیروی پیش‌برنده}}{\text{نرخ جرمی جریان}} = \text{ضربه مخصوص} \quad (9-30)$$

جدول ۹-۱ مقایسه تقریبی مقادیر ضربه‌های مخصوص را برای ۳ دستگاه دارای محرکه که در بخشهای قبلی تشریح شده است نشان می‌دهد. خواننده باید در مقایسه سیستمها، تنها براساس  $I_{sp}$  محتاط باشد.

جدول ۹-۱ ضربات مخصوص تقریبی برای چند دستگاه دارای نیروی محرکه

دستگاه	ضربه مخصوص $I_{sp}[\text{s}]$
توربرجت	۱۵۰۰ - ۲۰۰۰
راکت شیمیایی	۱۶۰ - ۴۰۰
رامجت	خیلی زیاد موقعی که در ارتفاع زیاد به کار رود

1- Propellants

2- Specific impulse

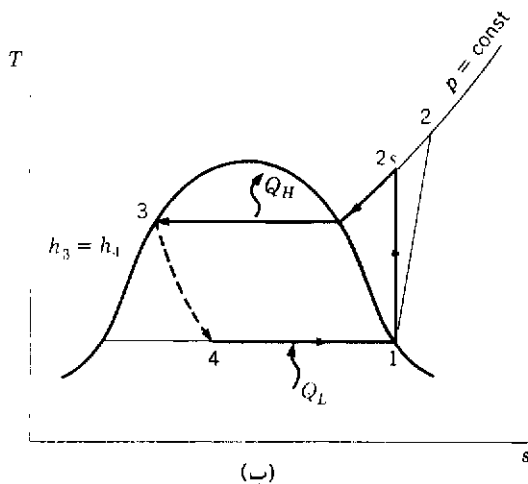
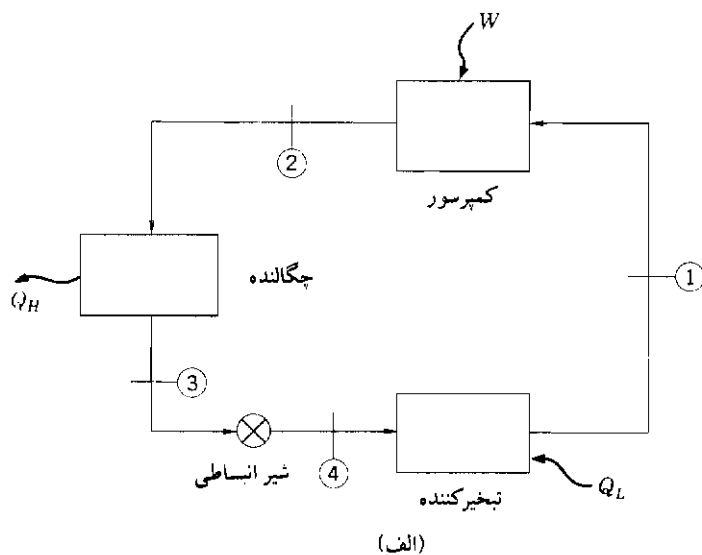
برای مثال، رام‌جت برای بلند کردن هواپیما کاملاً غیر عملی است. توربو‌جت و رام‌جت هر دو در پرواز فضائی کاملاً غیر عملی می‌باشند و راکت مقدار خیلی زیادی سوخت گران قیمت مصرف می‌کند. هر کدام از این سیستم‌ها جای خود را در کاربردهایشان دارند، اما بحث در جزئیات خارج از حیطه این شرح قرار دارد.

### ۹-۱۹ سیکل‌های تبرید بخار

سیکل تبرید بخار دستگاهی عملی است که سعی می‌کند مانند سیکل تبرید کارنو عمل نماید. طرحواره‌ای از مکانیزم عملی اصلی در شکل ۹-۳۷ نشان داده شده است. در حالت ایده‌آل تراکم آنتروپی ثابت است. حرارت ( $Q_L$ ) به وسیله تبخیر سیال در حد دمای پایینی به سیکل اضافه می‌شود، در حالی که دفع حرارت ( $Q_H$ ) به وسیله تقطیر بخار در حد دمای بالایی اتفاق می‌افتد. در قسمت تبخیر کننده حرارت تا زمان دستیابی بخار اشباع یا بخار کمی داغ در نقطه ۱ حاصل می‌شود.

تقطیر در دمای بالا مایع اشباعی در نقطه ۳ تولید می‌کند که باید تا فشار پایین منبسط شود تا بتواند فرآیند تبخیر را در دمای پایین انجام دهد. یک انبساط آنتروپی ثابت عملاً غیر ممکن است بنابراین راه ساده دیگر یعنی خفگی سیال از نقطه ۳ به نقطه ۴ انتخاب می‌شود. برای انرژی‌های جنبشی کوچک تحول خفگی آدیاباتیک فرآیندی است که انتالپی طی آن ثابت بماند یعنی  $h_3 = h_4$ . این فرآیند به صورت خط چین روی نمودار  $T-s$  نشان داده شده است زیرا برگشت ناپذیر است. در یک سیکل واقعی تراکم نیز برگشت ناپذیر است و خروجی کمپرسور ممکن است به صورت نقطه ۲' ظاهر شود.

رفتار سیال در دماهای پایین برای انتخاب سیال عامل در سیکل‌های تبرید عامل مهمی است. مثلاً آب نمی‌تواند زیر  $0^\circ\text{C}$  مورد استفاده قرار گیرد و حتی در دماهای نسبتاً کم لازم است که خلأی در قسمت تبخیر کننده باقی بماند. آمونیاک ( $\text{NH}_3$ ) به طور وسیع به عنوان سرد در دماهای خیلی پایین به کار می‌رود، اما معمولاً به خاطر ماهیت سمی اش به هنگام بروز نشت در سیستم‌های لوله کشی یا تبخیر کننده در تهویه مطبوع به کار نمی‌رود. هیدروکربن‌های فلوئوردار (فریون)<sup>۱</sup> غالباً در تهویه مطبوع به خاطر



شکل ۳۷-۹ سیکل تبرید بخار (الف) طرحواره‌ای (ب) نمودار  $T-s$

هزینه کم، رفتار بی‌اثر و سمی نبودنشان برای بشر به کار می‌روند. یک مزیت دیگرشان داشتن میل ترکیبی شدید باروغن است و بدین ترتیب می‌تواند به عنوان یک عامل خود-روغنکاری<sup>۱</sup> در کمپرسور

خدمت کند. آمونیاک و بعضی از فریونها، حتی در دماهای پایین دارای فشارهای اشباع بالای ۱ atm می‌باشند، بنابراین لزوم ایجاد خلأ را کاهش می‌دهند. برای محاسبه، خواص آمونیاک و دی‌کلرودی‌فلورومتان<sup>۱</sup> (فریون ۱۲) در ضمیمه داده شده است.

ضریب عملکرد برابر است با

$$\text{COP} = \frac{\text{اثر تبرید}}{\text{کار تحویل داده شده}} = \frac{Q_L}{W}$$

$$\text{COP} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (9-31)$$

زیرنویسها مربوط به نقاط شکل ۹-۳۷ است. یک واحد متداول در عمل برای تشریح اثر تبرید، تن می‌باشد که به صورت نرخ حرارت جهت ذوب کردن یک تن یخ در ۲۴ ساعت تعریف می‌شود. این تعریف به صورت زیر خلاصه می‌شود.

$$1 \text{ ton} = 12000 \text{ Btu/h} = 3.516 \text{ kW} \quad (9-32)$$

مثال زیر تحلیل کلی یک سیکل تبرید را نشان می‌دهد.

### مثال ۹-۱۶ یخچال فریون

سیکل تبرید بخار ایده‌آلی از فریون ۱۲ به عنوان سیال عامل استفاده می‌کند. دمای اشباع در چگالنده  $120^\circ\text{F}$  و دمای تبخیرکننده  $30^\circ\text{F}$  می‌باشد. ضریب عملکرد و اسب بخار ورودی را برای تولید تأثیر سرمایشی ۵ تن محاسبه کنید.

**حل:** نمودار طرحواره‌ای شکل ۹-۳۷ برای این مسئله به کار می‌رود. می‌توانیم با مراجعه به جداول خواص فریون در ضمیمه به دست آوریم:

$$h_1 = 80.419 \text{ Btu/lbm} \quad (\text{بخار اشباع در } 30^\circ\text{F})$$

$$s_1 = 0.16648 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R} = s_{2s}$$

$$h_3 = h_4 = 36.013 \text{ Btu/lbm} \quad (\text{مایع اشباع در } 120^\circ\text{F})$$

$$p_3 = p_2 = 172.35 \text{ psia} \quad (\text{فشار اشباع در } 120^\circ\text{F})$$

چون  $s_2 = s_1$  می‌توانیم با مراجعه به جداول داغ به دست آوریم

$$h_{2s} = 91.5 \text{ Btu/lbm} \quad (212.8 \text{ kJ/kg}) \quad s = 0.16648 \text{ و } p = 172 \text{ psia}$$

حال می‌توانیم COP را از معادله (۹-۳۱) محاسبه کنیم.

$$\begin{aligned} \text{COP} &= \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \\ &= \frac{80.4 - 36.0}{91.5 - 80.4} = 4 \end{aligned}$$

کار ورودی لازم به ازای هر پوند جرم سیال برابر است با

$$W = h_2 - h_1 = 11.1 \text{ Btu/lbm} \quad (25.82 \text{ kJ/kg})$$

کل نرخ جریان سیال لازم می‌تواند به صورت زیر به دست آید.

$$Q_L = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

$$(5)(12000) = \dot{m}(80.4 - 36.0)$$

$$\dot{m} = 1350 \text{ lbm/h} \quad (612.4 \text{ kg/h})$$

بنابراین کار کلی لازم برابر است با

$$W_{\text{کلی}} = \dot{m}(h_2 - h_1) = (1350)(11.1) = 15000 \text{ Btu/h}$$

$$W = 5.9 \text{ hp} \quad (4.39 \text{ kW})$$

## ۹-۲۰ پمپ حرارتی

با دیدن سیکل تبرید بخار می‌توانستیم دستگاه را به صورت مکانیزم "پمپ کردن" حرارت



به منبع گرم‌تر بر اساس مقیاس دما تصویر کنیم و آن را "پمپ حرارتی" بنامیم. از اصطلاح سیکل تبرید استفاده می‌کنیم زیرا سرمایش اثر مفیدی است که ما سعی می‌کنیم به آن دست یابیم. دستگاه مشابهی می‌تواند برای وظیفه‌ای دیگر به کار گرفته شود، یعنی حرارت  $Q_H$  در چگالنده تحویل شود. بنابراین می‌توان ماشین مشابهی برای سرمایش تابستان و گرمایش زمستان در خانه‌ها و ساختمانهای صنعتی کوچک یا تجاری به کار برد. در حالت گرمایش روشن معمول تعریف ضریب عملکرد به صورت زیر است

$$\text{COP}_H = \frac{\text{اثر مفید}}{\text{انرژی خرج برداشته شده}} = \frac{\text{اثر گرمایش}}{\text{کار ورودی}} = \frac{Q_H}{W} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H} \quad (9-33)$$

برای پمپ حرارتی کارنو  $\text{COP}_H$  مربوطه برابر است با

$$\text{COP}_{H(\text{کارنو})} = \frac{1}{1 - T_L/T_H} \quad (9-34)$$

پمپ حرارتی نسبت به گرمایش بوسیله مقاومت الکتریکی این مزیت آشکار را دارد که حصول اثر تکثیری<sup>۱</sup> از طریق COP می‌باشد، برای مثال یک واحد با COP سرمایش ۳، خواهد داشت

$$3.0 = \frac{Q_L}{W} \quad Q_L = 3 W$$

به طوری که

$$Q_H = Q_L + W = 4.0 W$$

$$\text{COP}_H = 4.0$$

و

بنابراین تنها نیاز به خرید یک واحد انرژی برای هر چهار واحد گرمای تحویلی می‌باشد. این البته چیزی نیست که با هیچ به دست آید! سرمایه‌گذاری اولیه برای ماشین باید صورت گیرد تا در آینده در هزینه برق صرفه جویی کنیم.

پمپ حرارتی شاید نسبت به سیستمهای گرمایش احتراق گاز طبیعی مزیت اقتصادی داشته باشد و شاید چنین نباشد. میزان هزینه نهایی وسیعاً بستگی به شرایط آب و هوایی دارد. در آب و هواهای معتدل معمولاً پمپ حرارتی قابل رقابت با سایر انواع دستگاههای گرمایشی است در حالی که در آب و

هوای خیلی سرد قابل رقابت نمی‌باشد. هزینه اولیه برای تشکیلات پمپ حرارتی حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد بیشتر از تهویه مطبوع و کوره گاز طبیعی قابل مقایسه با آن می‌باشد. می‌توان انتظار داشت که طرحهای پمپ حرارتی در آینده به‌طور وسیعی از انرژی خورشیدی به‌عنوان منبع حرارتی در تبخیرکننده استفاده کنند. با افزایش قابل ملاحظه دمای تبخیرکننده بیشتر از دمای محیط آزاد امکان بهبود قابل ملاحظه در ضریب عملکرد کلی وجود دارد.

### مثال ۹-۱۷ پمپ حرارتی کارنو

پمپ حرارتی کارنویی بین دمای خارج  $15^{\circ}\text{C}$  ( $5^{\circ}\text{F}$ ) و دمای داخل اتاق واحد گرمایش  $38^{\circ}\text{C}$  ( $100^{\circ}\text{F}$ ) کار می‌کند. درصد بهبود در عملکرد را محاسبه کنید اگر جمع آورنده انرژی خورشیدی طوری نصب شود که حد دمای پائینی تا  $10^{\circ}\text{C}$  ( $50^{\circ}\text{F}$ ) افزایش یابد.

**حل :** در اولین حالت داریم

$$T_L = -15^{\circ}\text{C} = 258\text{ K}$$

$$T_H = 38^{\circ}\text{C} = 311\text{ K}$$

به‌طوری‌که ضریب عملکرد برابر است با

$$\text{COP}_H = \frac{1}{1 - T_L/T_H} = \frac{1}{1 - 258/311} = 5.868$$

هنگامی‌که دمای پائینی به  $10^{\circ}\text{C}$  افزایش می‌یابد داریم

$$T_L = 10^{\circ}\text{C} = 283\text{ K}$$

$$T_H = 38^{\circ}\text{C} = 311\text{ K}$$

$$\text{COP}_H = \frac{1}{1 - 283/311} = 11.107$$

یا یک افزایش ۸۹ درصد است. راه دیگری را تصور کنید، به وسیله افزایش دمای قسمت پایینی از ۱۵- تا ۱۰۰°C، می‌توانیم مقدار گرمایش خروجی یکسانی را با کاهش قدرت ورودی به اندازه ۴۷ درصد تولید کنیم. طبیعتاً پمپ‌های حرارتی مقادیر بالای COP نشان داده شده در این مثال را نخواهند داد. اگرچه می‌توان انتظار داشت که حدوداً در صد بهبود یکسانی با افزایش دمای تبخیرکننده (قسمت پایینی) حاصل شود.

### مثال ۱۸-۹ مقایسه‌های هزینه‌ای: پمپ حرارتی در مقابل گرمکن سوخت فسیلی

فریون ۱۲ به عنوان سیال عامل پمپ حرارتی با دمای تبخیرکننده (دمای محیط خارج) ۴۰°F و دمای چگالنده (دمای محیط داخل) ۱۲۰°F به کار گرفته می‌شود. بازده کمپرسور ۸۵ درصد است. گرمایش لازم ۱۰۰۰۰ Btu/h است. اگر هزینه برق ۰/۰۵۳ \$ / kWh باشد، مقایسه کنید هزینه کارکردی پمپ حرارتی با گرمکن سوخت فسیلی که مخارج سوخت ۳/۲۵ دلار به ازای هر ۱۰۶ Btu است. فرض کنید بازده گرمکن سوخت فسیلی ۷۰ درصد باشد، یعنی تنها ۷۰ درصد انرژی سوخت به داخل فضایی که باید گرم شود داده می‌شود.

**حل:** پمپ حرارتی یک دستگاه تبرید بخار است و به صورت طرحواره‌ای در شکل ۳۷-۹ نشان داده شده است. انتالیها به صورت زیر تعیین می‌شوند.

$$h_1 = 81.436 \text{ Btu/lbm} \quad (\text{بخار اشباع در } 40^\circ\text{F}, \text{ جدول A-15})$$

$$s_1 = 0.16586 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R} = s_2$$

$$h_3 = h_4 = 36.013 \text{ Btu/lbm} \quad (\text{مایع اشباع در } 120^\circ\text{F})$$

$$p_3 = p_2 = 172.35 \text{ psia} \quad (\text{فشار اشباع در } 120^\circ\text{F})$$

با استفاده از  $s_1 = s_2$ ، و مراجعه به جداول بخار داغ (جدول A-16) در ۱۷۲/۳۵ psia و میان یابی

$$h_{2s} = 90.64 \text{ Btu/lbm}$$

به خاطر بازده کمپرسور باید بنویسیم

$$0.85 = \frac{h_2 - h_1}{h_2 - h_f} = \frac{90.64 - 81.436}{h_2 - 81.436} \quad (a)$$

$$h_2 = 92.264 \text{ Btu/lbm}$$

ظرفیت حرارتی برابر است با  $Q_H = 100000 \text{ Btu/h}$ ، در نتیجه

$$Q_H = \dot{m}(h_2 - h_3)$$

شدت و جریان فریون به صورت زیر محاسبه می شود

$$\dot{m} = \frac{100000}{92.264 - 36.013} = 1778 \text{ lbm/h} \quad (b)$$

کار ورودی مربوط برابر است با

$$\begin{aligned} W &= \dot{m}(h_2 - h_1) = (1778)(92.264 - 81.436) \\ &= 19252 \text{ Btu/h} = 5.64 \text{ kW} \end{aligned} \quad (c)$$

در  $\$ 0.053 / \text{kWh}$  ( $\$ 15/53/10^6 \text{ Btu}$ ) هزینه مربوط برابر است با

$$C_{HP} = (0.053)(5.64) = \$ 0.2989/\text{h}$$

هزینه واحد گرمایش برابر است با

$$C_{HP} / 10^6 \text{ Btu} = \frac{\$ 0.2989/\text{h}}{0.1 \times 10^6 \text{ Btu/h}} = \$ 2.989/10^6 \text{ Btu} \quad (d)$$

برای گرمکن سوخت فسیلی

$$E_{\text{سوخت}}(0.7) = 100000 \text{ Btu/h}$$

$$E_{\text{سوخت}} = 142860 \text{ Btu/h}$$

و در  $\$ 3/25/10^6 \text{ Btu}$  هزینه برابر است با

$$C_F = (\$ 3.25/10^6 \text{ Btu})(0.14286 \times 10^6 \text{ Btu/h}) = \$ 0.4643/\text{h}$$

هزینه هر  $10^6 \text{ Btu}$  تحویل داده شده به محیط داخل برابر است با

$$C_F/10^6 \text{ Btu} = \frac{0.4643}{0.1} = \$ 4.643/10^6 \text{ Btu} \quad (e)$$

بنابراین در می‌یابیم که واحد گرمایش برای پمپ حرارتی حدود ۳۵ درصد ارزانتر از گرمکن سوخت فسیلی است، اگرچه هزینه واحد انرژی خریداری شده برای پمپ حرارتی خیلی بیشتر است ( $10^6 \text{ Btu}/53/15$  برای پمپ حرارتی در مقابل  $10^6 \text{ Btu}/25/3$  برای سوخت فسیلی). البته این در نتیجه تأثیر ضریب عملکرد می‌باشد. حالا می‌توان ضریب عملکرد گرمایشی را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\text{COP}_H = \frac{Q_H}{W} = \frac{100000}{19252} = 5.194$$

## ۹-۲۱ سیکل‌های تبرید جذبی<sup>۱</sup>

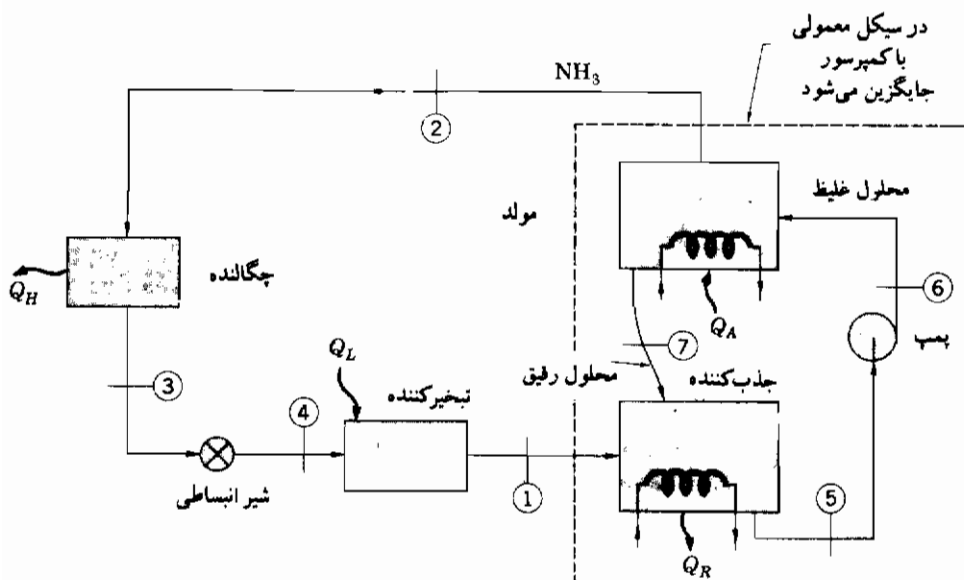
در خیلی از واحدها و ساختمانها بخار یا گازهای گرم خروجی به عنوان محصول فرعی فرآیندی یا به عنوان ظرفیت استفاده نشده از سیستم حرارتی که در فصولی از سال غیر فعال است موجود می‌باشد. در چنین مواردی انگیزه اقتصادی شدیدی برای استفاده از این ذخیره حرارتی برای اهداف دیگر وجود دارد. سیستم تبرید جذبی وسیله‌ای است که جهت استفاده از حرارت تلف شده چه برای تهویه مطبوع در تابستان و چه برای سیستم سردخانه مناسب می‌باشد.

واضح است که اختلاف فشاری باید در سیستم تبرید برای انجام اختلاف دمایی جهت افزایش و دفع گرما وجود داشته باشد. در سیکل بخار که در قسمت قبلی درباره آن بحث شد اختلاف فشار به وسیله کمپرسور بخار تحقق می‌یافت. چنین دستگاهی احتیاج به قدرت ورودی نسبتاً زیادی به‌ازای هر پوند جرم سیال در جریان دارد. پمپ جهت ستراکم نمودن مایع به چنین قدرت زیادی احتیاج ندارد. سیستم جذبی نشان دهنده طرحی است که در آن کمپرسور بخار به وسیله یک پمپ مایع و یک گرمکن مناسب تعویض می‌شود. سیستم جذبی اصلی در شکل ۹-۳۸ نشان داده شده است. در این بحث، فرض خواهیم کرد که سرد آمونیاک ( $\text{NH}_3$ ) است، این یکی از متداولترین مبردها در سیستمهای جذبی است.

چگالنده، تبخیر کننده و شیر انبساط مانند سیکل تراکم بخار می باشد، بنابراین مقدماً اجزای تعویض شده به جای کمپرسور یعنی جذب کننده، پمپ و مولد مورد توجه است.

اصل اساسی درگیر عبارت است از این که آب آمونیاک را جذب می کند و در این فرآیند حرارت آزاد می کند، مشروط بر این که دما ثابت نگهداشته شود. برعکس، هنگامی که حرارت به محلول غلیظ  $\text{NH}_4\text{OH}$  اضافه شود باعث می شود که به بخار  $\text{NH}_3$  و آب شکسته شود. در جذب کننده، بخار  $\text{NH}_3$  به صورت حباب به میان آب رانده می شود و حرارت  $Q_R$  برای ثابت نگاهداشتن دما خارج می شود. سپس محلول مایع غلیظ از نقطه ۵ تا فشار بالاتری در نقطه ۶ پمپ می شود. محلول غلیظ سپس در مولد قرار می گیرد و حرارت  $Q_A$  برای جوش آوردن  $\text{NH}_3$  در فشار بالایی اضافه می شود. محلول رقیق باقی مانده به جذب کننده برگشت داده می شود تا مقدار تازه ای از  $\text{NH}_3$  را کسب کند.

در سیکل جذبی کلی، کار ورودی به پمپ خیلی کم است و منبع اصلی انرژی که باید از خارج تهیه شود،  $Q_R$  برای مولد می باشد. اگرچه باید توجه داشت که سیکل جذبی نسبت به سیکل تراکم بخار احتیاج به امکانات خیلی بیشتری برای دفع حرارت دارد، زیرا احتیاج به دفع حرارت جذبی  $Q_R$  علاوه بر

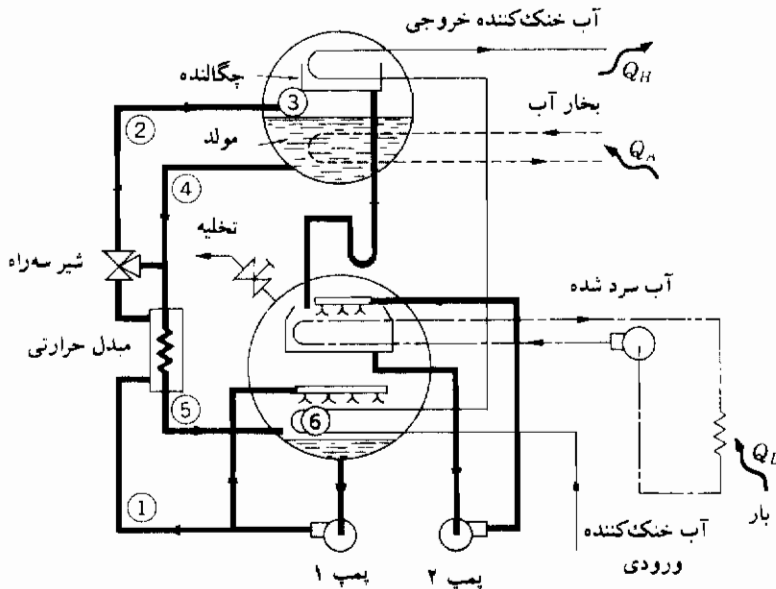


شکل ۳۸-۹ طرحواره سیستم تبرید - جذبی

مقدار  $Q_H$  می‌باشد. در تحلیل اقتصادی کلی سیستم که در عمل استفاده می‌شود باید به این موضوعات توجه شود.

جفت دیگر از سیالاتی که ممکن است در سیستم‌های جذبی برای کاربرد تهویه مطبوع به کار رود در جایی که دماهای تبخیرکننده خیلی پایین نیست عبارت است از ترکیب آب به عنوان مبرد و برمیدلیتیم<sup>۱</sup> به عنوان جذب کننده. با آب به عنوان مبرد، یک خلأ باید در تبخیرکننده ابقا شود تا دماهای پایین حاصل گردد. فشار مطلق  $0.12 \text{ psia}$  باید تهیه شود تا دمای تبخیرکننده  $40^\circ\text{F}$  حاصل گردد. چنین خلأهایی معمولاً به وسیله افشاندن‌های بخار<sup>۲</sup> ابقا می‌شوند.

طرحواره‌ای از یک سیستم عملی  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  در شکل ۹-۳۹ نشان داده شده است. هر دو تبخیرکننده و جذب کننده در قسمت فشار پایین سیستم کار می‌کنند و بدین ترتیب در یک محفظه مشترک با اتصالاتی برای تخلیه جهت ابقای شرایط خلأ محبوس می‌باشند. چگالنده و مولد در طرف



شکل ۹-۳۹ طرحواره سیستم واقعی تبرید جذبی آب - برمیدلیتیم (شرکت کارپر)

1- Lithium bromide

2- Steam ejectors

فشار بالا عمل می‌کنند و به‌طور مشابه در یک محفظه مشترک قرار دارند. این سیستم معمولاً در سیستمهای بزرگ خنک‌کننده به کار می‌رود که احتیاج به نرخهای سرمایش  $10^6 \text{ Btu/h}$  دارند، بنابراین مقدار قابل ملاحظه‌ای آب خنک‌کننده باید تهیه شود تا حرارت را از جذب‌کننده و چگالنده خارج کند. بخار آب معمولاً برای تهیه انرژی در مولد به کار می‌رود و از تبخیرکننده برای تولید آب سرد شده استفاده می‌شود.

حالا اجازه دهید که فرآیندهای دستگاه تبرید را تعقیب کنیم. در نقطه ۶ بخار آب در محفظه پایینی، در محلول رقیق LiBr وارده در نقطه ۵ جذب می‌شود. بعد از جذب و همراهی حرارت آزاد شده به آب خنک‌کننده، محلول قوی LiBr-H<sub>2</sub>O در نقطه ۱ از طریق پمپ ۱ به مولد پمپ می‌شود. شیر سه راه و مبدل حرارتی بعداً توضیح داده می‌شود. محلول غلیظ به‌زیر محفظه بالایی وارد می‌گردد و حرارت از طریق کویل‌های بخار آب به آن داده می‌شود، بنابراین باعث می‌شود بخار آب در نقطه ۳ از محلول خارج شود. سپس این بخار در ظرف فوقانی محفظه بالایی تقطیر می‌شود و محلول رقیق LiBr به محفظه پایینی در نقطه ۴ و ۵ باز می‌گردد. اختلاف فشار بین دو محفظه زیاد نیست زیرا دمای تقطیر متوسط است، مثلاً  $85^\circ\text{F}$ ، در جایی که فشار اشباع  $0.6 \text{ psia}$  می‌باشد. برای دمای تبخیرکننده  $40^\circ\text{F}$ ، اختلاف فشار  $0.48 \text{ psia} = 0.12 - 0.6$  می‌باشد. سرمایش هنگامی که بخشی از آب مایع بر اساس کاهش فشار ناگهان تبخیر می‌شود، انجام می‌پذیرد و مکانیزم U شکل در لوله آب مایع می‌تواند اختلاف فشار دو محفظه را ابقا کند.

فشار کم در محفظه پایینی هنگامی که لازم باشد به وسیله جذب بخار آب در محلول LiBr و به وسیله شیر تخلیه ایجاد می‌شود. پمپ ۲ جهت ادامه پاشش آب سرد تازه بر روی کویل‌های آب خنک‌کننده تهیه می‌شود تا میزان انتقال حرارت را افزایش دهد. یک سیستم افشانک مشابه در کنارگذر ۱ پمپ ۱ برای بالا بردن فرآیند جذب در نقطه ۶ فراهم می‌شود.

گرمایش بخار آب معمولاً در دمای  $210^\circ\text{F}$  تا  $220^\circ\text{F}$  تأمین می‌شود بنابراین محلول در نقطه ۴ کاملاً گرم است. محلول در نقطه ۱ خیلی سردتر است و مبدل حرارتی نشان داده شده عملکرد کلی را به روشی مشابه بازیابهای استفاده شده در سیکل‌های قدرت بهبود می‌بخشد. مایع با دمای بالا در ۴ برای بازگرم کردن سیال سرد از ۱ به ۲ استفاده می‌شود، به‌طوری که حرارت کمتری باید در قسمت مولد



اضافه شود. همچنین در احتیاجات آب خنک‌کننده برای جذب‌کننده صرفه‌جویی می‌شود چون محلول وارده در ۵ سردتر از حالتی است که بدون مبدل حرارتی بوده است. شیر سه راه به عنوان دستگاه کنترل بار عمل می‌کند تا جریان مایع را بین دو منبع متناسب با احتیاجات آب سرد‌کننده کم و زیاد کند.

### خودآزمایی (سؤالات مروری)

- ۱- عوامل اصلی که بر بازده حرارتی یک سیکل قدرت یا ضریب عملکرد یک سیکل تبرید تأثیر دارد، چیست؟
- ۲- بازده حرارتی یک سیکل قدرت چگونه به آلودگی ایجاد شده به وسیله سیکل مربوط می‌شود؟
- ۳- چرا به کار گرفتن بخار داغ در سیکل اصلی رانکین مزیت دارد؟
- ۴- چند عامل مهم را در انتخاب سیال عامل در یک سیکل قدرت بخار شرح دهید.
- ۵- چگونه یک بازیاب عملکرد سیکل قدرت بخار را بهبود می‌بخشد؟
- ۶- تمایز بین گرمکنهای آب تغذیه باز و بسته را مشخص کنید.
- ۷- بازده توربین را تعریف کنید.
- ۸- چرا بازده حرارتی کمتر منجر به ازدیاد "آلودگی حرارتی" می‌شود؟
- ۹- استفاده از خنک‌کنندهای میانی در ماشینهای تراکم هوا چه محاسنی دارد؟
- ۱۰- در انتخاب فشار(های) میانی طبقات کمپرسورهای با خنک‌کن میانی ایده آل چه اصولی باید به کار برده شود؟
- ۱۱- بازده حجمی را تعریف کنید.
- ۱۲- چرا می‌توان یک دستگاه کمپرسور هوا را به صورت دستگاه جریان دائم تحلیل کرد و لو این که تراکم در یک محفظه محصور مکانیزم سیلندر - پیستون انجام گیرد؟
- ۱۳- تمایز بین سیکل‌های اتو و دیزل را مشخص کنید.
- ۱۴- سیکل استاندارد هوایی چیست؟
- ۱۵- سیکل‌های اشتغال جرقه‌ای و اشتغال تراکمی را بر اساس محاسن و معایبشان مقایسه کنید.
- ۱۶- چگونه نسبت تراکم بر بازده حرارتی موتور احتراق داخلی تأثیر می‌گذارد؟
- ۱۷- چند حسن سیکل‌های توربین گازی برای تولید قدرت را شرح دهید.

- ۱۸- توربو جت چگونه کار می‌کند؟
- ۱۹- بازده بازیاب را تعریف کنید.
- ۲۰- رام جت چگونه کار می‌کند؟
- ۲۱- ضریب عملکرد چیست؟
- ۲۲-  $\eta_n$  چیست؟
- ۲۳- سیستم تبرید جذبی چگونه کار می‌کند؟
- ۲۴- چه عوامل اصلی بر ضریب عملکرد ماشین تبرید تأثیر دارد؟
- ۲۵- پمپ حرارتی چیست؟
- ۲۶- سیکل استرلینگ چیست؟ چگونه امکان دارد که بازده حرارتی آن به سمت مقدار سیکل کارنو میل کند؟
- ۲۷- محاسن سیکل‌های پیوندی که توربین گازی را با سیکل قدرت بخاری ترکیب می‌کند چیست؟

#### مسائل (آحاد انگلیسی)

- ۹-۱ در سیکل رانکینی، بخار آب در فشار ۱۰۰۰ psia و  $800^\circ\text{F}$  وارد توربین یک مرحله‌ای می‌شود. حرارت در چگالنده در  $80^\circ\text{F}$  دفع می‌شود. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید. محاسبه را برای بازگرم کردن بخار آب در ۵۰۰ psia تا  $800^\circ\text{F}$  تکرار کنید.
- ۹-۲ سیکل رانکین بخصوص با دو مرحله بازگرم کار می‌کند. بخار آب در ۱۵۰۰ psia و  $1200^\circ\text{F}$  وارد توربین می‌شود. بازگرم تا  $1200^\circ\text{F}$  در ۱۰۰۰ psia و ۵۰۰ psia انجام می‌گیرد. حد فشار پایینی در سیکل ۱ psia می‌باشد. هر مرحله توربین دارای بازده ۹۰ درصد می‌باشد. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید و با بازده سیکل کارنو در همان حدود دما مقایسه کنید.
- ۹-۳ توربین بخار کوچکی طوری طرح شده است که با فشار بخار آب ۲۰۰ psia کار می‌کند. توربین در سیکل رانکین ساده‌ای که در  $90^\circ\text{F}$  حرارت از دست می‌دهد به کار گرفته می‌شود. تا چه دمایی باید بخار آب پرفشار را حرارت داد تا مطمئن شد که رطوبت در توربین از ۵ درصد تجاوز نکند. بازده حرارتی سیکل را تحت این شرایط محاسبه کنید.

- فرض کنید که انبساط در توربین به صورت آنتروپی ثابت صورت گیرد.
- ۹-۴ مسأله ۹-۳ را برای بازده توربین ۹۰ درصد تکرار کنید.
- ۹-۵ یک سیکل بخار بازیاب بین  $1000 \text{ psia}$ ،  $800^\circ\text{F}$  و  $2 \text{ psia}$  کار می‌کند. یک گرم کن آب تغذیه باز به کار گرفته می‌شود. انبساط به صورت آنتروپی ثابت در توربین اتفاق می‌افتد و فشار برداشت از توربین طوری انتخاب می‌شود که افت انتالپی در هر یک از دو مرحله یکسان باشد. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید.
- ۹-۶ مسأله ۹-۵ را با استفاده از گرمکن آب تغذیه بسته با بازگشت حاصل تقطیر به چاه گرم چگالنده (از طریق تله بخار) تکرار نمایید.
- ۹-۷ یک نیروگاه بخار با سه گرمکن آب تغذیه باز و بازگرمایش بعد از هر مرحله توربین کار می‌کند. طرحواره این سیکل را رسم کرده و تمام نقاط مربوطه را بر روی آن مشخص نمایید و رابطه‌ای برای بیان بازده حرارتی آن بنویسید. همچنین تمام موازنه‌های انرژی لازم را بنویسید.
- ۹-۸ یک سیکل قدرت بخار سه مرحله توربین را با دو برداشت به گرمکن‌های آب تغذیه بسته و بازگرمایش بعد از هر برداشت به خدمت می‌گیرد. حاصل تقطیر به دیگ بخار پمپ می‌شود. طرحواره‌ای رسم کنید و رابطه‌ای برای بازده حرارتی سیکل بنویسید. همچنین تمام موازنه‌های انرژی لازم را بنویسید.
- ۹-۹ یک نیروگاه از دو گرمکن آب تغذیه استفاده می‌کنند. اولین برداشت به گرمکن آب تغذیه بازی داده می‌شود و باقی مانده بخار آب قبل از وارد شدن به مرحله دوم توربین بازگرم می‌شود. دومین برداشت به یک گرمکن آب تغذیه بسته داده می‌شود و حاصل تقطیر به فشار دیگ بخار پمپ می‌شود. بازگرمایش بعد از دومین برداشت انجام نمی‌گیرد. طرحواره‌ای از سیکل را رسم کنید و نقاط را بر روی آن مشخص نمایید و رابطه‌ای برای بازده حرارتی سیکل ارائه کنید. همچنین تمام موازنه‌های انرژی لازم را بنویسید.
- ۹-۱۰ یک نیروگاه بخار از دو برداشت و دو گرمکن آب تغذیه باز استفاده می‌کنند. بازگرمایش بعد از هر دو برداشت صورت می‌گیرد. طرحواره‌ای برای سیکل رسم کنید و نقاط را بر روی آن مشخص نمایید و رابطه‌ای برای بازده حرارتی سیکل بنویسید. همچنین تمام

موازنه‌های انرژی لازم را بنویسید.

۹-۱۱ یک کمپرسور هوایی رفت و آمدی هوا را در  $14 \text{ psia}$  و  $100^\circ\text{F}$  دریافت کرده و در  $45 \text{ psia}$  تخلیه می‌کند. حجم مرده ۵ درصد حجم جابه‌جا شده پیستون است. کمپرسور دارای قطر ۴ اینچ و کورس ۵ اینچ می‌باشد و در  $500 \text{ rpm}$  می‌چرخد. حجم هوای تهیه شده در شرایط ورودی، بازده حجمی و قدرت لازم را برای (الف) تراکم آنتروپی ثابت و (ب) برای تراکم پلی‌تروپیک با  $n = 1/3$  محاسبه کنید.

۹-۱۲ یک ماشین دو مرحله‌ای جهت تراکم هوا از  $14/7 \text{ psia}$ ،  $70^\circ\text{F}$  تا  $500 \text{ psia}$  به کار می‌رود. کمپرسور  $110 \text{ ft}^3/\text{min}$  هوا را در شرایط ورودی جابه‌جا می‌کند و فشار بین دو مرحله ایده‌آل به کار می‌رود. هر مرحله آدیاباتیک است اما دارای بازده ۷۰ درصد می‌باشد. یک خنک‌کن میانی ایده‌آل بین مراحل به کار گرفته می‌شود. قدرت لازم را بر حسب اسب بخار محاسبه کنید اگر ماشین به عنوان یک دستگاه جریان دائم عمل کند. چه اسب بخاری لازم بود اگر یک ماشین تک مرحله‌ای به کار گرفته می‌شد.

۹-۱۳ یک سیکل بخار بازیاب بین  $1500 \text{ psia}$ ،  $1200^\circ\text{F}$  و  $2 \text{ psia}$  کار می‌کند. ۲ گرمکن آب تغذیه بسته با فشار برداشت از توربین در  $800 \text{ psia}$  و  $200 \text{ psia}$  به کار گرفته می‌شود. حاصل تقطیر به چاه گرم چگالنده بازگشت داده می‌شود. بازده حرارتی سیکل را با فرضهای زیر (الف) انبساط آنتروپی ثابت در توربین و (ب) بازده ۸۵ درصد توربین برای هریک از سه مرحله محاسبه کنید.

۹-۱۴ یک سیکل بخار مرکب از بازیاب و بازگرم دارای شرایط کارکردی زیر است.

بخار آب ورودی به مرحله اول توربین:  $1000 \text{ psia}$ ،  $1000^\circ\text{F}$

فشار چگالنده:  $2 \text{ psia}$

فشار برداشت از توربین:  $100 \text{ psia}$

بعد از این که قسمتی از بخار آب برای استفاده در گرمکن آب تغذیه بازی برداشت شد، مابقی تا  $1000^\circ\text{F}$  بازگرم می‌شود و سپس در مرحله دوم توربین منبسط می‌شود. بازده توربین برای هر دو مرحله ۸۵ درصد و بازده پمپ پرفشار ۶۰ درصد می‌باشد. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید.

- ۹-۱۵ یک نیروگاه بخار با یک گرمکن آب تغذیه بسته کار می‌کند. بخار آب در  $100 \text{ psia}$  و  $1200^\circ\text{F}$  وارد توربین شده و برداشت در  $300 \text{ psia}$  صورت می‌گیرد. حد دمای پایین سیکل  $100^\circ\text{F}$  است. حاصل تقطیر از گرمکن پس از عبور از تله بخار وارد چگالنده می‌شود. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید.
- ۹-۱۶ یک سیکل قدرت بخار از یک گرمکن آب تغذیه باز استفاده می‌کند. شرایط ورودی به توربین برابر  $1120^\circ\text{F}$  و  $1600 \text{ psia}$  است و دمای چگالنده برابر  $100^\circ\text{F}$  می‌باشد. هر مرحله توربین دارای بازده  $87\%$  درصد است. بازده حرارتی را محاسبه کنید. از کار پمپ صرف نظر نمایید. برداشت در  $140 \text{ psia}$  صورت می‌گیرد.
- ۹-۱۷ یک سیکل رانکین دارای شرایط ورودی به توربین  $1200 \text{ psia}$  و  $950^\circ\text{F}$  و دمای چگالنده  $100^\circ\text{F}$  می‌باشد. بازده توربین  $87\%$  درصد است. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید.
- ۹-۱۸ یک سیکل بخار با بخار آب ورودی به توربین در  $800 \text{ psia}$  و  $1200^\circ\text{F}$  و فشار چگالنده  $2 \text{ psia}$  کار می‌کند. برداشت در  $300 \text{ psia}$  و با یک گرمکن آب تغذیه بسته صورت می‌گیرد، و حاصل تقطیر تا فشار دیگ بخار پمپ می‌گردد. بازده‌های مراحل توربین  $90\%$  درصد است. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید. از کار پمپ صرف نظر کنید.
- ۹-۱۹ یک سیکل بخار آب طوری طراحی شده تا قدرت خروجی  $100 \text{ MW}$  تولید نماید. ورودی به توربین  $1000 \text{ psia}$  و  $1200^\circ\text{F}$  است و یک گرمکن آب تغذیه بسته با برداشت در  $100 \text{ psia}$  به کار می‌رود. دمای چگالنده  $100^\circ\text{F}$  است. حرارت اضافه شده در دیگ بخار را با فرض انبساط آنتروپی ثابت و صرف نظر کردن از کار پمپ محاسبه کنید. حاصل تقطیر از طریق تله‌ای به چگالنده می‌رسد.
- ۹-۲۰ یک کمپرسور هوای سه مرحله‌ای بزرگ هوای ورودی را در  $14/7 \text{ psia}$  و  $70^\circ\text{F}$  دریافت کرده و در فشار  $900 \text{ psia}$  تخلیه می‌کند. بازده هر مرحله  $92\%$  درصد است. توان ورودی را برای شدت جریان هوای  $15 \text{ lbm/min}$  با فرض طبقه‌بندی ایده‌آل محاسبه کنید.
- ۹-۲۱ نسبت تراکم برای سیکل استاندارد هوایی دیزل  $19:1$  است و حرارت افزوده شده به‌ازای هر پوند جرم هوا برابر  $400 \text{ Btu}$  می‌باشد. شرایط در ابتدای تراکم  $80^\circ\text{F}$  و  $14/5 \text{ psia}$

می‌باشد. دما و فشار در تمام نقاط سیکل، نسبت قطع سوخت و بازده حرارتی را محاسبه کنید. بازده را با بازده سیکل کارنویی که بین همان حدود دما کار می‌کند مقایسه نمایید.

۹-۲۲ یک سیکل استاندارد هوایی دیزل دارای نسبت تراکم  $17:1$  و شرایط  $14/0$  psia و  $50^\circ\text{F}$  در آغاز مرحله تراکم می‌باشد. حداکثر دما در سیکل برابر  $3500^\circ\text{R}$  می‌باشد. دما و فشار را در هر نقطه سیکل، نسبت قطع سوخت و بازده حرارتی را محاسبه کنید. بازده را با بازده سیکل کارنویی که در همان حدود دما کار می‌کند مقایسه نمایید.

۹-۲۳ بازده حرارتی یک سیکل استاندارد هوایی اتو را که دارای همان حد فشار بالایی سیکل دیزل مسأله ۹-۲۱ می‌باشد محاسبه کنید.

۹-۲۴ بازده حرارتی سیکل اتویی را که دارای همان حد دمای بالایی در سیکل دیزل مسأله ۹-۲۲ می‌باشد محاسبه کنید.

۹-۲۵ چه برداشتی می‌توان از نتایج مسائل ۹-۲۳ و ۹-۲۴ کرد؟

۹-۲۶ یک سیکل استاندارد هوایی برایتون در  $14$  psia و  $60^\circ\text{F}$  هوادر یافت می‌کند. نسبت فشار  $4:1$  است و حد دمای بالایی سیکل  $1800^\circ\text{F}$  می‌باشد. بازده‌های کمپرسور و توربین  $85$  درصد می‌باشد. بازده حرارتی سیکل و کار خروجی خالص را به‌ازای هر پوند جرم هوا محاسبه کنید.

۹-۲۷ کمپرسور سه مرحله‌ای برای متراکم کردن هوا از  $14/7$  psia،  $70^\circ\text{F}$  تا  $1000$  psia به‌کار می‌رود. با فرض ایده‌آل بودن طبقه‌بندی و خنک‌کن میانی کار لازم را به‌ازای هر پوند جرم هوای متراکم محاسبه کنید. فرض کنید که فرآیند تراکم به‌صورت آنتروپی ثابت اتفاق می‌افتد.

۹-۲۸ یک سیکل استاندارد هوایی اتو دارای نسبت تراکم  $9:1$  می‌باشد. شرایط در ابتدای مرحله تراکم برابر با  $14$  psia و  $90^\circ\text{F}$  است. حداکثر فشار در سیکل  $560$  psia است. حداکثر دما در سیکل و بازده حرارتی را محاسبه کنید. این بازده را با بازده یک سیکل کارنو که در همان حدود دما کار می‌کند مقایسه نمایید.

۹-۲۹ یک سیکل استاندارد هوایی اتو طوری کار می‌کند که فرآیندهای تراکم و انبساط از رابطه‌های پلی‌تروپیک با  $n = 1/3$  پیروی می‌کند. بازده حرارتی را برای سیکل با

نسبت تراکم ۸:۱ شرایط ورودی ۱۴ psia، ۸۰°F و حد دمای ماکزیمم ۲۰۰۰°F محاسبه کنید.

۹-۳۰ یک سیکل استاندارد هوایی اتو با نسبت تراکم ۱۰:۱ و شرایط ۱۴/۵ psia و ۱۰۰°F در ابتدای مرحله تراکم کار می‌کند. در حین مرحله احتراق حرارت با نرخ هوا ۳۰۰ Btu/lbm اضافه می‌شود. دما و فشار را در تمام نقاط سیکل و بازده حرارتی را با فرض (الف) گرماهای ویژه ثابت و (ب) گرماهای ویژه متغیر بر مبنای جداول هوا محاسبه کنید. بازده را با بازده یک سیکل کارنو که در حدود همان دما کار می‌کند مقایسه کنید.

۹-۳۱ مسأله ۹-۲۶ را با استفاده از جداول هوایی که گرماهای ویژه متغیر را در نظر می‌گیرد تکرار نمایید.

۹-۳۲ بازایاب ایده آلی در سیکل برایتون مسأله ۹-۲۶ به کار گرفته می‌شود. بازده حرارتی را تحت این شرایط محاسبه کنید.

۹-۳۳ یک سیکل توربین گازی از دو مرحله تراکم و انبساط با یک خنک‌کن میانی ایده آل برای مراحل تراکم استفاده می‌کند. شرایط ورودی ۱۴/۷ psia و ۷۰°F می‌باشد و حداکثر فشار ۱۵۰ psia است. دما در ورود به هر مرحله توربین ۱۷۰۰°F می‌باشد. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید. فرآیندهای تراکم و مراحل توربین را آنتروپی ثابت فرض کنید.

۹-۳۴ بازایابی با بازده ۸۰ درصد در سیکل ۲ مرحله‌ای مسأله ۹-۳۳ نصب می‌شود. بازده حرارتی را تحت این شرایط محاسبه کنید و با بازده سیکل کارنویی که حدود همان دما کار می‌کند مقایسه نمایید.

۹-۳۵ مسأله ۹-۳۴ را با استفاده از بازده‌های ۸۰ و ۸۵ درصد بترتیب برای کمپرسور و توربین در هر مرحله تکرار نمایید.

۹-۳۶ یک سیکل توربین گازی یک کمپرسور دو مرحله‌ای را با طبقه‌بندی ایده آل و خنک‌کن میانی ایده آل به خدمت می‌گیرد. نسبت فشار کلی ۶/۳ است. هوای ورودی در ۱۴ psia و ۱۰۰°F است و حد دمای بالایی سیکل ۱۷۵۰°F می‌باشد. توربین تک مرحله‌ای است و بازده توربین ۸۸ درصد می‌باشد. کمپرسورها آنتروپی ثابت می‌باشند. یک بازایاب نیز

مورد استفاده قرار می‌گیرد و دارای بازده ۷۸ درصد می‌باشد. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید.

۹-۳۷ یک توربین گازی با نسبت فشار ۶ و شرایط اولیه  $10 \text{ psia}$  و  $50^\circ\text{F}$  کار می‌کند. حد دمای بالایی  $1850^\circ\text{F}$  است. بازده کمپرسور ۸۶ درصد است و بازده توربین ۸۳ درصد است. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید.

۹-۳۸ یک سیکل توربین گازی دارای شرایط ورودی هوای  $120^\circ\text{F}$  و  $1 \text{ atm}$  می‌باشد. نسبت فشار ۶ است. حد دمای بالایی  $1900^\circ\text{F}$  است و بازده توربین ۹۰ درصد است. کمپرسور آنتروپی ثابت است. بازیابی با بازده ۸۲ درصد نیز به کار می‌رود. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید.

۹-۳۹ یک سیکل توربین گازی دارای تراکم دو مرحله‌ای با طبقه‌بندی و خنک‌کن میانی ایده‌آل و یک مرحله توربین می‌باشد. بازیابی با بازده ۹۰ درصد نیز به کار می‌رود. کمپرسور و توربین هر دو آنتروپی ثابت می‌باشند. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید در صورتی که نسبت فشار کلی ۶/۷، شرایط ورودی  $14 \text{ psia}$  و  $75^\circ\text{F}$  و دمای بالایی  $1750^\circ\text{F}$  باشد.

۹-۴۰ یک موتور جت دارای نسبت فشار کلی ۵، شرایط ورودی  $7 \text{ psia}$  و  $40^\circ\text{F}$  و حد دمای بالایی  $1950^\circ\text{F}$  می‌باشد. تراکم و انبساط آنتروپی ثابت است. شدت جریان جرمی لازم برای تولید نیروی پیش‌برنده خالص  $10000 \text{ lbf}$  را محاسبه کنید اگر سرعت ورودی به کمپرسور  $600 \text{ ft/s}$  باشد.

۹-۴۱ از یک توربین گازی با شرایط ورودی  $5 \text{ psia}$  و  $40^\circ\text{F}$  برای نیروی پیش‌برنده جت استفاده می‌شود. نسبت فشار کلی ۵/۳ است و حد دمای بالایی موتور  $2000^\circ\text{F}$  می‌باشد. با فرض تراکم و انبساط آنتروپی ثابت، شدت جریان لازم را برای تولید نیروی پیش‌برنده  $15000 \text{ lbf}$  با سرعت ورودی به موتور  $200 \text{ ft/s}$  محاسبه کنید.

۹-۴۲ روش استفاده از انرژی گازهای گرم اگزوز در یک سیکل توربین گازی این است که از گازها برای گرمایش بخار آب در سیکل رانکین استفاده شود. سیکل توربین گازی مسأله ۹-۳۳ را در نظر بگیرید. از گازهای گرم اگزوز برای تأمین گرمای سیکل رانکین که بین  $500 \text{ psia}$  و  $2 \text{ psia}$  کار می‌کند، استفاده می‌شود. دمای بالایی در سیکل رانکین  $700^\circ\text{F}$



است و انبساط در توربین آنتروپی ثابت فرض می‌شود. گازهای انگرزگر مکن بخار آب را در  $500^{\circ}\text{F}$  ترک می‌کند. محاسبه کنید:

(الف) مقدار چرخش بخار آب به‌ازای هر پوند جرم هوا در سیکل توربین گازی

(ب) کار خروجی خالص سیکل مرکب بخار-توربین گازی به‌ازای هر پوند جرم هوا

(ج) بازده حرارتی سیکل مرکب

مسئله ۹-۴۳ را با فرض بازگرمایش بخار آب تا  $700^{\circ}\text{F}$  در  $100\text{ psia}$  تکرار نمایید.

یک موتور توربوچفت در حالیکه در موقعیت ثابت بر روی زمین قرار دارد، هوا را در

$14/5\text{ psia}$  و  $70^{\circ}\text{F}$  می‌گیرد. نسبت فشار در کمپرسور  $5:1$  است و حد دمای بالایی

$1800^{\circ}\text{F}$  می‌باشد. بازده‌های کمپرسور و توربین بترتیب  $80\%$  و  $85\%$  درصد می‌باشد و

انبساط در شیوره انگرز می‌تواند آنتروپی ثابت در نظر گرفته شود. نیروی پیش‌برنده و

گرمای ورودی را به‌ازای هر پوند جرم هوا در ثانیه با صرف نظر کردن از سرعت ورودی

محاسبه کنید.

مسئله ۹-۴۴ را برای پرواز در ارتفاعی که شرایط ورودی  $3\text{ psia}$ ،  $60^{\circ}\text{F}$  و  $800\text{ ft/s}$  می‌باشد تکرار کنید.

سیکل تبرید بخار ایده‌آلی از فریون ۱۲ به‌عنوان سیال عامل استفاده می‌کند. دستگاه جهت

تهویه مطبوع استفاده می‌شود به‌طوری‌که دمای تبخیرکننده  $45^{\circ}\text{F}$  و دمای اشباع چگالنده

$90^{\circ}\text{F}$  است. ضریب عملکرد و قدرت لازم به‌ازای هر تن سبرد را محاسبه کنید.

یک سیستم تبرید دمای پایین از آمونیاک به‌عنوان سیال عامل استفاده می‌کند. دمای تبخیر

کننده  $35^{\circ}\text{F}$  است و حد فشار بالایی سیکل برابر  $180/6\text{ psia}$  می‌باشد. بازده کمپرسور

$80\%$  درصد است. ضریب عملکرد و قدرت لازم بر حسب اسب بخار به‌ازای هر تن سبرد را

محاسبه کنید. این مقادیر را با مقادیر برای یخچال کارنویی که در حدود همان دما کار

می‌کند، مقایسه کنید.

فرض کنید آب خنک شده برای سرمایش چگالنده سیکل مسئله ۹-۴۷ موجود می‌باشد به

طوری‌که حد فشار بالایی سیکل به‌مقدار  $80\text{ psia}$  کاهش می‌یابد. ضریب عملکرد و

قدرت لازم بر حسب کیلووات به‌ازای هر تن را تحت شرایط جدید محاسبه کنید.

- ۹-۴۹ از آب به عنوان مبرد در یک سیکل تبرید بخار استفاده می شود. دمای تبخیر کننده  $45^{\circ}\text{F}$  و دمای چگالنده  $100^{\circ}\text{F}$  است. بازده کمپرسور ۸۰ درصد است. ضریب عملکرد سیکل را محاسبه کنید.
- ۹-۵۰ علی رغم این واقعیت که سیکل تبرید باید در خلأ کار کند، یک سیکل جدید تبرید طوری طراحی شده است که از آب به عنوان سیال عامل استفاده می کند. دمای تبخیر کننده  $40^{\circ}\text{F}$  و دمای چگالنده  $100^{\circ}\text{F}$  است. ضریب عملکردی را که می تواند حاصل شود اگر کمپرسور آنتروپی ثابت باشد محاسبه کنید.
- ۹-۵۱ یک مجموعه ساختمانی بزرگ از یک سیستم تهویه مطبوع آمونیاکی برای تولید میزان سرمایش ۲۰۰۰ تن استفاده می کند. تبخیر کننده در  $40^{\circ}\text{F}$  کار کرده و برج خنک کننده برای نگهداشتن چگالنده در  $80^{\circ}\text{F}$  به کار می رود. بازده کمپرسور ۸۳ درصد است. کار ورودی و شدت جریان آمونیاک لازم را محاسبه کنید.
- ۹-۵۲ یک سیستم تبرید برای سردخانه ای از آمونیاک به عنوان سیال عامل استفاده می کند. دمای تبخیر کننده  $20^{\circ}\text{F}$  و دمای چگالنده  $90^{\circ}\text{F}$  است. بازده کمپرسور ۸۵ درصد است. مقدار کار لازم جهت تولید ۷۵ تن سرمایش را محاسبه کنید.
- ۹-۵۳ سیستم تبرید آمونیاکی طوری طراحی شده است که با دمای تبخیر کننده  $40^{\circ}\text{F}$  و فشار چگالنده  $180/6 \text{ psia}$  کار می کند. مقدار کار ورودی را بر حسب کیلووات برای تولید اثر تبرید ۱۲۵۰ تن محاسبه کنید. فرض کنید که تراکم آنتروپی ثابت است.
- ۹-۵۴ در پمپ حرارتی مخصوصی فریون ۱۲ به عنوان سیال عامل به کار می رود و شدت حرارت  $100000 \text{ Btu/h}$  به داخل ساختمانی داده می شود. می توان فرض کرد که دمای چگالنده  $110^{\circ}\text{F}$  برای این حالت می باشد. تبخیر کننده خارج ساختمان باید در  $20^{\circ}\text{F}$  در زمستان کار کند. قدرت ورودی برای این واحد را بر حسب  $\text{Btu/h}$  و  $\text{hp}$  با فرض تراکم آنتروپی ثابت محاسبه کنید.
- ۹-۵۵ فریون ۱۲ به عنوان سیال عامل در یک دستگاه تبرید به خدمت گرفته می شود که با دمای تبخیر کننده  $10^{\circ}\text{F}$  و دمای چگالنده  $100^{\circ}\text{F}$  کار می کند. بازده کمپرسور ۸۵ درصد و سرمایش کلی تولیدی به وسیله ماشین ۲۵ تن است. قدرت لازم را برای چرخاندن

کمپرسور محاسبه کنید.

۹-۵۶ یک سیکل تبرید از فریون ۱۲ به عنوان سیال عامل استفاده می‌کند و دارای دمای تبخیر کننده  $40^{\circ}\text{F}$  است. دمای چگالنده  $130^{\circ}\text{F}$  و بازده کمپرسور ۷۸ درصد است. مقدار کار ورودی را برای تولید اثر سرمایش ۱۲ تن محاسبه کنید.

۹-۵۷ در یک سیستم تبرید بخصوص برای کاربردهای دمای پایین، یک عملکرد دو مرحله‌ای لازم است که از سیستم فریون ۱۲ در ترکیب با سیستم آمونیاک به کار گرفته شود. آمونیاک بین حد دمای پایینی  $40^{\circ}\text{F}$  و دمای بالایی  $30^{\circ}\text{F}$  عمل می‌کند. چگالنده برای سیکل آمونیاک (در  $30^{\circ}\text{F}$ )، تبخیر کننده برای سیکل فریون ۱۲ نیز هست که حرارت را به چگالنده خودش در  $100^{\circ}\text{F}$  پس می‌دهد. چگالنده آمونیاک و تبخیر کننده فریون ترکیب شده، عایق می‌شود به طوری که هیچ حرارتی از محیط کسب نمی‌کند و تمام حرارتی که آمونیاک از دست داده به تبخیر کننده فریون می‌رود. کل سیستم برای تولید تأثیر تبرید ۵ تن در شرایط  $40^{\circ}\text{F}$  است. با فرض فرآیند تراکم آنتروپی ثابت جریانهای جرمی لازم هر سیال، قدرت ورودی هر کمپرسور و ضریب عملکرد را برای سیستم کلی محاسبه کنید.

۹-۵۸ یک سیستم تهویه مطبوع جذبی مخصوص از آب به عنوان سیال عامل و از برمید لیتیم به عنوان منبع جذب کننده استفاده می‌کند. دمای تبخیر کننده برای سیکل  $40^{\circ}\text{F}$  است و دمای اشباع چگالنده  $100^{\circ}\text{F}$  می‌باشد. اثر سرمایشی را به ازای هر پوند جرم آب محاسبه کنید.

۹-۵۹ تهویه مطبوع اتومبیلی از سیستم تبرید فریون ۱۲ استفاده می‌کند. دمای تبخیر کننده در سرعت‌های بالا می‌تواند تا  $20^{\circ}\text{F}$  پایین بیاید، در حالی که دمای اشباع در چگالنده می‌تواند تا  $140^{\circ}\text{F}$  بالا رود. میزان اسب بخار لازم را برای تهیه ۳ tons سرد با بازده کمپرسور ۸۰ درصد محاسبه کنید. ضریب عملکرد تحت این شرایط چقدر است؟

۹-۶۰ یک سیکل بخار بازیاب از یک گرمکن آب تغذیه بسته و دو مرحله توربین استفاده می‌کند. بخار آب در ۸۰۰ psia و  $700^{\circ}\text{F}$  وارد توربین می‌شود و فشار برداشت از توربین در ۱۰۰ psia اتفاق می‌افتد. فشار تخلیه برابر ۱ psia می‌باشد. بازده هر مرحله توربین ۸۵ درصد است و پمپ مربوطه حاصل تقطیر را از گرمکن تا فشار دیگ بخار پمپ

می‌کند. بازده‌های پمپ ۱۰۰ درصد می‌باشد. بازده حرارتی سیکل و قدرت لازم پمپ را بر حسب اسب بخار در صورتی که کل خروجی الکتریکی از توربین ۲۰۰۰۰ kW باشد، محاسبه کنید.

۹-۶۱

یک سیکل توربین گازی هوا را در  $14/7 \text{ psia}$  و  $70^\circ\text{F}$  دریافت و با حد فشار بالای  $250 \text{ psia}$  کار می‌کند. دو مرحله تراکم با خنک‌کن میانی ایده‌آلی و انتخاب بهینه فشار بین مراحل به کار گرفته می‌شوند. همچنین دو مرحله توربین با بازگرمایش بین مراحل به کار گرفته می‌شوند. بازیابی با بازده ۸۵ درصد متصل به خروجی توربین دوم می‌باشد و هوای پرفشار داخل مشعل اولی می‌گردد. بازده‌های کمپرسور ۸۸ درصد است و بازده‌های توربین ۹۰ درصد می‌باشد. حد دمای بالایی سیکل  $1900^\circ\text{F}$  است. بازده حرارتی سیکل و جریان جرمی هوای لازم را برای خروجی الکتریکی ۱۰۰۰۰ kW محاسبه کنید. فرض کنید سیال عامل هوا با گرماهای ویژه ثابت باشد. اگر سوختی با ارزش حرارتی  $20000 \text{ Btu/lbm}$  و قیمت  $0.75 \text{ $/lbm}$  در دسترس باشد، هزینه انرژی الکتریکی تولید شده را بر حسب سنت به ازای هر کیلووات ساعت محاسبه کنید.

۹-۶۲

یک سیکل بخار بازیاب، دو گرمکن آب تغذیه بسته و سه مرحله توربین را به کار می‌گیرد. حاصل تقطیر از گرمکن اول از طریق تله بخاری به داخل گرمکن دوم جریان پیدا می‌کند و حاصل تقطیر از گرمکن دوم به فشار دیگ بخار پمپ می‌شود. بخار آب در  $1500 \text{ psia}$  و  $1000^\circ\text{F}$  وارد توربین می‌شود و برداشت از توربین در فشار  $300 \text{ psia}$  و  $100 \text{ psia}$  و تخلیه از سومین مرحله توربین در فشار  $1 \text{ psia}$  صورت می‌گیرد. بازده توربینها ۸۵ درصد و بازده پمپها ۱۰۰ درصد می‌باشد. بازده حرارتی و جریان بخار آب لازم را برای کل خروجی الکتریکی از توربین برابر  $20000 \text{ kW}$  محاسبه کنید.

۹-۶۳

در بعضی قسمتهای غرب ایالات متحده انرژی حرارتی زمین یعنی آب داغ زیر زمینی می‌تواند یک منبع اقتصادی قدرت باشد. فرض کنید که آب داغ در  $200^\circ\text{F}$  در دسترس است و دمای محیط برای اتلاف حرارت  $85^\circ\text{F}$  باشد. یک سیکل رانکین طوری طرح می‌شود که در این حدود و با استفاده از فریون ۱۲ به عنوان سیال عامل و حد نهایی فشار  $250 \text{ psia}$  کار کند. بازده توربین ۸۵ درصد است. با فرض افت دمای آب گرم به  $140^\circ\text{F}$

در حین پس دادن حرارت به فریون در دیگ بخار، شدت جریان آب لازم را برای قدرت خروجی ۲۵ MW محاسبه کنید.

۹-۶۴ سیکل بخار بازیاب با بخار آب ورودی به توربین در ۱۰۰۰ psia و  $1200^{\circ}\text{F}$  و دمای چگالنده  $100^{\circ}\text{F}$  کار می‌کند. یک گرمکن آب تغذیه باز به کار گرفته می‌شود و فشار بخار آب برداشت از توربین طوری انتخاب می‌گردد که حداکثر افزایش را در بازده سیکل فراهم کند. فشارهای برداشت متفاوتی را انتخاب کرده و تأثیر هایشان را بر بازده حرارتی بررسی کنید. محاسبات را برای حالات زیر انجام دهید:

(الف) انبساط آنتروپی ثابت و (ب) بازده‌های مراحل توربین ۸۷ درصد.

۹-۶۵ سیکل توربین گازی کوچکی برای کاربردهای موتوری با اطلاعات زیر طرح می‌شود:

حداکثر دما:  $1800^{\circ}\text{F}$

بازده توربین: ۹۰ درصد

بازده کمپرسور: ۸۵ درصد

بازده بازیاب: ۷۰ درصد

دمای هوای ورودی:  $120^{\circ}\text{F}$  ، ۱۴/۷ psia

قدرت خروجی: ۳۰۰ hp

نسبت فشار: ۳/۵:۱

با فرض یک سیکل استاندارد هوایی، بازده حرارتی سیکل و جریان جرمی هوای لازم را محاسبه کنید. اگر از سوختی با ارزش حرارتی ۱۴۰۰۰۰ Btu/gal استفاده شود، میزان مصرف سوخت را در حداکثر قدرت خروجی محاسبه کنید. محاسبات را با فرض ثابت بودن گرماهای ویژه و همچنین به کار بردن جداول هوا انجام دهید.

۹-۶۶ یک موتور دیزل بزرگ برای تولید قدرت خروجی ۵۰۰۰ hp موجود است و با نسبت تراکم ۱۸:۱ کار می‌کند. نسبت قطع سوخت برابر ۲ و تراکم و انبساط را می‌توان آنتروپی ثابت فرض کرد. با فرض نسبت هوا به سوخت ۱۶:۱ و سوختی با ارزش حرارتی ۲۰۰۰۰ Btu/lbm میزان مصرف سوخت لازم را برای تولید قدرت خروجی مشخص شده محاسبه کنید. محاسبات را بر مبنای سیکل استاندارد هوایی انجام دهید.

"پمپ حرارتی" یک ماشین معکوس تبرید است که می تواند برای حرارت دادن در هوای سرد به کار رود. چگالنده به صورت واحد حرارتی در داخل ساختمان در می آید در حالی که تبخیر کننده حرارت را از هوای سرد خارج دریافت می کند. معمولاً یک کمپرسور رفت و آمدی کار ورودی را برای قدرت سیکل فراهم می کند. واحد فریون ۱۲ را با مشخصات زیر در نظر بگیرید.

دمای چگالنده:  $100^{\circ}\text{F}$

دمای تبخیر کننده:  $20^{\circ}\text{F}$

حرارت مورد احتیاج:  $125000 \text{ Btu/h}$  در  $100^{\circ}\text{F}$

با فرض تراکم آنتروپی ثابت، کار ورودی برای تولید حرارت مشخص شده و شدت جریان جرمی فریون ۱۲ را محاسبه کنید. اگر انرژی الکتریکی  $0.42 \text{ kWh} / \$$  هزینه بردارد، مخارج کارکردن دستگاه چقدر است؟ این هزینه را با هزینه اجرای همان مقدار حرارت با سوخت مازوت به قیمت ۴ دلار به ازای هر میلیون Btu مقایسه کنید.

پمپ حرارتی مسأله ۹-۶۷ با کمپرسوری که همان مقدار شدت جریان جرمی را تولید می کند به عنوان واحد تهویه مطبوع در تابستان به کار می رود، اما چگالنده در  $120^{\circ}\text{F}$  به خارج حرارت پس می دهد (یک واحد خنک کننده هوا) در حالی که تبخیر کننده در  $55^{\circ}\text{F}$  در داخل کار می کند. نرخ خنک کننده بر حسب تن برای این شرایط و اسب بخار ورودی لازم را محاسبه کنید. همچنین هزینه برق مصرفی دستگاه را در این شرایط محاسبه کنید.

یک سیکل بسته توربین گازی که از هلیوم به عنوان سیال عامل استفاده می کند طوری طرح می شود که به اندازه سیکل مسأله ۹-۶۵ قدرت خروجی تولید کند. شرایط را می توان یکسان فرض کرد مگر این که شرایط ورودی هلیوم به کمپرسور برابر  $300^{\circ}\text{F}$  و  $150 \text{ psia}$  باشد. بازده حرارتی این سیکل و جریان جرمی هلیوم لازم را با فرض ثابت بودن گرماهای ویژه حساب کنید. همچنین حرارتی را که باید به محیط داده شود محاسبه کنید.

کارکردن موتورهای اشتعال - جرقه ای (سیکلهای اتو) در نسبت تراکمهای بالا احتیاج به مواد

۹-۶۷

۹-۶۸

۹-۶۹

۹-۷۰

افزونه ترا اتیل سرب به سوخت دارد که متخصصین بهداشت محیط ادعا می‌کنند برای سلامتی خیلی مضر است. برای کاهش این خطرات بعضی از طرح‌های موتور، نسبت تراکم پایین تری را به خدمت می‌گیرند. درصد ازدیاد مصرف سوخت را در نتیجه کاهش نسبت تراکم از  $10/75:1$  به مقدار  $8/5:1$  تخمین بزنید.

۹-۷۱ یک دستگاه جریان دائم طوری طرح می‌شود که هلیوم را از  $1/5 \text{ atm}$  و  $25^\circ\text{C}$  به  $100 \text{ atm}$  در سه مرحله متراکم کند. خنک‌کن میانی ایده‌آلی با مناسب‌ترین انتخاب طبقه‌بندی به کار گرفته می‌شود و بازده مراحل  $90\%$  درصد می‌باشد. کار ورودی را برای متراکم کردن  $10 \text{ kg/min}$  بر حسب  $\text{kW}$  محاسبه کنید.

۹-۷۲ یک کمپرسور هوایی رفت و آمدی دارای بازده حجمی  $95\%$  درصد است و طوری طرح می‌شود تا  $500 \text{ ft}^3/\text{min}$  هوای اندازه گرفته شده را در شرایط ورودی  $1 \text{ atm}$  و  $70^\circ\text{F}$  متراکم کند. فشار تخلیه  $75 \text{ psia}$  است و تراکم و انبساط را می‌توان آنتروپی ثابت فرض کرد. حجم مرده را بر حسب درصد حجم جابه‌جایی پیستون و قدرت ورودی لازم را بر حسب اسب بخار محاسبه کنید.

۹-۷۳ یک واحد توربین گازی بسته که از هلیوم به عنوان سیال عامل استفاده می‌کند برای نصب در کشتی که حرارت آن باید به آب دریا پس داده شود طرح می‌شود. از نسبت فشار کلی  $6:1$  با دو مرحله تراکم و خنک‌کن میانی ایده‌آل تا  $70^\circ\text{F}$  استفاده می‌شود. شرایط ورودی در مرحله اول  $70^\circ\text{F}$  و  $150 \text{ psia}$  است و حد دمای بالایی سیکل  $2000^\circ\text{F}$  می‌باشد. تنها یک توربین تک مرحله‌ای با بازیاب با بازده  $80\%$  درصد به کار گرفته می‌شود. بازده‌های کمپرسور و توربین  $90\%$  درصد است. بازده حرارتی سیکل و جریان جرمی هلیوم لازم را جهت تولید  $25000 \text{ hp}$  قدرت خروجی حساب کنید. مقدار کل حرارتی که باید به آب دریا پس داده شود به اضافه مقدار حرارتی که از خنک‌کن میانی خارج می‌شود چقدر است؟

۹-۷۴ یک نیروگاه اتمی به خاطر ملاحظات متالورژی در محفظه راکتور دارای حد دمای بالایی  $850^\circ\text{F}$  می‌باشد. در تأسیسات خاصی اطلاعات زیر برای طرح تهیه می‌شود.

حد فشار بالایی:  $1500 \text{ psia}$

گرمکنهای آب تغذیه: دو، بسته، حاصل تقطیر از اول به دوم از طریق تله بخار، حاصل تقطیر از دوم به دیگ بخار پمپ می شود.

فشارهای برداشت از توربین: ۵۰۰ psia و ۱۵۰ psia

بازگرم: بازگرم تا  $850^{\circ}\text{F}$  بعد از هر مرحله توربین

دمای چگالنده:  $100^{\circ}\text{F}$

بازده توربینها: ۹۰ درصد

قدرت خروجی: ۵۰۰۰۰۰ kW

جریان جرمی بخار آب لازم را به دیگ بخار محاسبه کنید. بازده حرارتی سیکل و حرارت اضافی را که باید در چگالنده تلف شود محاسبه کنید.

### مسائل (آحاد متریک)

۹-۱M در سیکل رانکین بخار آب وارد توربین تک مرحله ای در فشار ۸ MPa و  $440^{\circ}\text{C}$  می شود. حرارت در چگالنده در  $25^{\circ}\text{C}$  دفع می شود. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید. محاسبه را برای بازگرمایش بخار آب در ۴ MPa تا  $440^{\circ}\text{C}$  تکرار کنید.

۹-۲M یک سیکل رانکین با دو مرحله بازگرم کار می کند. بخار آب در ۱۰ MPa و  $640^{\circ}\text{C}$  وارد توربین می شود. بازگرمایش تا  $640^{\circ}\text{C}$  در ۸ MPa و ۴ MPa صورت می گیرد. حد فشار پایینی سیکل ۶ kPa می باشد. هر مرحله توربین دارای بازده ۹۰ درصد می باشد. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید و با بازده سیکل کارنو در حدود همان دما مقایسه کنید.

۹-۳M توربین بخار کوچکی طوری طرح شده است که با فشار بخار آب ۵ MPa / ۱ کار می کند. توربین در سیکل رانکین ساده ای که در  $30^{\circ}\text{C}$  حرارت از دست می دهد به کار گرفته می شود. تا چه دمایی باید بخار آب فشار بالا را حرارت داد تا مطمئن شد که رطوبت در توربین از ۵ درصد تجاوز نمی کند. بازده حرارتی سیکل را تحت این شرایط محاسبه کنید. فرض کنید که انبساط در توربین به صورت آنتروپی ثابت صورت گیرد.

۹-۴M یک سیکل بخار بازیاب بین ۸ MPa،  $440^{\circ}\text{C}$  و ۱۰ kPa کار می کند. یک گرمکن آب تغذیه باز به کار گرفته می شود. انبساط به صورت آنتروپی ثابت در توربین اتفاق می افتد و



فشار برداشت از توربین طوری انتخاب می‌شود که افت انتالپی در هر یک از دو مرحله یکسان باشد. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید.

۹-۵M یک نیروگاه بخار با دو گرمکن آب تغذیه باز و بازگرمایش بعد از اولین توربین کار می‌کند. طرحواره این سیکل را رسم کرده تمام نقاط مربوطه را بر روی آن مشخص نمایید و رابطه‌ای برای بیان بازده حرارتی آن بنویسید. همچنین تمام موازنه‌های انرژی لازم را بنویسید.

۹-۶M یک نیروگاه بخار از دو برداشت استفاده می‌کند. اولین برداشت به یک گرمکن آب تغذیه باز داده شده و باقی‌مانده بخار آب بازگرم می‌شود. برداشت دوم بدون بازگرم کردن به یک گرمکن آب تغذیه بسته داده شده حاصل تقطیر به فشار دیگ بخار پمپ می‌شود. طرحواره‌ای از سیکل رسم کنید و نقاط را بر روی آن مشخص نمایید و رابطه‌ای برای بازده حرارتی سیکل ارائه کنید. همچنین تمام موازنه‌های انرژی لازم را بنویسید.

۹-۷M یک نیروگاه بخار دو گرمکن آب تغذیه بسته را با بازگرمایش بعد از هر برداشت به خدمت می‌گیرد. طرحواره‌ای از این سیکل رسم کرده نقاط مختلف را بر روی آن مشخص کنید و رابطه‌ای برای بازده حرارتی سیکل بنویسید. همچنین تمام موازنه‌های انرژی لازم را بنویسید. انتخاب خود را برای حاصل تقطیر از هر دو گرمکن مشخص نمایید.

۹-۸M بخار آب در  $580^{\circ}\text{C}$  و  $8\text{ MPa}$  وارد توربین نیروگاهی می‌شود و به‌طور آنتروپی ثابت منبسط می‌گردد. برداشت بخار آب در  $800\text{ kPa}$  برای استفاده در گرمکن آب تغذیه بسته صورت می‌گیرد. دمای چگالنده  $40^{\circ}\text{C}$  است. جریان بخار آب لازم را برای قدرت خروجی  $100\text{ MW}$  محاسبه کنید. از کار پمپ صرف نظر نمایید. حاصل تقطیر به فشار دیگ بخار پمپ می‌شود.

۹-۹M یک سیکل بخار آب رانکینی دارای حد فشار بالای  $5\text{ MPa}$  و حد فشار پایینی  $20\text{ kPa}$  می‌باشد. دما در ورود به توربین  $500^{\circ}\text{C}$  است و بازده توربین  $85\%$  درصد می‌باشد. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید.

۹-۱۰M یک سیکل بخار آب بازپای از یک گرمکن آب تغذیه بسته و دو مرحله توربین استفاده می‌کند. بخار آب در  $6\text{ MPa}$  و  $370^{\circ}\text{C}$  وارد توربین شده و فشار برداشت از توربین در

۷۰۰ kPa اتفاق می افتد. فشار تخلیه برابر ۶ kPa است. بازده هر مرحله توربین ۸۵ درصد است و پمپ مربوطه حاصل تقطیر را از گرمکن تا فشار دیگ بخار پمپ می کند. بازده های پمپ ۱۰۰ درصد می باشد. بازده حرارتی سیکل و قدرت لازم پمپ را بر حسب اسب بخار در صورتی که کل خروجی الکتریکی از توربین ۲۰۰۰۰ kW باشد، محاسبه کنید.

۹-۱۱M یک سیکل توربین گازی هوا را در ۱ atm و ۲۰°C دریافت کرده با حد فشار بالای ۷/۱ MPa کار می کند. دو مرحله تراکم با خنک کن میانی ایده آل و انتخاب بهینه فشار بین مراحل به کار گرفته می شود. همچنین دو مرحله توربین با بازگرم بین مراحل به کار گرفته می شود. بازایی با بازده ۸۵ درصد، متصل به تخلیه از توربین دوم می باشد و هوای پر فشار داخل مشعل اولی می گردد. بازده های کمپرسور ۸۸ درصد است و بازده های توربین ۹۰ درصد می باشد. حد دمای بالایی سیکل ۱۰۵۰°C می باشد. بازده حرارتی سیکل و جریان جرمی هوای لازم را برای خروجی الکتریکی ۱۰۰۰۰ kW محاسبه کنید. فرض کنید سیال عامل هوا با گرماهای ویژه ثابت باشد. اگر سوختی با ارزش حرارتی ۴۴۰۰۰ kJ/kg و قیمت ۱/۶۵ \$/kg در دسترس باشد، قیمت انرژی الکتریکی تولید شده را بر حسب سنت به ازای هر کیلووات ساعت محاسبه کنید.

۹-۱۲M یک سیکل بخار بازیاب، دو گرمکن آب تغذیه بسته و سه مرحله توربین را به کار می گیرد. حاصل تقطیر از گرمکن اول از طریق تله بخاری به داخل گرمکن دوم جریان پیدا می کند و حاصل تقطیر از گرمکن دوم به فشار دیگ بخار پمپ می شود. بخار آب در ۱۰ MPa و ۵۶۰°C وارد توربین می شود و برداشت از توربین در فشار ۲ MPa و ۷۰۰ kPa و تخلیه از سومین مرحله توربین در فشار ۶ kPa صورت می گیرد. بازده توربینها ۸۵ درصد است و بازده پمپ ها صد درصد می باشد. بازده حرارتی و جریان بخار آب لازم را برای کل خروجی الکتریکی از توربین برابر ۲۰۰۰۰ kW محاسبه کنید.

۹-۱۳M سیکل بخار بازیاب با بخار آب ورودی به توربین در ۸ MPa و ۶۴۰°C و دمای چگالنده ۳۵°C کار می کند. یک گرمکن آب تغذیه باز به کار گرفته می شود و فشار بخار آب برداشت از توربین طوری انتخاب می گردد که حداکثر افزایش در بازده سیکل را فراهم کند. فشارهای برداشت متفاوتی را انتخاب کرده تأثیرهایشان را بر بازده حرارتی بررسی کنید.

محاسبات را برای حالات زیر انجام دهید:

- (الف) انبساط آنتروپی ثابت و (ب) بازده‌های مراحل توربین ۸۷ درصد
- ۹-۱۴M بازایاب ایده‌آلی در سیکل برایتون مسئله ۹-۴۵M به کار گرفته می‌شود. بازده حرارتی را تحت این شرایط محاسبه کنید.
- ۹-۱۵M یک سیکل توربین گازی از دو مرحله تراکم و انبساط همراه با خنک‌کن میانی ایده‌آل برای مراحل تراکم استفاده می‌کند. شرایط ورودی ۱ atm و  $20^{\circ}\text{C}$  است و فشار ماکزیمم ۱ MPa می‌باشد. دمای ورودی در ورود به هر مرحله توربین  $925^{\circ}\text{C}$  است. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید. فرض کنید فرآیندهای تراکم و مراحل توربین آنتروپی ثابت باشد.
- ۹-۱۶M بازایابی با بازده ۸۰ درصد بر روی سیکل دو مرحله‌ای مسئله ۹-۱۵M نصب می‌شود. بازده حرارتی را تحت این شرایط محاسبه کنید و با بازده سیکل کارنویی که بین همان حدود دما کار می‌کند مقایسه نمایید.
- ۹-۱۷M مسئله ۹-۱۶M را با استفاده از بازده‌های کمپرسور و توربین به ترتیب ۸۰ و ۸۵ درصد برای هر مرحله تکرار نمایید.
- ۹-۱۸M یک طریق استفاده از انرژی گازهای گرم اگرز در یک سیکل توربین گازی این است که از گازها برای حرارت دادن بخار آب در سیکل رانکین استفاده شود. سیکل توربین گازی مسئله ۹-۱۵M را در نظر بگیرید. گازهای گرم اگرز برای تأمین گرمای سیکل رانکین که بین ۴ MPa و ۱۰ kPa کار می‌کند، استفاده می‌شود. دمای بالایی در سیکل رانکین  $370^{\circ}\text{C}$  است و انبساط در توربین آنتروپی ثابت فرض می‌شود. گازهای اگرز گرمکن بخار آب را در  $260^{\circ}\text{C}$  ترک می‌کند. محاسبه کنید:
- (الف) مقدار چرخش بخار آب به ازای هر کیلو گرم هوا در سیکل توربین گازی
- (ب) کار خروجی خالص سیکل مرکب بخار-توربین گازی به ازای هر کیلو گرم هوا
- (ج) بازده حرارتی سیکل مرکب
- ۹-۱۹M مسئله ۹-۱۸M را با فرض بازگرم کردن بخار تا  $370^{\circ}\text{C}$  در ۷۰۰ kPa تکرار نمایید.
- ۹-۲۰M یک موتور توربوجت در حالی که در موقعیت ثابت بر روی زمین قرار دارد، هوا را در ۱۰۰ kPa و  $20^{\circ}\text{C}$  می‌گیرد. نسبت فشار در کمپرسور ۵:۱ است و حد دمای بالایی

$98.0^{\circ}\text{C}$  می باشد. بازده های کمپرسور و توربین به ترتیب ۸۰ و ۸۵ درصد است و انبساط در شیوره اگرز را می توان آنتروپی ثابت در نظر گرفت. نیروی پیش برنده و حرارت ورودی را به ازای هر کیلوگرم هوا با صرف نظر کردن از سرعت ورودی محاسبه کنید.

مسئله ۹-۲۱M  $9.20M$  را برای پرواز در ارتفاعی که شرایط ورودی  $20^{\circ}\text{C}$ ،  $20\text{ kPa}$  و  $275\text{ m/s}$  باشد تکرار کنید.

۹-۲۲M یک سیکل توربین گازی دو مرحله کمپرسور با خنک کن میانی و یک مرحله توربین را به خدمت می گیرد. تخلیه از توربین به یک دیگ بخار سیکل رانکین با یک گرمکن آب تغذیه بسته داده می شود. طرحواره ای از سیکل رسم کنید، تمام موازنه های انرژی لازم را بنویسید و رابطه ای برای بازده حرارتی سیکل پیوندی بر حسب نقاطی که در روی نمودار مشخص گردید، ارائه کنید.

۹-۲۳M یک سیکل توربین گازی دارای نسبت فشار ۵:۱ و حد دمای بالایی  $1900^{\circ}\text{F}$  می باشد. هوای ورودی در  $85\text{ kPa}$  و  $25^{\circ}\text{C}$  است. بازده توربین ۹۰ درصد است و بازده کمپرسور ۸۵ درصد می باشد. بازده حرارتی سیکل و جریان جرمی هوای لازم را جهت قدرت خروجی کل  $12\text{ MW}$  محاسبه کنید.

۹-۲۴M یک سیکل توربین گازی کوچک برای کاربردهای موتور با اطلاعات زیر طرح می شود:

حداکثر دما:  $1000^{\circ}\text{C}$

بازده توربین: ۹۰ درصد

بازده کمپرسور: ۸۵ درصد

بازده بازیاب: ۷۰ درصد

دمای هوای ورودی:  $50^{\circ}\text{C}$ ،  $1\text{ atm}$

قدرت خروجی:  $225\text{ kW}$

نسبت فشار: ۳/۵:۱

با فرض یک سیکل استاندارد هوایی، بازده حرارتی سیکل و جریان جرمی هوای لازم را محاسبه کنید. اگر سوختی با ارزش حرارتی  $36000\text{ kJ/lit}$  استفاده شود، نرخ مصرف سوخت در حداکثر قدرت خروجی را محاسبه کنید. محاسبات را با فرض ثابت بودن

گرماهای ویژه و همچنین به کار بردن جداول هوا انجام دهید.

۹-۲۵M یک سیکل بسته توربین گازی که از هلیوم به عنوان سیال عامل استفاده می‌کند طوری طرح می‌شود که به اندازه سیکل مسأله ۹-۲۴M قدرت خروجی تولید کند. شرایط را می‌توان یکسان فرض کرد مگر این که شرایط ورودی هلیوم به کمپرسور  $150^{\circ}\text{C}$  و  $1\text{ MPa}$  باشد. بازده حرارتی این سیکل و جریان جرمی هلیوم لازم را با فرض ثابت بودن گرماهای ویژه حساب کنید. همچنین حرارتی را که باید به محیط داده شود محاسبه کنید.

۹-۲۶M یک کمپرسور هوایی رفت و آمدی دارای بازده حجمی ۹۵ درصد می‌باشد و طوری طرح می‌شود تا  $235\text{ lit/s}$  هوای اندازه گرفته شده در شرایط ورودی  $1\text{ atm}$  و  $20^{\circ}\text{C}$  را تراکم کند. فشار تخلیه  $500\text{ kPa}$  است و تراکم و انبساط می‌توانند آنتروپی ثابت فرض شود. حجم مرده را بر حسب درصد حجم جابه‌جایی پیستون و قدرت ورودی لازم را بر حسب اسب بخار محاسبه کنید.

۹-۲۷M یک کمپرسور هوایی رفت و آمدی هوا را در  $95\text{ kPa}$  و  $38^{\circ}\text{C}$  دریافت کرده و در  $300\text{ kPa}$  تخلیه می‌کند. حجم مرده ۵ درصد حجم جابه‌جا شده پیستون است. کمپرسور دارای قطر ۱۰ سانتیمتر و کورس  $12/5$  سانتیمتر می‌باشد و در  $500\text{ rpm}$  می‌چرخد. حجم هوای تهیه شده در شرایط ورودی، بازده حجمی و قدرت لازم برای (الف) تراکم آنتروپی ثابت و (ب) برای تراکم پلی تروپیک را با  $n = 1/3$  محاسبه کنید.

۹-۲۸M یک ماشین دو مرحله‌ای برای تراکم هوا از  $1\text{ atm}$ ،  $20^{\circ}\text{C}$  تا  $3/5\text{ MPa}$  به کار می‌رود. کمپرسور  $50\text{ lit/s}$  هوا را در شرایط ورودی جابه‌جا می‌کند و فشار بهینه بین طبقه‌بندی به کار می‌رود. هر مرحله آدیاباتیک است، اما دارای بازده ۷۰ درصد می‌باشد. یک خنک‌کن میانی ایده‌آل بین مراحل به کار گرفته می‌شود. قدرت لازم را محاسبه کنید، اگر ماشین به عنوان یک دستگاه جریان دائم عمل کند. چه قدرتی لازم است اگر یک ماشین تک مرحله‌ای به کار گرفته شود؟

۹-۲۹M از یک کمپرسور سه مرحله‌ای برای تراکم هوا از  $1\text{ atm}$ ،  $20^{\circ}\text{C}$  تا  $8\text{ MPa}$  استفاده می‌شود. کار لازم به ازای هر کیلوگرم هوای متراکم شده را با فرض طبقه‌بندی و خنک‌کن میانی ایده‌آل محاسبه کنید. فرض کنید که فرآیندهای تراکم به صورت آنتروپی ثابت

صورت می‌گیرد.

۹-۳۰M یک سیکل استاندارد هوایی اتو دارای نسبت تراکم ۹:۱ می‌باشد. شرایط در ابتدای مرحله تراکم برابر ۹۵ kPa و  $30^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. حداکثر فشار در سیکل ۸/۳ MPa است. حداکثر دما در سیکل و بازده حرارتی را محاسبه کنید. این بازده را با بازده یک سیکل کارنو که در همان حدود دما کار می‌کند مقایسه نمایید.

۹-۳۱M یک سیکل استاندارد هوایی اتو طوری کار می‌کند که فرآیندهای تراکم و انبساط از روابط پلی‌تروپیک  $n = 1/3$  پیروی می‌کند. بازده حرارتی برای سیکل را با نسبت تراکم ۸:۱، شرایط ورودی ۹۵ kPa و  $25^{\circ}\text{C}$  و حد دمای ماکزیمم  $1100^{\circ}\text{C}$  محاسبه کنید.

۹-۳۲M از یک کمپرسور سه مرحله‌ای برای متراکم کردن هلیوم از ۹۵ kPa و  $25^{\circ}\text{C}$  تا ۵/۱ MPa استفاده می‌شود. طبقه‌بندی ایده‌آل به کار می‌رود و بازده هر مرحله ۸۳ درصد است. مقدار کار ورودی جهت شدت جریان ۱ lbm/s را محاسبه کنید.

۹-۳۳M توربین گازی برای یک موتور جت با نسبت فشار کلی ۶/۳ و شرایط ورودی  $400^{\circ}\text{C}$  و  $200\text{ m/s}$  به کار می‌رود. حد دمای بالایی ۱۳۰۰ K است و کمپرسور و توربین آنتروپی ثابت است. مقدار نیروی پیش‌برنده را برای شدت جریان هوای ۱۰۰ kg/s محاسبه کنید. ۹-۳۴M یک سیکل توربین گازی دارای نسبت فشار ۶/۳ است. بازده کمپرسور ۸۵ درصد و بازده توربین ۹۳ درصد می‌باشد. بازده بازیاب ۸۰ درصد است و دمای ورود به توربین  $1250^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. شرایط ورودی به کمپرسور ۹۰ kPa و  $10^{\circ}\text{C}$  است. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید.

۹-۳۵M یک سیکل توربین گازی دو مرحله کمپرسور با خنک‌کن میانی و یک مرحله توربین را به خدمت می‌گیرد. تخلیه از توربین به یک دیگ بخار سیکل رانکین با یک گرمکن آب تغذیه باز داده می‌شود. طرحواره‌ای از سیکل رسم کنید و نقاط را بر روی آن مشخص کنید و تمام موازنه‌های انرژی لازم را بنویسید. یک رابطه برای بازده حرارتی سیکل پیوندی ارائه کنید.

۹-۳۶M یک سیکل توربین گازی از دو مرحله تراکم با خنک‌کن میانی و طبقه‌بندی ایده‌آل استفاده می‌کند. تنها یک مرحله توربین به کار می‌رود. شرایط هوای ورودی  $10^{\circ}\text{C}$  و  $1100^{\circ}\text{C}$

می‌باشد. نسبت فشار کلی  $6/2$  است. بازیابی با بازده  $85$  درصد نیز به کار می‌رود. با فرض این که فرآیندها در کمپرسور و توربین آنتروپی ثابت باشد، بازده حرارتی سیکل و جریان جرمی هوای لازم را برای تولید کار خروجی  $18\text{ MW}$  محاسبه کنید.

۹-۳۷M یک سیکل استاندارد هوایی اتو با نسبت تراکم  $10:1$  کار می‌کند و شرایط در ابتدای کورس تراکم  $100\text{ kPa}$ ،  $35^\circ\text{C}$  می‌باشد. در حین فرآیند احتراق میزان افزودن گرما  $650\text{ kJ/kg}$  می‌باشد. دما و فشار را در تمام نقاط سیکل و بازده حرارتی را محاسبه کنید با فرض این که: (الف) گرماهای ویژه ثابت باشند (ب) گرماهای ویژه متغیر بر مبنای جداول هوا باشند. بازده را با بازده سیکل کارنویی که در همان حدود دمایی کار می‌کند، مقایسه کنید.

۹-۳۸M نسبت تراکم برای سیکل استاندارد هوایی دیزل  $19:1$  است و حرارت ورودی به‌ازای هر کیلوگرم جرم هوا برابر  $800\text{ kJ/kg}$  می‌باشد. شرایط در ابتدای تراکم  $100\text{ kPa}$  و  $25^\circ\text{C}$  می‌باشد. دما و فشار در تمام نقاط سیکل، نسبت قطع سوخت و بازده حرارتی را محاسبه کنید. بازده را با بازده سیکل کارنویی که در همان حدود دما کار می‌کند، مقایسه نمایید.

۹-۳۹M یک سیکل استاندارد هوایی دیزل دارای نسبت تراکم  $17:1$  با شرایط  $95\text{ kPa}$  و  $10^\circ\text{C}$  در آغاز مرحله تراکم می‌باشد. حداکثر دما در سیکل برابر  $1900\text{ K}$  است. دما و فشار در هر نقطه سیکل، نسبت قطع سوخت و بازده حرارتی را محاسبه کنید. بازده را با بازده سیکل کارنویی که در همان حدود دما کار می‌کند، مقایسه نمایید.

۹-۴۰M بازده حرارتی یک سیکل استاندارد هوایی اتو را که دارای همان حد فشار بالایی سیکل دیزل مسأله ۹-۳۸M می‌باشد محاسبه کنید.

۹-۴۱M یک کارخانه اتومبیل‌سازی دو موتور تولید می‌کند که هر کدام دارای حجم جابه‌جا شده  $5/7\text{ lit}$  می‌باشد. موتور اول به‌صورت دیزل با نسبت تراکم  $22$  و نسبت قطع سوخت  $1/5$  کار می‌کند. موتور دیگر، موتور اشتعال جرقه‌ای با نسبت تراکم  $8$  می‌باشد. ادعا می‌شود که موتور دیزل  $20$  درصد سوخت کمتر به‌ازای کیلومتر طی شده نسبت به موتور اشتعال جرقه‌ای مصرف می‌کند. آیا این ادعا قابل قبول است؟

۹-۴۲M در بعضی نواحی استفاده از آب داغ تحت فشار منابع زیرزمینی برای تولید قدرت امکان

دارد. در یکی از کاربردها آب در سطح زمین در  $20\text{ MPa}$  و  $300^\circ\text{C}$  در دسترس می‌باشد. این آب تا فشار  $1/5\text{ MPa}$  برای تولید مخلوط تری از بخار آب خفه می‌شود و این مخلوط سپس از میان دستگاهی عبور می‌کند تا قطرات مایع آن جدا شود (مجزاکننده)، به‌طوری‌که بخار اشباع در  $1/5\text{ MPa}$  برای ورود به توربین بخار در دسترس می‌باشد. تخلیه از توربین در  $1\text{ atm}$  صورت می‌گیرد. جریان آب لازم را برای تولید قدرت خروجی  $10000\text{ kW}$  از توربین محاسبه کنید. فرض کنید که جریان در توربین آنتروپی ثابت است.

۹-۴۳M بازده حرارتی یک سیکل استاندارد هوایی اتو را که دارای همان حد فشار بالایی سیکل دیزل مسأله ۹-۳۹M می‌باشد محاسبه کنید.

۹-۴۴M چه برداشتی می‌توان از نتایج مسائل ۹-۴۰M و ۹-۴۳M کرد؟

۹-۴۵M یک سیکل استاندارد هوایی برایتون هوا را در  $95\text{ kPa}$  و  $15^\circ\text{C}$  دریافت می‌کند. نسبت فشار  $4:1$  است و حد دمای بالایی سیکل  $980^\circ\text{C}$  می‌باشد. بازده‌های کمپرسور و توربین  $85\%$  درصد می‌باشد. بازده حرارتی سیکل و کار خروجی خالص را به ازای هر کیلوگرم جرم هوا محاسبه کنید.

۹-۴۶M یک پمپ حرارتی فریون  $12$  برای گرمایش  $460\text{ lit/s}$  هوا در  $1\text{ atm}$  از  $5^\circ\text{C}$  تا  $30^\circ\text{C}$  طراحی می‌شود. دمای تبخیرکننده (خارج)  $20^\circ\text{F}$  است و فشار چگالنده  $140\text{ psia}$  می‌باشد. برای تراکم آنتروپی ثابت، ضریب عملکرد، کار ورودی و هزینه به ازای هر ساعت گرمایش را با قیمت توان الکتریکی برابر  $\$ 0.07/\text{kWh}$  محاسبه کنید.

۹-۴۷M یک یخچال کارنو دارای ضریب عملکرد  $5/4$  است هنگامی که دمای پائینی  $20^\circ\text{C}$  - باشد. تغییر آنتروپی برای افزایش و دفع حرارت  $0.40\text{ kJ/K}$  می‌باشد. اثر تبرید و کار ورودی را محاسبه کنید.

۹-۴۸M وسیله تبرید خاصی برای تولید سرمایش  $1$  تن با ضریب عملکرد  $4$  طراحی می‌شود. قدرت ورودی را بر حسب کیلووات تعیین کنید. فرض کنید که همین وسیله برای گرمایش (پمپ حرارتی) به کار رود. مقدار COP گرمایشی چقدر خواهد بود؟

۹-۴۹M یک سیکل کارنو معکوسی برای گرمایش (پمپ حرارتی) به کار می‌رود که مقدار گرمایش



لازم  $6000 \text{ kJ/min}$  است. حرارت اضافه شده به سیکل برابر  $4500 \text{ kJ/min}$  است.

مقدار قدرت ورودی لازم بر حسب کیلووات چقدر است؟

۹-۵۰M هواپیمای جتی با سرعت  $270 \text{ m/s}$  حرکت می‌کند و سرعت گازهای خروجی آن

$600 \text{ m/s}$  است. نیروی پیش برنده خالص  $18 \text{ kN}$  تولید می‌شود. جریان جرمی هوای

لازم را محاسبه کنید.

۹-۵۱M شرایط ورودی برای مسأله ۹-۵۰M،  $30 \text{ kPa}$  و  $30^\circ\text{C}$  و شرایط خروجی  $30 \text{ kPa}$  و

$670^\circ\text{C}$  می‌باشد. برگشت ناپذیری کلی را برای هواپیمای با فرض  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  محاسبه

کنید.

۹-۵۲M کار ورودی به سیکل کارنو معکوس  $5 \text{ kW}$  است. اثر تبرید چقدر است اگر ضریب

عملکرد ۴ باشد؟ ضریب عملکرد چقدر خواهد بود اگر واحد برای گرمایش به کار رود؟

حد دمای بالایی چقدر است اگر حد دمای پایینی  $0^\circ\text{C}$  باشد؟

۹-۵۳M هوا با سرعت اولیه  $20 \text{ m/s}$  از  $1 \text{ atm}$ ،  $25^\circ\text{C}$  تا  $300 \text{ kPa}$  تراکم می‌شود. سرعت نهایی

$80 \text{ m/s}$  است. جریان حجمی ورودی را محاسبه کنید اگر  $1900 \text{ kW}$  قدرت مورد نیاز

بوده و فرآیند برگشت پذیر ثابت باشد.

۹-۵۴M جریان هوای مسأله ۹-۵۳M از همان شرایط ورودی به  $300 \text{ kPa}$  به طور برگشت ناپذیری

تراکم می‌شود و دمای تخلیه  $160^\circ\text{C}$  می‌باشد. قدرت ورودی را محاسبه کنید.

۹-۵۵M یک توربین گازی استاندارد هوایی برای تولید قدرت خروجی  $3/7 \text{ MW}$  با هوای

ورودی در  $1 \text{ atm}$  و  $30^\circ\text{C}$  و نسبت فشار ۱۰ طراحی می‌شود. ورود به توربین در  $840^\circ\text{C}$

است و بازده‌های کمپرسور و توربین هر دو ۸۵ درصد می‌باشند. جریان هوای لازم،

کارهای کمپرسور و توربین و بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید.

۹-۵۶M مسأله ۹-۵۵M را با نصب یک بازیاب با بازده ۹۰ درصد تکرار کنید. برگشت ناپذیریهای

چرخه کلی را برای هر دو سیکل مقایسه کنید. در این مسأله فرض کنید که خروجی توربین

در فشار ثابت تا  $30^\circ\text{C}$  خنک می‌شود.

۹-۵۷M یک واحد توربین گازی بسته‌ای که از هلیوم به عنوان سیال عامل استفاده می‌کند برای نصب

در کشتی که در آن حرارت باید به آب دریا پس داده شود طرح می‌شود. از نسبت فشار کلی

۶ بادو مرحله تراکم و خنک‌کن میانی ایده آل تا  $20^{\circ}\text{C}$  استفاده می‌شود. شرایط ورودی در مرحله اول  $20^{\circ}\text{C}$  و  $1\text{ MPa}$  و حد دمای بالایی سیکل  $1100^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. تنها یک توربین تک مرحله‌ای با بازیابی با بازده  $80\%$  به کار گرفته می‌شود. بازده‌های کمپرسور و توربین  $90\%$  درصد است. بازده حرارتی سیکل و جریان جرمی هلیوم لازم را برای تولید  $18700\text{ kW}$  قدرت خروجی حساب کنید. مقدار کل حرارتی که باید به آب دریا پس داده شود شامل مقدار حرارتی که از خنک‌کن میانی خارج می‌شود چقدر است؟

۹-۵۸M

یک موتور دیزل بزرگ برای تولید قدرت خروجی  $3700\text{ kW}$  موجود است و با نسبت تراکم  $18:1$  کار می‌کند. نسبت قطع سوخت برابر  $2$  و تراکم و انبساط را می‌توان آنتروپی ثابت فرض کرد. با فرض نسبت هوا به سوخت  $16:1$  و سوختی با ارزش حرارتی  $44000\text{ kJ/kg}$ ، نرخ مصرف سوخت لازم را برای تولید قدرت خروجی مشخص شده محاسبه کنید. محاسبات را بر مبنای سیکل استاندارد هوایی انجام دهید.

۹-۵۹M

یک ماشین تبرید آمونیاک برای تولید  $25$  تن سرمایش در  $20^{\circ}\text{F}$  طراحی شده است. خروجی از کمپرسور برابر  $220\text{ psia}$  و  $360^{\circ}\text{F}$  می‌باشد و شیر خفگی (انبساطی) مایع را در  $100^{\circ}\text{F}$  دریافت می‌کند. بازده کمپرسور، میزان جریان آمونیاک و ضریب عملکرد را محاسبه کنید.

۹-۶۰M

یک توربین گازی یک مرحله تراکم و دو مرحله توربین را به خدمت می‌گیرد. توربین فشار بالا تنها قدرت لازم جهت چرخاندن کمپرسور را تأمین می‌کند در حالی که توربین فشار پایین خروجی سیکل را تولید می‌کند. هوای ورودی در  $1\text{ atm}$ ،  $25^{\circ}\text{C}$  است و نسبت فشار کلی  $6/5$  می‌باشد. دمای ورودی به توربین  $800^{\circ}\text{C}$  است. تراکم و انبساط را می‌توان آنتروپی ثابت فرض کرد و بازیابی با بازده  $90\%$  درصد به خدمت گرفته می‌شود. اگر ارزش حرارتی سوخت به کار برده شده  $40\text{ MJ/kg}$  باشد، بازده حرارتی و جریان سوخت را برای قدرت خروجی  $10\text{ MW}$  محاسبه کنید.

۹-۶۱M

یک توربین گازی کوچک طوری طراحی می‌شود که در یک سیکل بسته با آرگون به عنوان سیال عامل کار کند. بازده‌های کمپرسور و توربین به ترتیب برابر  $88\%$  درصد و  $82\%$  درصد است. گاز در  $400\text{ kPa}$ ،  $40^{\circ}\text{C}$  وارد کمپرسور می‌شود و نسبت تراکم  $10$

می‌باشد. دمای ورود به توربین  $1100^{\circ}\text{C}$  است. میزان جریان آرگون برای قدرت خروجی کلی ۶MW را محاسبه کنید. همچنین برگشت ناپذیری برای سیکل را با  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$  محاسبه کنید.

۹-۶۲M یک توربین گازی با سیکل بسته از آرگون به عنوان سیال عامل با شرایط زیر استفاده می‌کند.

ورود به کمپرسور:  $475\text{ kPa}$  ,  $60^{\circ}\text{C}$

خروج از کمپرسور:  $375^{\circ}\text{C}$  و  $1/9\text{ MPa}$

ورود به توربین:  $1100^{\circ}\text{C}$

خروج از توربین:  $620^{\circ}\text{C}$

کار خروجی به ازای واحد جریان جرمی و بازده‌های کمپرسور و توربین را محاسبه کنید. همچنین برگشت ناپذیری برای سیکل را با  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$  محاسبه کنید.

۹-۶۳M یک سیکل بخار بازیاب بین  $10\text{ MPa}$ ،  $640^{\circ}\text{C}$  و  $10\text{ kPa}$  کار می‌کند. از ۲ گرمکن

آب تغذیه بسته با برداشت در  $500\text{ kPa}$  و  $1/5\text{ MPa}$  استفاده می‌شود. حاصل تقطیر به چاه گرم چگالنده فرستاده می‌شود. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید با فرض (الف) انبساط آنتروپی ثابت در توربین و (ب) بازده توربین ۸۵ درصد برای هر سه مرحله.

۹-۶۴M یک سیکل بخار مرکب از بازیاب - بازگرم دارای شرایط کارکردی زیر است:

بخار آب ورودی به مرحله اول توربین:  $8\text{ MPa}$ ،  $560^{\circ}\text{C}$

فشار چگالنده:  $10\text{ kPa}$

فشار برداشت از توربین:  $700\text{ kPa}$

بعد از این که قسمتی از بخار آب برای استفاده در گرمکن آب تغذیه باز برداشت شد، مابقی تا  $560^{\circ}\text{C}$  بازگرم می‌شود و سپس در مرحله دوم توربین منبسط می‌شود. بازده توربین برای هر دو مرحله ۸۵ درصد و بازده پمپ فشار بالا ۶۰ درصد می‌باشد. بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید.

۹-۶۵M یک نیروگاه اتمی به خاطر ملاحظات متالورژی در محفظه راکتور دارای حد دمای بالای

$450^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. در تأسیسات خاصی اطلاعات زیر برای طرح تهیه می‌شود.

حد فشار بالایی:  $10\text{ MPa}$

گرمکنهای آب تغذیه: دو، بسته، حاصل تقطیر از اول به دوم از طریق تله بخار، حاصل تقطیر از دوم به دیگ بخار پمپ می شود

فشارهای برداشت از توربین:  $3/5 \text{ MPa}$  و  $1 \text{ MPa}$

بازگرم: بازگرم تا  $450^\circ\text{C}$  بعد از هر مرحله توربین

دمای چگالنده:  $35^\circ\text{C}$

بازده های توربینها: ۹۰ درصد

قدرت خروجی:  $50000 \text{ kW}$

جریان جرمی بخار آب لازم را به دیگ بخار، بازده حرارتی سیکل و حرارت اضافی راکه باید در چگالنده تلف شود محاسبه کنید.

۹-۶۶M اندازه گیری هایی بر روی یک سیکل قدرت بخار بازیاب - بازگرم واقعی صورت گرفته است. یک گرمکن آب تغذیه بسته به کار گرفته شده و حاصل تقطیر به دیگ بخار پمپ می شود. اطلاعات زیر به دست آمده است.

قدرت خروجی مجاز:  $50000 \text{ kW}$

ورود بخار آب به توربین:  $T = 490^\circ\text{C}$  و  $p = 9 \text{ MPa}$

خواص برداشت:  $T = 210^\circ\text{C}$  و  $p = 900 \text{ kPa}$

نسبت برداشت شده: ۲۴ درصد

ورود بخار آب به دومین مرحله توربین بعد از بازگرم:

$T = 490^\circ\text{C}$  و  $p = 850 \text{ kPa}$

دمای چگالنده:  $30^\circ\text{C}$

دمای تخلیه از گرمکن آب تغذیه:  $175^\circ\text{C}$

بازده توربین برای مرحله دوم: ۷۸ درصد

با توجه به این اطلاعات جریان بخار آب لازم و بازده حرارتی سیکل را محاسبه کنید.

۹-۶۷M در نیروگاههای بخار جدید استفاده از فشارهای فوق بحرانی در دیگ بخار متداول است.

سیکل ایده آلی را در نظر بگیرید که بخار آب در  $40 \text{ MPa}$  و  $800^\circ\text{C}$  دیگ بخار را ترک می کند. ۵ گرمکن آب تغذیه بسته بابر داشتها در  $8 \text{ MPa}$ ،  $5 \text{ MPa}$ ،  $1/5 \text{ MPa}$

۸۰۰ kPa و ۱۰۰ kPa به خدمت گرفته می‌شود. تخلیه از توربین در ۸ kPa است. فرض کنید یک توربین آنتروپی ثابت و حاصل تقطیر از هر گرمکن بعد از عبور از تله بخار به گرمکن بعدی می‌رود و حاصل تقطیر از آخرین گرمکن به دیگ بخار پمپ می‌گردد. بازده حرارتی سیکل رامحاسبه کنید. چه قدرت خروجی با نرخ جریان  $50,000 \text{ kg/h}$  قابل حصول است؟

۹-۶۸M یک سیکل بازگرم ایده‌آل دو مرحله بازگرم به خدمت می‌گیرد. در ابتدا بخار آب در  $20 \text{ MPa}$  و  $540^\circ\text{C}$  وارد توربین شده، در فشارهای  $4 \text{ MPa}$  و  $1 \text{ MPa}$  دوباره تا  $540^\circ\text{C}$  بازگرم می‌شود. تخلیه از توربین  $20 \text{ kPa}$  است. بازده حرارتی سیکل و قدرت خروجی برای جریان بخار آب  $10 \text{ kg/s}$  را محاسبه کنید.

۹-۶۹M طرح‌هایی برای استفاده از سیکل رانکین با فریون ۱۲ به عنوان سیال عامل برای کاربردهای موتور تهیه شده است. فرض کنید قدرت خروجی  $38 \text{ kW}$  مطلوب باشد و فریون ۱۲ وارد توربین آنتروپی ثابت در  $500 \text{ psia}$  بشود و به صورت بخار اشباع در  $100^\circ\text{F}$  خارج گردد. بازده حرارتی سیکل و میزان جریان فریون ۱۲ لازم را برای قدرت مجاز محاسبه کنید.

۹-۷۰M یک طرح برای تولید قدرت با استفاده از گاز متان به دست آمده از منابع زیر زمینی دور از ساحل جهت یک سیکل پیوندی قدرت بخار - توربین گازی ارائه شده است. واحد باید بر روی سکویی دور از ساحل نصب شود به طوری که حرارت بتواند به اقیانوس دفع شود. فرض می‌کنیم شرایط زیر در کار باشد:

ورود به کمپرسور:  $20^\circ\text{C}$ ،  $1 \text{ atm}$

نسبت تراکم:  $10:1$

دما در ورود به توربین گازی:  $1400 \text{ K}$

ورود به توربین بخار:  $320^\circ\text{C}$ ،  $6 \text{ MPa}$

دمای تقطیر برای بخار آب:  $15^\circ\text{C}$

بازده کمپرسور:  $87 \text{ درصد}$

بازده توربین گازی:  $90 \text{ درصد}$

بازده توربین بخار: ۹۲ درصد

دمای خروجی گاز از دیگ بخار و پیش گرمکن آب:  $100^{\circ}\text{C}$

بازده حرارتی سیکل پیوندی، میزان جریان هوا و بخار لازم برای قدرت خروجی  $500\text{ MW}$  و حرارت دفع شده به اقیانوس را برای این سطح قدرت محاسبه کنید. اگر سوخت تأمین کننده  $38\text{ kJ/lit}$  در  $1\text{ atm}$ ،  $20^{\circ}\text{C}$  باشد، میزان جریان لازم را در  $10\text{ atm}$ ،  $50^{\circ}\text{C}$  برای تولید قدرت خروجی لازم محاسبه کنید.

۹-۷۱M مسأله  $9-70\text{ M}$  را با فرض دو مرحله تراکم و انبساط با طبقه بندی و خنک کن میانی ایده آل تکرار کنید. فرض کنید دما در ورود به هر مرحله توربین  $1400\text{ K}$  است.

۹-۷۲M بخار آب وارد توربین سیکل رانکینی در فشار  $3\text{ MPa}$  می شود و در فشار  $30\text{ kPa}$  تخلیه می شود. بازده حرارتی سیکل را برای سه دمای ورودی (الف) بخار اشباع (ب)  $320^{\circ}\text{C}$  و (ج)  $700^{\circ}\text{C}$  محاسبه کنید.

۹-۷۳M یک نیروگاه بخار، از دو گرمکن آب تغذیه باز با بازگرمایش بعد از هر برداشت استفاده می کند. طرحواره ای از سیکل رسم کنید، نقاط را تقریباً مشخص کنید و رابطه ای برای بازده حرارتی سیکل بنویسید. همچنین تمام موازنه های انرژی لازم را بنویسید.

## مراجع

- 1 Gaffert, G.A.: "Steam Power Stations," 4th ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1952.
- 2 Hill, P.G., and C.R. Peterson: "Mechanics and Thermodynamics of Propulsion," Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1965.
- 3 Jones, J.B., and G.A. Hawkins: "Engineering Thermodynamics," 2d ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1985.
- 4 Obert, E.F., and R.A. Gaggioli: "Thermodynamics," McGraw-Hill Book Company, New York, 1963.
- 5 Doolittle, J.S.: "Thermodynamics for Engineers," 2d ed., International Textbook Company, Scranton, Pa., 1964.
- 6 Stoecker, W. F.: "Refrigeration and Air Conditioning," McGraw-Hill Book Company, New York, 1958.

- 7 Barron, Randall: "Cryogenic Systems," McGraw-Hill Book Company, New York, 1966.
- 8 Culp, A.W.: "Principles of Energy Conversion," McGraw-Hill Book Company, New York, 1979.
- 9 Fraas, A.P.: Problems in Coupling a Gas Turbine to a Thermonuclear Reactor, *ASME*. 72-GT-98, May 1972.
- 10 Cole, D.E.: The Wandel Engine, *Scientific American*, vol. 227, pp. 14-23, August 1972.
- 11 Wood, B.D.: "Applications of Thermodynamics," Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1969.





# فصل ۱۰

## ترمودینامیک جریان تراکم پذیر

### ۱-۱۰ مقدمه

تا کنون اصول ترمودینامیک را برای تعدادی از فرآیندهای جریانی به کار برده ایم و رفتار برخی از سیستم های باز را با مفهوم حجم کنترل و موازنه های جرم و انرژی مربوطه تحلیل کرده ایم. در این فصل امیدواریم که این تحلیل را برای حالاتی که شامل جریان با سرعت خیلی زیاد از سیال تراکم پذیر است (در اکثر حالات، هوا) بسط دهیم: در چنین سیستم هایی عدد ماخ<sup>۱</sup> و امواج ضربه ای<sup>۲</sup> اهمیت دارد. بحث ما محدود به جریانهای تراکم پذیر یک بعدی خواهد بود، یعنی جریان هایی که تنها یک مؤلفه سرعت دارند.

### ۲-۱۰ حالت سکون<sup>۳</sup>

هنگامی که سیالی از سرعتی به حالت توقف درآید، گویند به حالت سکون رسیده است. این فرآیند کند شدن، مسلماً بر حالت سکون نهایی تأثیر می گذارد. حالت سکون آدیاباتیک برگشت پذیر یا آنتروپی ثابت بعداً در این بحث به کار خواهد آمد. برای چنین فرآیند سکونی، معادله انرژی جریان دائم

---

1- Mach number

2- Shock waves

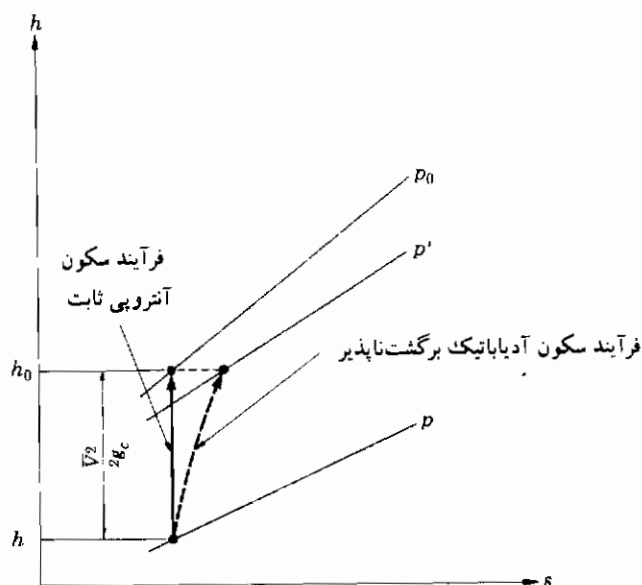
3- Stagnation state

چنین است

$$h + \frac{V^2}{2g_c} = h_0 \quad (۱۰-۱)$$

$h_0$  مشخص کننده انتالپی حالت سکون و  $h$  انتالپی سیال در حالتی است که دارای سرعت  $V$  می باشد. اگر سیال به طور آدیاباتیک اما برگشت ناپذیر به حالت ساکن درآید، انتالپی سکون نیز همین قدر خواهد بود زیرا معادله (۱۰-۱) موازنه انرژی است و بستگی به برگشت پذیری فرآیند ندارد. اگرچه حالت سکون نهایی به علت افزایش آنتروپی که در فرآیند برگشت ناپذیر رخ می دهد یکسان نخواهد بود. این دو فرآیند در شکل ۱۰-۱ بر روی نمودار  $h-s$  نشان داده شده است. تفاوت اصلی بین این دو این است که فشار سکون آنتروپی ثابت  $p_0$  بیشتر از  $p'$ ، فشاری که می تواند در فرآیند سکون واقعی به دست آید، می باشد. اگرچه هر دو حالت سکون شامل سرعت صفر است، زیر نویس صفر را جهت تشخیص حالت سکون آنتروپی ثابت محفوظ خواهیم داشت.

فشار جریان اندازه گرفته شده به وسیله ناظری که همراه با سیال حرکت می کند، معمولاً فشار

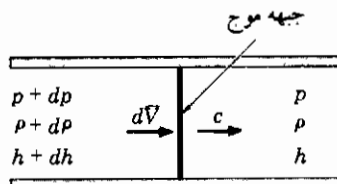


شکل ۱۰-۱ حالات سکون

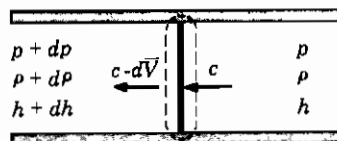
استاتیک نامیده می شود. این فشاری است که حالت ترمودینامیکی سیال در حرکت را تعیین می کند. انتخاب کلمه استاتیک چندان مناسب به نظر نمی رسد زیرا دلالت بر فشار سیال بعد از رسیدن به حالت سکون دارد، اما همان طور که قبلاً گفته ایم، خواص سکون در سرعت صفر اندازه گیری می شود. برای تمیز دادن این دو نوع فشار توصیه می شود به جمله اول این پاراگراف رجوع شود: هرگاه اصطلاح استاتیک را به خاصیت ترمودینامیکی نسبت دهیم، منظور مقدار اندازه گیری شده توسط ناظری است که با سرعت محلی سیال حرکت می کند. بحثهای گسترده در این زمینه را می توان در مراجع آخر فصل یافت.

### ۱۰-۳ سرعت صوت و عدد ماخ

سرعتی که در آن یک اغتشاش جزئی فشار در سیال منتشر خواهد شد سرعت صوت نامیده می شود و با علامت  $c$  مشخص می گردد. حالا رابطه ای جهت محاسبه این سرعت برای یک گاز ایده آل بر حسب حالات ترمودینامیکی آن گاز به دست خواهیم آورد. لوله شکل ۱۰-۲ را در نظر بگیرید. در شکل الف از دید ناظری ساکن، جبهه موج بینهایت کوچکی را که با سرعت  $c$  حرکت می کند، مشاهده



(الف)



(ب)

شکل ۱۰-۲ موج صوتی (الف) ناظر ساکن و (ب) ناظر متحرک با جبهه موج

می‌کنیم: همان‌طور که نشان داده شده در عرض جبهه تغییرات کوچکی در خواص ترمودینامیکی موجود می‌باشد. شکل ب ۱۰-۲ برداشت دیگری از پدیده است که ناظر همراه با جبهه موج حرکت کرده، جریان را به داخل و خارج سطح کنترلی در برگیرنده جبهه، مشاهده می‌کند. فرض کنیم که جریان در عرض جبهه آدیاباتیک باشد، بنابراین به علت بقاء انرژی تغییر انتالپی  $dh$  سبب تغییر سرعت  $dV$  خواهد شد.

حالا موازنه جرم و انرژی را برای حجم کنترل در برگیرنده جبهه موج در شکل ب ۱۰-۲ برقرار می‌کنیم. از رابطه پیوستگی جرم در فصل چهارم داریم:

$$\rho A c = (\rho + d\rho) A (c - dV) \quad (10-2)$$

یا

$$c d\rho - \rho dV = 0 \quad (10-3)$$

$A$  سطح مقطع جریان می‌باشد. می‌دانیم که:

$$T ds = dh - v dp = dh - \frac{dp}{\rho} \quad (10-4)$$

اگر فرآیند علاوه بر آدیاباتیک بودن برگشت پذیر نیز باشد، معادله (۱۰-۴) به صورت زیر در می‌آید.

$$0 = dh - \frac{dp}{\rho} \quad (10-5)$$

موازنه انرژی برای جبهه موج برابر است با:

$$h + \frac{c^2}{2g_c} = (h + dh) + \frac{(c - dV)^2}{2g_c}$$

یا با ساده کردن جملات:

$$dh - \frac{cdV}{g_c} = 0 \quad (10-6)$$

ترکیب (۱۰-۵) و (۱۰-۶) می‌دهد:

$$\frac{dp}{\rho} - \frac{cdV}{g_c} = 0 \quad (۱۰-۷)$$

حالا ترکیب معادلات (۱۰-۳) و (۱۰-۷) می‌دهد:

$$\frac{c^2}{g_c} = \frac{dp}{d\rho}$$

چون فرآیند را آنتروپی ثابت فرض کردیم، آن را باید به صورت زیر نوشت:

$$\frac{c^2}{g_c} = \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s \quad (۱۰-۸)$$

حالا معادله (۱۰-۸) رابطه محاسبه سرعت صوت در سیال را به دست می‌دهد، برای گاز ایده آل این رابطه را بیشتر می‌توان ساده کرد. نشان داده‌ایم که فرآیند آنتروپی ثابت برای گاز ایده آل را می‌توان به صورت زیر معرفی نمود.

$$pv^\gamma = \text{const.} \quad \text{یا} \quad p\left(\frac{1}{\rho}\right)^\gamma = \text{const.} \quad (۱۰-۹)$$

بنابراین می‌توان از معادله (۱۰-۹) مشتق گرفت تا به دست آید:

$$\frac{dp}{d\rho} = \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s = \frac{\gamma p}{\rho} \quad (۱۰-۱۰)$$

حالا با ترکیب (۱۰-۸) و (۱۰-۱۰) برای گاز ایده آل به دست می‌آوریم:

$$c^2 = \frac{\gamma p g_c}{\rho}$$

اما برای گاز ایده آل  $\frac{p}{\rho} = RT$  می‌باشد، بنابراین

$$c^2 = \gamma g_c RT \quad (۱۰-۱۱)$$

$$c = \sqrt{\gamma g_c RT} \quad (۱۰-۱۲)$$

بدین ترتیب سرعت صوت در یک گاز ایده آل تنها تابعی از دماست. با یادآوری بحثمان در بخش ۱-۱۶ که دما متناسب با متوسط انرژی جنبشی ملکولی می‌باشد، پس  $T^{1/2} \sim v_{rms}$  است. جالب توجه

است که سرعت صوت نیز متناسب با  $T^{1/2}$  می باشد. می توان نشان داد که فرآیندهای گوناگون انتقال به سرعت ملکولی متوسط موجود مربوط می شود. بنابراین رسیدن به این مطلب که سرعت انتشار اغتشاش جزئی فشار، یعنی سرعت صوت، به طریق مشابهی به دما بستگی دارد، تعجب آور نخواهد بود. البته از نقطه نظر ملکولی این تصادمات ملکولی است که باید اغتشاش فشار را منتشر کند و نرخهای تصادم متناسب با سرعت ملکولی متوسط می باشد.

عدد ماخ  $M$  یک نسبت بدون واحد است که برای بررسیهای تحلیلی بعدی مفید خواهد بود و به صورت زیر تعریف می شود.

$$M = \frac{V}{c} \quad (۱۰-۱۳)$$

که  $V$  سرعت جریان است. جریانهای مختلف بر حسب مقادیر عدد ماخ مشخص می شود مانند مافوق صوت برای  $M > ۱$ ، مادون صوت برای  $M < ۱$  و جریان صوتی برای  $M = ۱$ .

### مثال ۱۰-۱ سکون آنتروپی ثابت

هوا به چه دما و فشاری خواهد رسید، اگر به صورت آنتروپی ثابت از  $M = ۴$ ،  $T = -۶۰^\circ\text{F}$  و  $p = ۰/۱ \text{ atm}$  به حالت سکون درآید؟

**حل:** سرعت صوت برای شرایط داده شده از معادله (۱۰-۱۲) محاسبه می شود

$$\begin{aligned} c &= (\gamma g_c RT)^{1/2} = (1.4)(32.2)(53.35)(460 - 60)^{1/2} \\ &= 980.0 \text{ ft/s} = 299 \text{ m/s} \end{aligned}$$

برای  $M = ۴$  سرعت جریان مربوطه برابر است با

$$V = (4)(980.0) = 3923 \text{ ft/s} = 1196 \text{ m/s}$$

با به کار بردن موازنه انرژی برای فرآیند سکون

$$h + \frac{V^2}{2g_c} = h_0$$

$$c_p(T_0 - T) = \frac{V^2}{2g_c} \quad \text{یا}$$

$$T_0 = -60 + \frac{(3923)^2}{(2)(0.24)(32.2)(778)} = -60 + 1279 = 1219^\circ\text{F} = 660^\circ\text{C}$$

فشار سکون نهایی از رابطه آنتروپی ثابت به دست می آید

$$\frac{P_0}{P} = \left( \frac{T_0}{T} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

$$P_0 = (0.1) \left( \frac{1679}{400} \right)^{3.5} = 15.15 \text{ atm} = 2227 \text{ psia}$$

### مثال ۱۰-۲ سرعت صوت

سرعت صوت را در نیتروژن در دمای  $200^\circ\text{C}$  محاسبه کنید.

**حل:** ما از آحاد SI برای این محاسبات استفاده خواهیم کرد. ثابت گاز برابر است با:

$$R = \frac{\mathfrak{R}}{M} = \frac{8315}{28} = 297 \text{ J/kg.K}$$

از جدول ۲-۲ برای نیتروژن  $\gamma = 1.4$  می باشد، بنابراین

$$\begin{aligned} c &= (\gamma g_c RT)^{1/2} \\ &= [(1.4)(1.0 \text{ kgm/N.s}^2)(297 \text{ J/kg.K})(200 + 273)]^{1/2} \\ &= 443.5 \text{ m/s} = 1455 \text{ ft/s} \end{aligned}$$

### ۱۰-۴ جریان دالم یک بعدی آنتروپی ثابت

حالا اجازه دهید چند رابطه مفید برای جریان آنتروپی ثابت یک بعدی کلی در حالت دائم

به دست آوریم. چنین سیستم جریانی تقریب خوبی برای چند مورد کاربردی است: مانند مواقعی که گازی

ایده آل در کانال با دیواره‌ای صاف، شیوره یا پخش‌کن جریان می‌یابد. سرعت صوت و عدد ماخ، در سرتهای زیاد پارامترهای مهمی هستند که چگونگی عکس‌العمل جریان نسبت به تغییرات فشار، سطح مقطع جریان و غیره را نشان خواهد داد. جهت تحلیل مسأله، چهار اطلاع عمومی در دست داریم: رابطه انرژی، معادله پیوستگی جرم، معادله حالت ترمودینامیکی و بالاخره نمایش فرآیند که در این حالت از رابطه سرعت صوت حاصل می‌شود. برای جریان دائم آنتروپی ثابت، معادله انرژی چنین است:

$$h + \frac{V^2}{2g_c} = \text{const.}$$

یا به صورت دیفرانسیلی:

$$dh + \frac{VdV}{g_c} = 0 \quad (10-14)$$

رابطه پیوستگی جرم چنین است:

$$\rho AV = \dot{m} = \text{const.}$$

یا باز هم به صورت دیفرانسیلی

$$AVd\rho + \rho AdV + \rho VdA = 0$$

یا

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} + \frac{dA}{A} = 0 \quad (10-15)$$

رابطه بین خصوصیات ترمودینامیکی برای حالت آنتروپی ثابت چنین است:

$$Tds = dh - vdp = dh - \frac{dp}{\rho} = 0 \quad (10-16)$$

اگر معادله انرژی و این معادله را [معادله (10-14) و (10-16)] ترکیب کنیم به دست می‌آوریم:

$$dh = \frac{dp}{\rho} = \frac{-VdV}{g_c} \quad (10-17)$$



یا

$$\frac{VdV}{g_c} + \frac{1}{\rho} dp = 0 \quad (10-18)$$

معادله (۱۰-۱۸) صورت دیفرانسیلی معادله برنولی می باشد و به ما نشان می دهد که همچنان که سرعت اضافه می شود ( $dV > 0$ ) فشار باید کاهش یابد ( $dp < 0$ ). از نظر فیزیکی این بدین معنی است که نیروی فشار باعث شتاب دادن جریان می شود.

چون جریان آنتروپی ثابت است می توانیم از معادله مان برای سرعت صوت به دست آوریم:

$$\left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s = \frac{dp}{d\rho} = \frac{c^2}{g_c}$$

یا

$$dp = \frac{c^2}{g_c} d\rho \quad (10-19)$$

حالا می توانیم فرم دیفرانسیلی رابطه پیوستگی (۱۰-۱۵) را با رابطه (۱۰-۱۶) و معادله (۱۰-۱۹) ترکیب کنیم تا به دست آید:

$$\frac{dA}{A} = \frac{dp}{\rho V^2/g_c} \left( 1 - \frac{V^2}{c^2} \right) = \frac{dp}{\rho V^2/g_c} (1 - M^2) \quad (10-20)$$

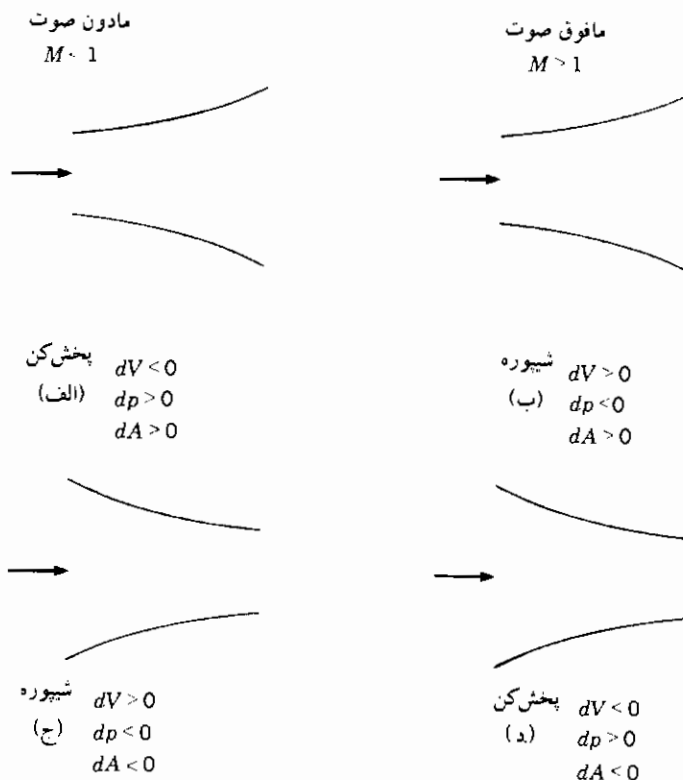
معادله (۱۰-۲۰) اطلاعات بنیادی جهت تعیین شکل کانالی که باید برای جریان آنتروپی ثابت مادون صوت و یا مافوق صوت فرض شود را به دست می دهد. این اشکال در شکل ۱۰-۳ نشان داده شده است. حالت جریان مادون صوتی را در نظر بگیرید که می خواهیم سرعت را افزایش دهیم (شیپوره). از معادله (۱۰-۱۸) برای  $dV > 0$ ،  $dp < 0$  می باشد. بنابراین برای  $M < 1$  و  $dV > 0$  طرف راست معادله (۱۰-۲۰) منفی است و  $dA$  باید منفی باشد، لذا جهت افزایش سرعت مطابق آنچه در شکل ج ۱۰-۳ نشان داده شده باید سطح مقطع جریان را کاهش دهیم. برای  $M > 1$  درست حالت عکس است زیرا طرف راست معادله (۱۰-۲۰) برای  $dV > 0$  مثبت می شود و بنابراین باید سطح مقطع جریان را، جهت ازدیاد سرعت در جریان مافوق صوت، مطابق آنچه در شکل ب ۱۰-۳ نشان داده شده افزایش دهیم. جهت کاهش سرعت (پخش کن) احتیاج به تغییرات معکوس در سطح مقطع جریان مطابق آنچه در شکل

الف ۱۰-۳ و ۱۰-۳ به ترتیب برای  $M < 1$  و  $M > 1$  نشان داده شده می‌باشد.

هنگامی که  $M = 1$  باشد، سطح مقطع جریان کمترین مقدار خود را داراست و می‌گوییم که حالت گلوگاه حاصل می‌شود. بنابراین شیوره‌ای که سیال را از حالت مادون صوت به حالت مافوق صوت شتاب دهد، باید مطابق شکل ۱۰-۴ ابتدا دارای قسمت همگرا و سپس دارای قسمت واگرا باشد. چنین کانال جریانی متناسباً شیوره همگرا-واگرا<sup>۱</sup> نامیده می‌شود و  $M = 1$  در کمترین سطح مقطع جریان یا گلوگاه مشاهده می‌شود.

حالا می‌توانیم تغییر دما را در حالات جریان آنتروپی ثابت بالا، با استفاده از معادله انرژی

بیان کنیم:



شکل ۱۰-۳ شیوره‌ها و بخش‌کنهای مادون صوت و مافوق صوت

$$h_0 - h = c_p(T_0 - T) = \frac{V^2}{2g_c} \quad (۱۰-۲۱)$$

با توجه به این که

$$c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \quad \text{و} \quad c^2 = \gamma g_c RT$$

معادله (۱۰-۲۱) می تواند به صورت زیر نوشته شود

$$\frac{V^2}{c^2} = M^2 = 2g_c \frac{\gamma RT}{(\gamma - 1)(\gamma g_c RT)} \left( \frac{T_0}{T} - 1 \right)$$

با ساده کردن جملات

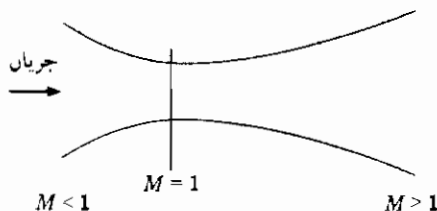
$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \quad (۱۰-۲۲)$$

فشار و چگالی به طریق زیر برای جریان آتروپی ثابت به دست می آیند :

$$\frac{p_0}{p} = \left( \frac{T_0}{T} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} = \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (۱۰-۲۳)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left( \frac{T_0}{T} \right)^{1/(\gamma-1)} = \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{1/(\gamma-1)} \quad (۱۰-۲۴)$$

خواص جریان در گلوگاه با بالانویس ۱ ستاره (\*) مشخص می شوند و مربوط به حالت  $M = 1$  می باشند.



شکل ۱۰-۴ شیپورۀ مافوق صوت همگرا - واگرا

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{\gamma + 1} \quad (۱۰-۲۵)$$

$$\frac{p^*}{p_0} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (۱۰-۲۶)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{1/(\gamma-1)} \quad (۱۰-۲۷)$$

معمولاً خواص گلوگاه را خواص بحرانی می‌نامند. (از حالات بحرانی فصل ۶ تمیز داده شود) و نسبت‌های بالا را نسبت‌های بحرانی می‌گویند. مقادیر این نسبت‌ها برای چندین مقدار  $\gamma$  در جدول ۱۰-۱ مشخص شده است. مقادیر مختلف نسبت‌های دما-فشار و چگالی در جدول ۱۰-۱۹ ضمیمه جدول‌بندی می‌شوند.

برای جریان دائم نرخ جریان جرمی ثابت است و می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود

$$\dot{m} = \rho AV = \frac{P}{RT} VA = \frac{P}{RT} M \sqrt{\gamma g_c RT} A \quad (۱۰-۲۸)$$

با به کار بردن معادله (۱۰-۲۲) برای  $\frac{T_0}{T}$  رابطه بالا به صورت زیر در می‌آید:

جدول ۱۰-۱ نسبت فشار - دما و چگالی بحرانی برای جریان آنتروپی ثابت یک گاز ایده‌آل

$\gamma = 1/67$	$\gamma = 1/4$	$\gamma = 1/3$	$\gamma = 1/2$	
۰/۴۸۶۷	۰/۵۲۸۳	۰/۵۴۵۷	۰/۵۶۴۴	$\frac{p^*}{p_0}$
۰/۷۴۹۱	۰/۸۳۳۳	۰/۸۶۹۶	۰/۹۰۹۱	$\frac{T^*}{T_0}$
۰/۶۴۹۷	۰/۶۳۴۰	۰/۶۲۷۶	۰/۶۲۰۹	$\frac{\rho^*}{\rho_0}$

$$\frac{\dot{m}}{A} = \frac{pM}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{\gamma g_c}{R}} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{1/2} \quad (۱۰-۲۹)$$

با جایگزینی  $p$  بر حسب  $p_0$  از معادله (۱۰-۲۳)، می‌دهد

$$\frac{\dot{m}}{A} = \frac{p_0 M}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{\gamma g_c}{R}} / \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{(\gamma + 1)/2(\gamma - 1)} \quad (10-30)$$

در گلوگاه  $M = 1$  و  $A = A^*$  است بنابراین

$$\frac{\dot{m}}{A^*} = p_0 \sqrt{\frac{\gamma g_c}{RT_0}} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma + 1)/2(\gamma - 1)} \quad (10-31)$$

این نتیجه جالب که کل جریان جرمی در شیوره تنها تابعی از خواص سکون و سطح مقطع گلوگاه می‌باشد ما را به مفهوم جریانهای خفه شده<sup>۱</sup> هدایت می‌کند.

برای مجموعه‌ای از خواص حالت سکون داده شده جریان حداکثری وجود دارد که تنها بستگی به سطح گلوگاه شیوره‌ای که جریان از آن می‌گذرد، دارد. اگر شرط صوتی در گلوگاه برقرار باشد، بی‌توجه به آنکه در پایین دست گلوگاه کسی فشار را کاهش و یا سطح را افزایش دهد، همواره نرخ جریان ثابت است. اگر جریان به قدر کافی شتاب نگرفته و در گلوگاه  $M$  برابر یک نباشد، شرایط جریان خفه شده برقرار نشده و استدلال بالا را نمی‌توان به کار برد.

تغییر سطح مقطع کلی در طول شیوره می‌تواند به وسیله ترکیب معادلات (۱۰-۳۰) و (۱۰-۳۱) محاسبه شود که نتیجه می‌دهد:

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left[ \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right) \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) \right]^{(\gamma + 1)/2(\gamma - 1)} \quad (10-32)$$

همچنین مقادیر  $\frac{A}{A^*}$  در جدول ۱۹-A ضمیمه A داده می‌شوند.

### مثال ۱۰-۳ شیوره همگرا جهت اندازه‌گیری جریان

شیوره جریان صوتی (تنها با قسمت همگرا) گاهی به عنوان دستگاه اندازه‌گیری جریان به کار می‌رود، زیرا برای  $M = 1$  در خروج، نرخ جریان تنها بستگی به فشار و دمای حالت سکون در بالا دست جریان دارد. حداکثر نرخ جریان هوا برای چنین دستگاهی با سطح مقطع خروجی به قطر ۵ cm / ۰ و خواص سکون ۷۰۰ kPa و ۵۰۰ K چقدر است؟

**حل:** برای این محاسبه می‌توانیم از معادله (۱۰-۳۱) جهت برآورد شدت جریان استفاده کنیم

$$A^* = \frac{\pi(0.005)^2}{4} = 1.963 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$p_0 = 700 \text{ kPa} \quad T_0 = 500 \text{ K}$$

سپس با جایگزینی در معادله (۱۰-۳۱)

$$\begin{aligned} \dot{m} &= (1.963 \times 10^{-5})(700 \times 10^3) \left[ \frac{(1.4)(1.0)}{(287)(500)} \right]^{1/2} \\ &\times \left( \frac{2}{1.4 + 1} \right)^{(1.4+1)/(2)(1.4-1)} = 0.0248 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

#### مثال ۱۰-۴ شیپوره همگرا-واگرا

شیپوره کوچک همگرا-واگرایی با سطح مقطع خروجی  $4 \text{ cm}^2$  باید برای تولید یک جریان خروجی هوا در فشار اتمسفر و  $M = 2/5$  طراحی شود. دمای حالت سکون در بالادست جریان  $125^\circ\text{C}$  می‌باشد. (الف) فشار حالت سکون (ب) دمای خروجی (ج) سطح مقطع گلوگاه و (د) نرخ جریان جرمی را محاسبه کنید.

**حل:** برای این محاسبه می‌توانستیم از معادلات به‌دست آمده استفاده کنیم. اما ساده‌تر این است که جداول ضمیمه را برای  $\gamma = 1/4$  به‌کار ببریم. با مشخص کردن زیرنویس  $e$  برای شرایط خروجی، اطلاعات داده شده زیر را داریم

$$A_e = 4.0 \text{ cm}^2 \quad M_e = 2.5 \quad T_0 = 125^\circ\text{C} = 398 \text{ K} \quad p_e = 1 \text{ atm}$$

با مراجعه به جدول A-۱۹ برای  $M = 2/5$  پیدا می‌کنیم

$$\frac{A_e}{A^*} = 2.6367 \quad \frac{p_e}{p^*} = 0.05853 \quad \frac{T_e}{T_0} = 0.44444$$

بنابراین فشار حالت سکون برابر است با:

$$p_0 = \frac{1}{0.05853} = 17.09 \text{ atm} = 1.73 \text{ MPa} \quad (251 \text{ psia})$$

و دمای خروجی برابر است با

$$T_e = (398)(0.44444) = 176 \text{ K} = -96^\circ\text{C} \quad (-141^\circ\text{F})$$

سطح مقطع گلوگاه برابر است با

$$A^* = \frac{4.0}{2.637} = 1.517 \text{ cm}^2$$

چندین رابطه جهت محاسبه نرخ جریان جرمی در اختیار می باشد. می توانیم از معادله (۱۰-۲۹) با به کار بردن شرایط خروجی استفاده کنیم. چون ما با واحدهای SI کار می کنیم

$$g_c = 1.0 \text{ kg.m/N.s}^2$$

برای هوا

$$R = \frac{\mathfrak{R}}{28.97} = \frac{8315}{28.97} = 287 \text{ J/kg K}$$

با جایگزینی در معادله (۱۰-۲۹)

$$\begin{aligned} m &= \frac{(4.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2)(1.0132 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(2.5)}{(398)^{1/2}} \\ &\times \left[ \frac{(1.4)(1.0 \text{ kg.m/N.s}^2)}{287 \text{ J/kg.K}} \right]^{1/2} \left[ 1 + \frac{(1.4 - 1)(2.5)^2}{2} \right]^{1/2} \\ &= 0.532 \text{ kg/s} \quad (1.171 \text{ lbm/s}) \end{aligned}$$

اگر معادله (۱۰-۳۱) را برای شرایط گلوگاه به کار برده بودیم، جواب یکسانی بدست می آمد.

## مثال ۱۰-۵

سطح مقطع جریان، دما، فشار و سرعت در مقطعی که  $M = 1/5$  باشد، برای شیوره مثال

۱۰-۴، چقدر خواهد بود؟

**حاصل:** این محاسبه خیلی ساده است زیرا سطح مقطع گلوگاه و خواص حالت سکون را به دست آورده‌ایم. به آسانی با مراجعه به جدول A-۱۹ در  $M = ۱/۵$  می‌خوانیم،

$$\frac{A}{A^*} = 1.1762 \quad \frac{p}{p_0} = 0.2724 \quad \frac{T}{T_0} = 0.68965$$

بنابراین،

$$A = (1.1762)(1.517) = 1.784 \text{ cm}^2$$

$$p = (0.2754)(17.09) = 4.724 \text{ atm}$$

$$T = (0.68965)(398) = 274 \text{ K} = 1^\circ \text{C}$$

برای محاسبه سرعت جریان باید ابتدا سرعت صوت در این محل را با به کار بردن معادله (۱۰-۱۲) حساب کنیم

$$c = (\gamma g_c RT)^{1/2} = [(1.4)(1.0)(287)(274)]^{1/2} = 331.8 \text{ m/s}$$

بنابراین برای  $M = ۱/۵$  سرعت جریان برابر است با:

$$V = (1.5)(331.8) = 498 \text{ m/s} = 1517 \text{ ft/s}$$

## ۱۰-۵ معادله ممنتوم برای یک حجم کنترل

چون بحث ما بیشتر درباره فرآیندهای جریانی مربوط به حجم کنترل (سیستمهای باز) خواهد بود، لذا بجاست که اصل ممنتوم نیوتنی به صورتی ارائه شود که بسادگی برای روش تحلیل حجم کنترل به کار گرفته شود. ممنتوم یک کمیت برداری است و در تحلیل کلی و صحیح آن باید سه بعدی انجام گیرد. اما چون در این فصل با جریان یک بعدی سروکار داریم می‌توانیم روشمان را تنها با تحلیل مؤلفه  $x$  ممنتوم، ساده کنیم.

قانون دوم حرکت نیوتن بیان می‌کند که نیروی عمل کننده بر یک جسم متناسب با تغییر ممنتوم آن است. برای جهت  $x$ :

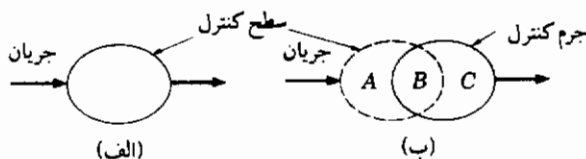


$$F_x \sim \frac{d(mV_x)}{d\tau}$$

یا با ضریب تناسب

$$F_x = \frac{1}{g_c} \frac{d(mV_x)}{d\tau} \quad (۱۰-۳۳)$$

معادله (۱۰-۳۳) برای جرم ثابتی به کار می رود. حالا حجم کنترل نسبتاً کلی تر شکل ۱۰-۵ را در نظر بگیرید. در شکل (الف) حجم در زمان  $\tau$  مشخص می شود و حرکت جریان به داخل و خارج از سطح کنترل، ناحیه حجم کنترل را معرفی می کند. داخل حجم کنترل مقدار معینی سیال با سرعت و ممتوم معین وجود دارد. حالا به موقعیت (شکل ب ۱۰-۵) در زمان  $\tau + \Delta\tau$  توجه کنید. سطح کنترل با خط چین مشخص می شود و در همان موقعیت فضایی قبلی قرار دارد، اما جرمی که کاملاً به وسیله سطح کنترل محصور می شد، حالا مقداری از حجم کنترل خارج شده است. ما از این مقدار جرم به عنوان جرم کنترل<sup>۱</sup> یاد خواهیم کرد. حالا معادله (۱۰-۳۳) را برای این جرم کنترل تنها با استفاده از نیروها و ممتومها در جهت  $x$  به کار می بریم. با بیان مشتق به صورت حدی



شکل ۱۰-۵ حجم کنترل برای تحلیل ممتومی (الف) در زمان  $\tau$

و (ب) در زمان  $\tau + \Delta\tau$

$$\sum F_x = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{1}{g_c} \frac{(mV_x)_{\tau+\Delta\tau} - (mV_x)_{\tau}}{\Delta\tau} \quad (۱۰-۳۴)$$

در لحظه  $\tau + \Delta\tau$  ممتوم جرم کنترل می تواند بر حسب ممتوم نواحی A، B و C به صورت زیر بیان شود

$$(mV_x)_{\tau+\Delta\tau} = (mV_x)_B + (mV_x)_C \quad (۱۰-۳۵)$$

با مشخص کردن حجم کنترل با زیر نویس  $\sigma$

$$(mV_x)_{A+B} = (mV_x)_\sigma = (mV_x)_A + (mV_x)_B \quad (۱۰-۳۶)$$

باحل کردن معادله (۱۰-۳۶) برای  $(mV_x)_B$  در زمان  $\tau + \Delta\tau$  و جایگزین کردن آن در (۱۰-۳۵) می‌دهد

$$(mV_x)_{\tau+\Delta\tau} = (mV_x)_C - (mV_x)_A + (mV_x)_{\sigma,\tau+\Delta\tau} \quad (۱۰-۳۷)$$

در لحظه  $\tau$  جرم کنترل به طور کامل در حجم کنترل قرار دارد، بنابراین

$$(mV_x)_\tau = (mV_x)_{\sigma,\tau}$$

با جایگزینی روابط متعدد قبلی در معادله (۱۰-۳۴) می‌دهد

$$\sum F_x = \frac{1}{g_c} \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \left[ \frac{(mV_x)_C}{\Delta\tau} - \frac{(mV_x)_A}{\Delta\tau} + \frac{(mV_x)_{\sigma,\tau+\Delta\tau} - (mV_x)_{\sigma,\tau}}{\Delta\tau} \right]$$

چنان که  $\Delta\tau \rightarrow 0$  میل کند  $m_A$  و  $m_C$  به سمت  $\delta m_A$  و  $\delta m_C$  میل می‌کند و نسبت  $\frac{\delta m_C}{\delta\tau}$  و  $\frac{\delta m_A}{\delta\tau}$  به صورت نرخهای جریان جرمی ورودی و خروجی از حجم کنترل در می‌آیند. جمله سوم در این حد به صورت نرخ انباشت ممتوم در حجم کنترل در می‌آید و رابطه کلی به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\sum F_x = \frac{1}{g_c} \left[ (\dot{m}V_x)_e - (\dot{m}V_x)_i + \frac{d(mV_x)_\sigma}{d\tau} \right] \quad (۱۰-۳۸)$$

زیرنویسهای  $i$  و  $e$  به ترتیب برای مشخص کردن جریانهای ورودی و خروجی به کار رفته است. جمله  $\dot{m}V$  شار ممتوم<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. شبیه (۱۰-۳۸) برای جهات  $y$  و  $z$  نیز می‌توان معادلات مشابه نوشت. معادله (۱۰-۳۸) می‌تواند به صورت عبارت زیر بیان شود.

$$\begin{array}{ccccccc} \text{نرخ انباشت ممتوم} & + & \text{شار ممتوم} & - & \text{شار ممتوم} & = & \text{جمع نیروهای عمل کننده} \\ \text{در حجم کنترل} & & \text{ورودی} & & \text{خروجی} & & \text{بر حجم کنترل} \end{array}$$

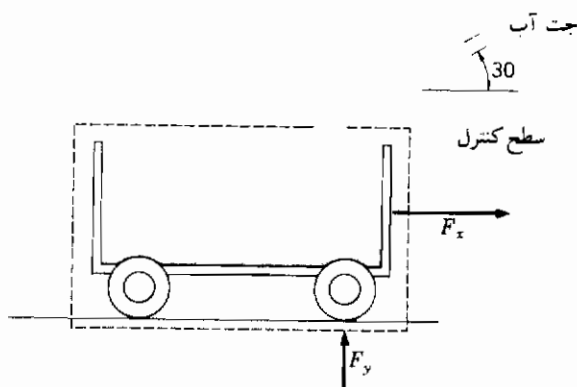
در حالت دائم، انباشتی در حجم کنترل موجود نخواهد بود و تنها با یک جریان ورودی و

خروجی از حجم کنترل معادلات زیر را برای سه مؤلفه نیرو به دست می‌آوریم:

$$\begin{aligned}\sum F_x &= \frac{\dot{m}}{g_c} (V_{e_x} - V_{i_x}) \\ \sum F_y &= \frac{\dot{m}}{g_c} (V_{e_y} - V_{i_y}) \\ \sum F_z &= \frac{\dot{m}}{g_c} (V_{e_z} - V_{i_z})\end{aligned}\quad (۱۰-۳۹)$$

### مثال ۱۰-۶ نیرو و شار ممنتوم

مخزن بزرگی مطابق شکل نشان داده شده بر روی چرخهایی قرار دارد و فواره‌ای آب را با نرخ  $8 \text{ kg/s}$  و سرعت  $30 \text{ m/s}$  به داخل مخزن تخلیه می‌کند. محاسبه کنید نیروی  $F_x$  لازم را (الف) تا مخزن ثابت باقی بماند (ب) تا اجازه دهد که مخزن با سرعت  $1 \text{ m/s}$  به طرف چپ حرکت کند.



شکل مثال ۱۰-۶

**حل:** این یک مسأله حالت غیر دائم است زیرا جرم و در نتیجه ممنتوم، در مخزن با زمان انباشت می‌شود. سطح کنترل نشان داده شده با خط چین را طوری انتخاب می‌کنیم که مخزن را همواره در برگیرد. معادله ممنتوم در جهت  $x$  برابر است با

$$\sum F_x = \frac{1}{g_c} \left[ (\dot{m}V_x)_e - (\dot{m}V_x)_i + \frac{d(mV_x)_c}{d\tau} \right] \quad (a)$$

تنها یک جریان ورودی داریم، بنابراین  $(mV_x)_e = 0$  است و با انتخاب جهت طرف راست به عنوان جهت مثبت می‌دهد

$$(\dot{m}V_x)_i = (8 \text{ kg/s})(-30 \cos 30^\circ \text{ m/s}) = -207.8 \text{ kg.m/s}^2$$

برای قسمت (الف) مسأله، مخزن ساکن است یعنی  $V_x \sigma = 0$ ، بنابراین انباشت ممتوم وجود ندارد، اگرچه انباشت جرم موجود است. در این حالت معادله (a) به صورت زیر در می‌آید.

$$F_x = \frac{1}{1.0 \text{ kg.m/N.s}^2} [0 - (-207.8 \text{ kg.m/s}^2) + 0] = +207.8 \text{ N}$$

علامت مثبت مشخص می‌کند که این نیرو به طرف راست می‌باشد، زیرا این جهت مثبت برای دستگاه مختصات بوده در حالت (b) مخزن به طرف چپ حرکت می‌کند و نرخ ازدیاد ممتوم در حجم کنترل برابر است با:

$$\frac{d(mV_x)_\sigma}{d\tau} = (8 \text{ kg/s})(-1 \text{ m/s}) = -8 \text{ kg.m/s}^2 \quad (b)$$

۱ m/s سرعت آب در داخل حجم کنترل می‌باشد. بنابراین مقدار نیرو برای حالت (ب) برابر است با

$$F_x = \frac{1}{1.0} [0 - (-207.8) + (-8)] = 199.8 \text{ N}$$

## ۱۰-۶ امواج ضربه‌ای در یک گاز ایده آل

تا به حال دیده‌ایم که اغتشاش جزئی فشار با سرعت صوت در یک سیال منتشر می‌شود. می‌توانستیم بگوییم که این سرعت جابه‌جایی موج بی‌نهایت کوچکی در سیال می‌باشد. موقعی که با امواج قوی‌تری روبرو شویم، به‌طوری که تغییرات سریع و تندی در خواص سیال در ناحیه خیلی کوچکی از جریان وجود داشته باشد، می‌گوییم که یک موج ضربه‌ای تولید شده است و حالا می‌خواهیم شرایط غالب در هنگام وجود چنین امواجی را تحلیل کنیم. بحثمان را به امواج ضربه‌ای قائم یا امواجی که بر سرعت جریان عمود می‌باشند محدود خواهیم کرد.

کانال جریان یک بعدی در شکل ۱۰-۶ را در نظر بگیرید. فرض می‌کنیم که جریان

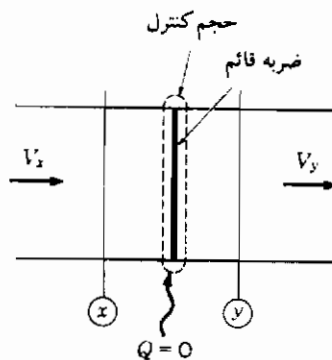
آدیاباتیک است و حجم کنترل محصور شده با خط چین را، که شامل موج ضربه ای ساکن در کانال می باشد، در نظر می گیریم. خواص جریان بالا دست ضربه با زیر نویس  $x$  مشخص می شود، و زیر نویس  $y$ ، برای مشخص کردن خواص پایین دست جریان به کار می رود. حرارت یا کاری اضافه نمی شود، بنابراین معادله انرژی جریان دائم برابر است با:

$$h_{0x} = h_x + \frac{V_x^2}{2g_c} = h_y + \frac{V_y^2}{2g_c} = h_{0y} \quad (۱۰-۴۰)$$

از رابطه پیوستگی جرم می توان نوشت:

$$\frac{\dot{m}}{A} = \rho_x V_x = \rho_y V_y \quad (۱۰-۴۱)$$

و معادله مستوم برای حجم کنترل، با معادل قرار دادن نیروی مؤثر فشار و افزایش شار مستوم



شکل ۱۰-۶ جریان در عرض یک موج ضربه ای قائم

از بیان حجم کنترل به دست می آید:

$$A(p_x - p_y) = \frac{\dot{m}}{g_c} (V_y - V_x) \quad (۱۰-۴۲)$$

فرض کرده ایم که فرآیند آدیاباتیک باشد، اما هیچ اطمینانی وجود ندارد که برگشت پذیر هم باشد. بنابراین قانون دوم ترمودینامیک می گوید که



۳ - پایین نقطه  $a$  یا  $b$  در هر یک، جریان مافوق صوت می‌باشد  $M > 1$ .

این ملاحظات در شکل ۷-۱۰ نشان داده شده است، و نتیجه نهایی این است که اگر موج ضربه‌ای قائمی وجود داشته باشد، جریان باید از شرایط مافوق صوت به مادون صوت در عرض ضربه تغییر کند. در حد، اگر  $V_x$  درست معادل سرعت صوت باشد ( $M = 1$ ) موج ضربه‌ای بینهایت کوچک، یا موج صوتی که قبلاً درباره آن بحث شد ایجاد می‌شود. شدت ضربه معمولاً بر حسب مقدار تغییر عدد ماخ در عرض آن اندازه گرفته می‌شود. فرض جریان آدیاباتیک، مشخص می‌کند که انتالپی سکون در عرض ضربه ثابت باقی می‌ماند و برای گاز ایده آل با گرماهای ویژه ثابت این، یعنی

$$T_{0x} = T_{0y} \quad (۱۰-۴۴)$$

یا دمای سکون علی رغم شدت ضربه ثابت باقی می‌ماند.

اگرچه در این تحلیل فرض کرده‌ایم که تغییر ناگهانی یا تقریباً پله‌ای در خواص سیال در عرض ضربه موجود می‌باشد، اما می‌دانیم که همیشه باید فاصله معینی جهت مبادله انرژی و منتوم بین ملکولهای گاز موجود باشد. این فاصله پویش آزاد<sup>۱</sup> ملکولها نامیده می‌شود. در فشار معمولی جو، پویش آزاد خیلی کوچک است ( $\sim 10^{-7}$  m) و امواج ضربه‌ای در این فشارها، برآستی خیلی باریک است. در فشارهای خیلی پایین‌تر مانند فشار در ارتفاع خیلی بالا، پویش آزاد خیلی بزرگتر است و امواج ضربه‌ای که در این شرایط اتفاق می‌افتد دارای ضخامت قابل ملاحظه‌ای است. برای تحلیل در این جا فرض می‌کنیم که فشارها همیشه به اندازه کافی بالا باشد که بتوان امواج ضربه‌ای را خیلی باریک فرض کرد. از معادله (۱۰-۲۲) داریم:

$$\frac{T_{0x}}{T_x} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_x^2$$

$$\frac{T_{0y}}{T_y} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_y^2$$

با تقسیم این معادلات داریم:

$$\frac{T_y}{T_x} = \frac{1 + [(\gamma - 1)/2] M_x^2}{1 + [(\gamma - 1)/2] M_y^2} \quad (۱۰-۴۵)$$

با به کار بردن رابطه پیوستگی معادله (۱۰-۴۱) همراه با

$$\rho_x = \frac{p_x}{RT_x} \quad \text{و} \quad \rho_y = \frac{p_y}{RT_y}$$

نتیجه می گیریم

$$\frac{T_y}{T_x} = \frac{p_y V_y}{p_x V_x} \quad (۱۰-۴۶)$$

اما  $V = cM$  و  $c = \sqrt{\gamma g_c RT}$ ، یعنی معادله (۱۰-۴۶) را می توان به صورت زیر نوشت :

$$\frac{T_y}{T_x} = \frac{p_y M_y \sqrt{T_y}}{p_x M_x \sqrt{T_x}} = \left( \frac{p_y}{p_x} \right)^2 \left( \frac{M_y}{M_x} \right)^2$$

حالا معادلات (۱۰-۴۵) و (۱۰-۴۶) را می توان ترکیب کرد تا نسبت فشار را در عرض ضربه بدهد

$$\frac{p_y}{p_x} = \frac{M_x \sqrt{1 + [(\gamma - 1)/2] M_x^2}}{M_y \sqrt{1 + [(\gamma - 1)/2] M_y^2}} \quad (۱۰-۴۸)$$

چون معادله (۱۰-۴۸) از ترکیب معادلات انرژی و پیوستگی حاصل می شود لذا معرف خط فانو بر حسب فشار و عدد ماخ می باشد. یک رابطه مشابه را جهت خط رایلی با همین متغیرها می توان از ترکیب معادلات منتوم و پیوستگی به دست آورد. داریم :

$$p_x - p_y = \frac{\dot{m}}{Ag_c} (V_y - V_x)$$

اما  $\dot{m} = \rho_x A V_x = \rho_y A V_y$  می باشد، بنابراین :

$$p_x - p_y = \frac{\rho_y V_y^2 - \rho_x V_x^2}{g_c}$$

با معرفی  $V = cM$  و  $\rho = \frac{p}{RT}$  و  $c = \sqrt{\gamma g_c RT}$  به دست می آوریم :

$$p_x g_c + \frac{p_x M_x^2}{RT_x} (\gamma g_c RT_x) = p_y g_c + \frac{p_y M_y^2}{RT_y} (\gamma g_c RT_y)$$

با جمع کردن جملات داریم :



$$\frac{p_y}{p_x} = \frac{1 + \gamma M_x^2}{1 + \gamma M_y^2} \quad (۱۰-۴۹)$$

ترکیب معادلات (۱۰-۴۸) و (۱۰-۴۹) تلاقی خطوط فانو و رایلی را معرفی می کند و نتیجه می دهد

$$M_y^2 = \frac{M_x^2 + [2/(\gamma - 1)]}{[2\gamma/(\gamma - 1)] M_x^2 - 1} \quad (۱۰-۵۰)$$

با معلوم بودن عدد ماخ بالا دست جریان  $M_x$ ، مقداری برای عدد ماخ پایین دست جریان  $M_y$  معلوم می شود. جدول A-۲۰ جدول بندی مناسبی از خواص سیال در عرض موج ضربه ای قائم می باشد، اگر از عدد ماخ بالا دست جریان به عنوان متغیر اصلی استفاده شود. تا به حال مشخص کرده ایم که دمای حالت سکون در عرض موج ضربه ای به علت جریان آدیاباتیک ثابت باقی می ماند. لکن فشار حالت سکون به علت افزایش آنتروپی در عرض ضربه همواره کاهش می یابد. این مطلب را بسادگی می توان با نوشتن رابطه تغییر آنتروپی بین حالات سکون آنتروپی ثابت، قبل و بعد از ضربه، مشاهده کرد.

$$s_{0y} - s_{0x} = c_p \ln \frac{T_{0y}}{T_{0x}} - R \ln \frac{p_{0y}}{p_{0x}} \geq 0$$

چون  $T_{0y} = T_{0x}$  است، واضح است که  $p_{0y}$  باید همیشه کمتر از  $p_{0x}$  باشد تا افزایش آنتروپی را ایجاد نماید. از جدول A-۲۰ نیز متوجه می شویم که مقادیر  $\frac{p_{0y}}{p_{0x}}$  همیشه کمتر از یک است.

## ۱۰-۷ امواج ضربه ای در گذرگاههای همگرا-واگرا

پیش از این درباره جریان آنتروپی ثابت در گذرگاه همگرا-واگرا بحث کرده ایم، و خاطر نشان کرده ایم که جریان های متنوعی می تواند، بسته به شکل خاص سطح مقطع جریان و خواص سکون در دسترس، برقرار باشد. اما بحث قبلی تنها جریان آنتروپی ثابت ایده آل را در نظر داشت. تحت ترکیبات مناسب از پس فشار<sup>۱</sup> و طراحی شیوره، امکان ایجاد پدیده های موج ضربه ای در گذرگاه وجود دارد که حالا می خواهیم درباره این پدیده ها بحث کنیم.

شیوره همگرا-واگرا را در شکل ۸-۱۰ در نظر بگیرید که به محفظه ساکن تأمین کننده فشار  $p_0$  و تخلیه به محفظه دیگری که با فشار  $p_b$  مشخص می شود و ما آن را پس فشار می نامیم متصل است.

فرض می‌کنیم که فشار حالت سکون به اندازه کافی بالا باشد تا شرایط جریان صوتی در گلوگاه و جریان مافوق صوت در قسمت واگرای پایین دست جریان ایجاد گردد. حالا اثر تغییرات پس فشار را بر روی جریان شیپوره بررسی می‌کنیم.

مادامی که پس فشار معادل یا کمتر از فشار خروجی مربوط به سطح مقطع خروجی باقی بماند، تأثیری بر جریان داخل شیپوره ندارد. هرچند ممکن است امواج انبساط پیچیده‌ای در پایین دست جریان خروجی برای فشار  $p_e < p_b$  مطابق آنچه در محل ۱ نشان داده شده است وجود داشته باشد. همچنان که پس فشار از  $p_e$  بیشتر می‌شود، تدریجاً امواج ضربه‌ای "مایل" قوی‌تری در پایین دست جریان خروجی مطابق آنچه در محل ۳ و ۴ شکل ۸-۱۰ نشان داده شده است، تشکیل می‌گردد. هنوز هم جریان در داخل شیپوره تحت تأثیر قرار نگرفته است. محل ۵ موقعیتی را نشان می‌دهد که پس فشار به اندازه کافی بزرگ است تا موج ضربه‌ای قائمی را در خروج به وجود آورد، یعنی  $\frac{p_e}{p_b}$  در محل مربوط به مقدار آن برای ضربه قائمی با عدد ماخ بالا دست جریان  $M_e$  می‌گردد. افزایش بیشتر پس فشار باعث عقب‌راندن ضربه قائم به داخل شیپوره می‌شود. پایین دست ضربه جریان مادون صوت است بنابراین قسمت همگرا باعث کاهش سرعت جریان و افزایش فشار مطابق آنچه در محل ۶ نشان داده شده است خواهد شد. سرانجام افزایش پس فشار می‌تواند باعث عقب‌راندن ضربه در تمام طول مسیر گلوگاه بشود (در گلوگاه ضربه محو خواهد شد) و جریان در قسمت همگرا کاملاً به صورت مادون صوت در می‌آید. افزایش بیشتر پس فشار باعث ایجاد جریان مادون صوتی در تمام شیپوره و کاهش تدریجی نرخ جریان جرمی می‌شود. مثالهای زیر روشهای محاسبه برای پدیده‌های شیپوره - ضربه را نشان می‌دهد.

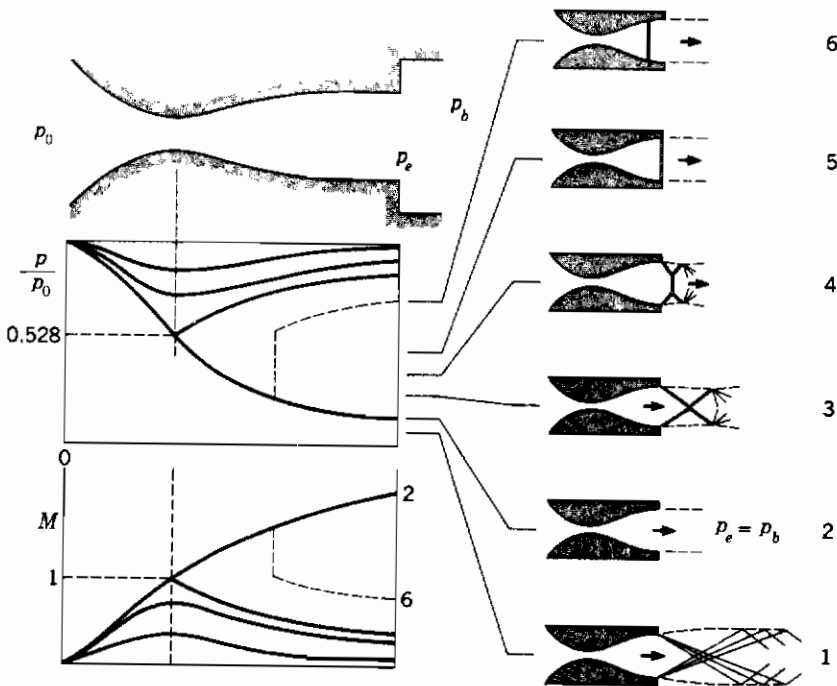
### مثال ۷-۱۰ ضربه در خروج شیپوره

پس فشار تا چه مقداری باید افزایش یابد تا موج ضربه‌ای قائمی درست در قسمت خروجی شیپوره مثال ۴-۱۰ به وجود آید؟

**حل:** این محاسبه بسادگی با استفاده از روابط ضربه قائم در جدول ۲۰-A-ضمیمه A قابل اجراست.

فشار در آن نقطه همچنان که در مثال ۱۰-۴ داده شده است ۱ atm می‌باشد. با مراجعه به جدول A-۲۰ در  $M_x = ۲/۵$ ، پیدا می‌کنیم:

$$M_y = 0.51299 \quad \frac{p_y}{p_x} = 7.125 \quad \frac{p_{0y}}{p_x} = 8.5262$$



شکل ۱۰-۸ تأثیر پس فشار بر جریان در یک شیپوره مافوق صوت

بنابراین فشار جریان درست در پایین دست ضربه برابر است با

$$p_y = (7.125)(1.0) = 7.125 \text{ atm}$$

پس فشار در محفظه تخلیه مانند شکل ۱۰-۸ برابر با فشار حالت سکون در پایین دست ضربه می‌باشد که برابر است با

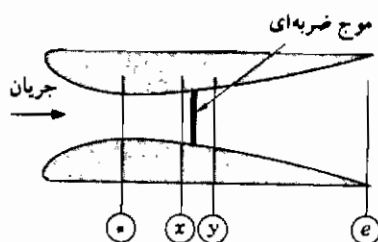
$$p_{0y} = (8.5262)(1.0) = 8.5262$$

## مثال ۸-۱۰ ضربه در قسمت پخش‌کن

فرض کنید که پس فشار در شیوره مثال ۴-۱۰، تا تشکیل موج ضربه‌ای قائمی در قسمت پخش‌کن در جایی که  $M_x = 1/5$  است، افزایش می‌یافت. چه پس فشاری جهت انجام این کار لازم می‌بود و دما و سرعت خروجی حاصله چقدر بود؟

حسل: این مسأله مشکلتر است زیرا سرعت جریان تا سرعت مادون صوت در پایین دست ضربه کاهش خواهد یافت و سپس به علت افزایش سطح مقطع، سرعت بیشتر کاهش خواهد یافت. طرحواره زیر شرح علائم به کار رفته در محاسبات را مشخص می‌کند. از نتایج مثالهای ۴-۱۰ و ۵-۱۰ می‌توانیم استفاده کنیم تا به دست آید:

$$A^* = 1.517 \text{ cm}^2 \quad A_x = A_y = 1.784 \text{ cm}^2 \quad p_x = 4.724 \text{ atm}$$



شکل مثال ۸-۱۰

$$T_x = 274 \text{ K} \quad M_x = 1.5 \quad A_e = 4.0 \text{ cm}^2 \quad T_{0x} = T_{0y} = 398 \text{ K}$$

با مراجعه به جدول A-۲۰ در ضمیمه برای  $M_x = 1/5$  پیدا می‌کنیم

$$M_y = 0.70199 \quad \frac{p_y}{p_x} = 2.4583 \quad \frac{T_y}{T_x} = 1.3202 \quad \frac{p_{0y}}{p_{0x}} = 3.4133$$

پس فشار در محفظه تخلیه برابر  $p_{0y}$  است، بنابراین

$$p_{0y} = (3.4133)(4.724) = 16.12 \text{ atm}$$

برای محاسبه دما و سرعت جریان خروجی می‌دانیم که جریان همچنان که از  $y$  به  $e$  حرکت می‌کند آنتروپی ثابت می‌باشد، بنابراین می‌توانیم از جدول A-۱۹ استفاده کنیم. لکن سطح مؤثر گلوگاه برای جریان پایین دست ضربه‌برابر با مقدار محاسبه شده قبلی نیست، یعنی برابر  $1/517 \text{ cm}^2$  نمی‌باشد زیرا جریان پایین دست ضربه‌شبه جریان آنتروپی ثابت بالادست ضربه‌نیست. البته این امر از افزایش آنتروپی در عرض ضربه‌ناشی می‌شود.

سطح مؤثر در ناحیه پایین دست ضربه را با  $A^{*'}$  مشخص کرده مقدار آن را با مراجعه به جدول A-۱۹ در  $M = 0.70199$  تعیین می‌کنیم، سپس

$$\frac{A_y}{A^{*'}} = 1.09325$$

$$A^{*'} = \frac{1.784}{1.09325} = 1.632 \text{ cm}^2 \quad \text{که}$$

سطح مقطع خروجی واقعی برابر  $4 \text{ cm}^2$  می‌باشد، بنابراین

$$\frac{A_e}{A^{*'}} = \frac{4.0}{1.632} = 2.451$$

حالا می‌توانیم شرایط خروجی جریان را با مراجعه به جدول A-۱۹ برای مقدار  $2/451$   $\frac{A_e}{A^{*'}}$  جهت جریان مادون صوت تعیین کنیم. با استفاده از میان‌یابی، نتایج عبارت است از:

$$\frac{T_e}{T_0} = 0.98670$$

$$M_e = 0.255$$

بنابراین دمای خروجی برابر است با:

$$T_e = (0.98670)(398) = 393 \text{ K} = 120^\circ\text{C}$$

سرعت صوت در مقطع خروجی از معادله (۱۰-۱۲) محاسبه می‌شود

$$c_e = [(1.4)(1.0)(287)(393)]^{1/2} = 397 \text{ m/s}$$

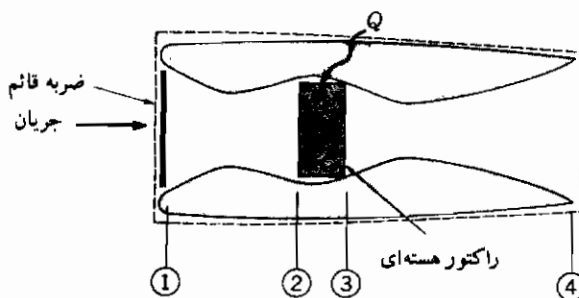
بنابراین سرعت جریان واقعی برابر است با:

$$V_e = c_e M_e = (397)(0.255) = 101.2 \text{ m/s} = 308.6 \text{ ft/s}$$

باید خاطر نشان کنیم که نرخ جریان جرمی در شیوره به علت حضور ضربه تغییر نمی‌کند، زیرا هنوز شرایط صوتی در گلوگاه وجود دارد و هنوز ما دارای شرایط به اصطلاح خفه شده جریان می‌باشیم.

### مثال ۹-۱۰ راجعت هسته‌ای

یک راجعت هسته‌ای را می‌توان به صورت طرحواره پیوست تصور کرد. جریان ورودی در  $M = 4$  و  $T = -50^\circ\text{C}$  و فشار  $0.05 \text{ atm}$  می‌باشد. ضربه قائمی در مقطع ورودی تشکیل می‌گردد و جریان تا  $M = 0.7$  در مقطع ۲ شتاب داده می‌شود، در جایی که به آن حرارت در فشار و سرعت ثابت، به وسیله راکتور هسته‌ای داده می‌شود تا دما به  $1200^\circ\text{C}$  در نقطه ۳ برسد. جریان سپس تا فشار  $0.05 \text{ atm}$  در مقطع خروجی منبسط می‌گردد. حرارت انتقال یافته و نیروی پیش‌برنده تولید شده را برای سطح مقطع ورودی  $1 \text{ m}^2$  محاسبه کنید.



شکل مثال ۹-۱۰

**حل:** برای محاسبه نیروی پیش‌برنده راجعت باید قادر باشیم که علاوه بر شارهای منتوم در ورود و

خروج، نیروهای حاصله از فشار در آن نقاط را نیز محاسبه کنیم. به طوری که خواهیم دید، نیروهای حاصله از منتوم بزرگترین سهم را در نیروی پیش برنده کلی داراست. با به کار بردن زیرنویسهای  $x$  و  $y$  جهت مشخص کردن شرایط بالادست و پایین دست ضربه و با استفاده از جدول A-۲۰ داریم:

$$M_x = 4.0 \quad M_y = 0.43496 \quad \frac{P_{0y}}{P_x} = 21.068$$

$$\frac{T_y}{T_x} = 4.0469 \quad T_x = -50^\circ\text{C} = 223 \text{ K} \quad p_x = 0.05 \text{ atm}$$

با به کار بردن جدول A-۱۹ در  $M = ۴$ ،

$$\frac{T_x}{T_0} = 0.23810 \quad (a)$$

$$T_{0x} = T_{0y} = \frac{223}{0.23810} = 937 \text{ K} = 664^\circ\text{C} = T_{02} \quad \text{و}$$

$$p_{0y} = p_{02} = p_{03} = p_{04} = (21.068)(0.05) = 1.0534 \text{ atm} \quad \text{همچنین}$$

با به کار بردن مجدد جدول A-۱۹ برای  $M_2 = ۰.۷$  به دست می آید:

$$\frac{A_2}{A_2^*} = 1.09437 \quad \frac{p_2}{p_{02}} = 0.72092 \quad \frac{T_2}{T_{02}} = 0.91075$$

در جایی که

$$T_2 = (0.91075)(937) = 853 \text{ K} = 580^\circ\text{C} \quad (b)$$

اطلاعات زیر داده شده است

$$p_3 = p_2 \quad T_3 = 1200^\circ\text{C} = 1473 \text{ K} \quad V_2 = V_3$$

چون سرعتها مساوی است:

$$T_3 - T_2 = T_{03} - T_{02} \quad (c)$$

$$T_{03} = 937 + (1200 - 580) = 1557 \text{ K} = 1284^\circ\text{C} = T_{04} \quad \text{یا}$$

$$\frac{T_3}{T_{03}} = \frac{1473}{1557} = 0.94605 \quad \text{و (d)}$$

حالا ما دارای جریان آنتروپی ثابت جدیدی از نقطه ۳، به نقطه ۴ می‌باشیم که آن را با استفاده از رابطه (d) و جدول A-۱۹ محاسبه می‌کنیم. با مراجعه به جدول برای مقدار داده شده در (d) به دست می‌آوریم

$$M_3 = 0.5324 \quad \frac{P_3}{P_{03}} = 0.8239$$

داریم:

$$p_2 = p_3 = (1.0534)(0.72092) = 0.75942 \text{ atm} \quad \text{(e)}$$

$$p_{03} = \frac{0.75942}{0.92390} = 0.92173 \text{ atm} = p_{04} \quad \text{و}$$

حالا در مقطع ۴،  $p = 0.05 \text{ atm}$  است و

$$\frac{P_4}{P_{04}} = \frac{0.05}{0.92173} = 0.05425 \quad \text{(f)}$$

حالا می‌توان با مراجعه مجدد به جدول A-۱۹ و با استفاده از مقدار (f) نتایج زیر را به دست آورد:

$$M_4 = 2.551 \quad \frac{T_4}{T_{04}} = 0.43463 \quad \frac{A_4}{A_4^*} = 2.780$$

$$T_4 = (0.43463)(1557) = 676 \text{ K} = 403^\circ\text{C} \quad \text{بنابراین}$$

$$c_4 = [(1.4)(1.0)(287)(676)]^{1/2} = 521 \text{ m/s}$$

$$V_4 = c_4 M_4 = (521)(2.551) = 1330 \text{ m/s} \quad \text{و}$$

در ورود  $T_{1,x} = 223 \text{ K}$  به طوری که

$$c_{1,x} = [(1.4)(1.0)(287)(223)]^{1/2} = 229 \text{ m/s}$$

$$V_{1,x} = c_{1,x} M_1 = (229)(4.0) = 1197 \text{ m/s} \quad \text{و}$$

جریان جرمی را می‌توان برای شرایط ورودی محاسبه کرد. ابتدا چگالی به صورت زیر محاسبه می‌شود



$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1} = \frac{(0.05)(1.0132 \times 10^5)}{(287)(223)} = 0.0792 \text{ kg/m}^3$$

بدین ترتیب،

$$\dot{m} = \rho_1 A_1 V_1 = (0.0792 \text{ kg/m}^3)(1 \text{ m}^2)(1197 \text{ m/s}) = 94.8 \text{ kg/s}$$

در مقطع خروجی چگالی برابر است با

$$\rho_4 = \frac{p_4}{RT_4} = \frac{(0.05)(1.0132 \times 10^5)}{(287)(676)} = 0.0261 \text{ kg/m}^3$$

و سطح مقطع خروجی را می توان از رابطه پیوستگی جرم محاسبه کرد:

$$\dot{m} = \rho_4 A_4 V_4$$

$$A_4 = \frac{94.8}{(0.0261)(1330)} = 2.731 \text{ m}^2$$

حالا موازنه نیرو بر روی حجم کنترلی که با خط چین مشخص شده است، با این فرض انجام می گیرد که نیروی پیش برنده  $T$  وارده بر سیال، به طرف راست باشد و جهت نیروی مثبت به طرف راست در نظر گرفته شود. نیروی پیش برنده بر روی ساختمان راجت به طرف چپ خواهد بود.

$$\sum F_x = \frac{\dot{m}}{g_c} (V_e - V_i)$$

$$T + p_1 A_1 - p_4 A_4 = \frac{\dot{m}}{g_c} (V_4 - V_1) \quad (g)$$

حالا تمام مقادیر عددی لازم را برای جایگزینی در معادله (g) و محاسبه نیروی پیش برنده داریم

$$\begin{aligned} T &= - (0.05)(1.0132 \times 10^5)(1 - 2.731) + \frac{94.8}{(1.0)} (1330 - 1197) \\ &= 8769 + 12608 = 21377 \text{ N} = 4805 \text{ lbf} \end{aligned}$$

حرارتی که باید به وسیله رآکتور تأمین شود برابر است با:

$$Q = \dot{m}(h_3 - h_2) = \dot{m}c_p(T_3 - T_2) \quad (h)$$

گرمای ویژه هوا برابر است با:

$$c_p = 0.24 \text{ Btu/lbm.}^\circ\text{F} = 1005.8 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$$

بنابراین

$$\begin{aligned} Q &= (94.8)(1005.8)(1200 - 580) = 59.06 \text{ MW} \\ &= 2.016 \times 10^8 \text{ Btu/h} \end{aligned}$$

این نکته نیز جالب است که نرخ کار انجام شده به وسیله حرکت نیروی پیش برنده با سرعت  $V_1$  را محاسبه کنیم:

$$W = TV_1 = (21377 \text{ N})(1197 \text{ m/s}) = 2.559 \times 10^7 \text{ W}$$

بنابراین بازده تبدیل انرژی برای راجت برابر است با

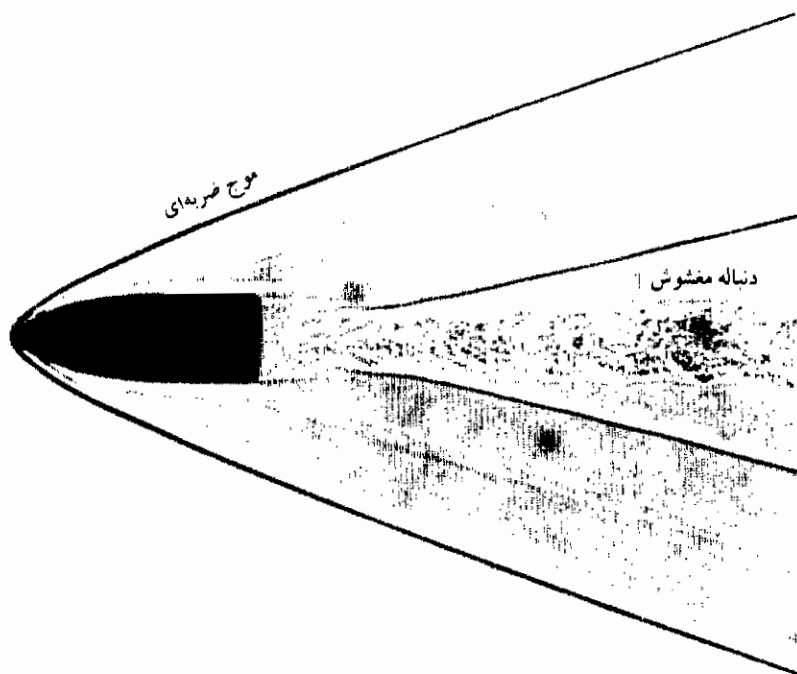
$$\text{بازده} = \frac{W}{Q} = \frac{2.559 \times 10^7}{5.906 \times 10^7} = 43.3 \text{ درصد}$$

این مقدار نسبتاً بزرگ است و علتش این است که حرارت در دمای خیلی زیاد ( $1200^\circ\text{C}$ ) داده می شود. از بحث درباره جریانهای گوناگونی که در قسمت پایین دست یک شیپوره تشکیل می شود دریافتیم که امواج ضربه ای همیشه از نوع "قائم" نیستند. امواج ضربه ای می توانند در جهت مایل نسبت به سرعت جریان تشکیل شوند و ممکن است در شرایط معینی به صورت منحنی در آیند. در شکل ۹-۱۰، عکسی از ضربه کمانی<sup>۱</sup> که توسط گلوله ای با سرعت زیاد تولید شده داریم. مشابه این موج در اطراف دماغه یک هواپیمای با سرعت بالا نیز تشکیل می شود. جریان را درست در پشت جلوترین موقعیت ضربه، می توان مانند پایین دست موج ضربه ای قائم محاسبه کرد. همچنان که عدد ماخ اضافه می شود موج ضربه ای با زاویه تندتری به طرف عقب امتداد می یابد. زاویه دربرگیرنده جریان<sup>۲</sup> به وسیله آنچه که مخروط ماخ نامیده شده است، مطابق شکل ۱۰-۱۰ بیان می شود.

1- Bow shock

2- Sweep angle

ناحیه سکوت<sup>۱</sup> در جلوی مخروط ماخ می‌باشد زیرا اغتشاشات، تنها با سرعت صوت منتشر



شکل ۹-۱۰ عکس پرواز یک کلوله سریع گفتک رمینگتون کالیبر ۰/۲۲ با سرعت ۴۱۰۰ ft/s (با اجازه شرکت ARO، پایگاه نیروی هوایی آرنولد، تنسی)

می‌شوند. برای حرکت چشمه صوت به فاصله  $V\tau$  در زمان  $\tau$ ، صوت تنها به اندازه  $c\tau$  به طرف یال مخروط حرکت می‌کند. اغتشاشات در پشت مخروط شنیده می‌شود. بدیهی است که زاویه مخروط به وسیله رابطه زیر داده می‌شود.

$$\sin \alpha = \frac{c}{V} = \frac{1}{M}$$

برای  $M < 1$  اغتشاشات می‌توانند علاوه بر پشت منبع در جلوی آن نیز منتشر شوند. این بدین معنی است

که هواپیمای مافوق صوت ممکن است خیلی قبل از اینکه ناظری در روی زمین اثر ضربه کمائی آن را بشنود از بالای سر او گذشته باشد.

به عنوان یک مثال ساده هواپیمایی را در نظر بگیرید که در ارتفاع ۵۰۰۰۰ ft و با سرعت  $M = ۲$  حرکت می کند. زاویه مخروط برابر است با:

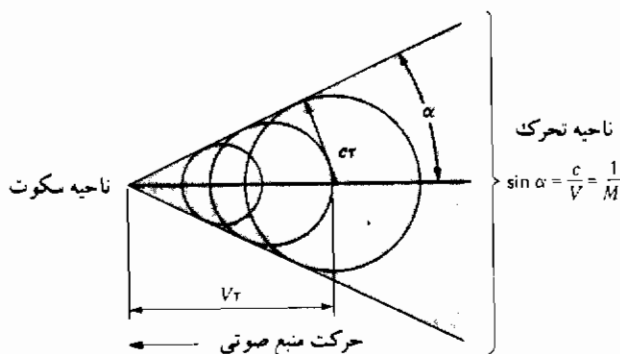
$$\alpha = \sin^{-1} \frac{1}{M} = \sin^{-1} \frac{1}{2} = 30^\circ$$

هنگامی که یال مخروط به زمین برسد هواپیما محل ناظر را به فاصله  $x$  پیموده است که

$$\frac{50000}{x} = \tan \alpha$$

یا

$$x = 86602 \text{ ft} = 16.4 \text{ mi} \quad (26.4 \text{ km})$$

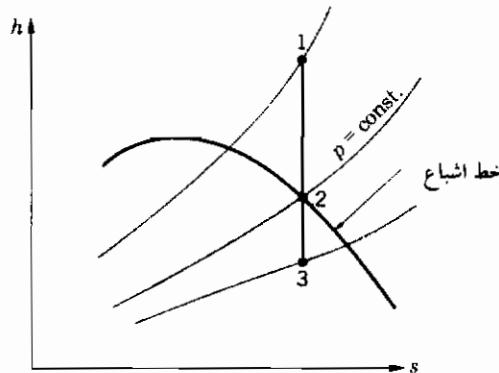


شکل ۱۰-۱۰ مخروط ماخ و ناحیه سکوت

## ۱۰-۸ جریان بخار در شیپوره

تا به حال دریافته ایم که بخار لزوماً به صورت یک گاز ایده آل رفتار نمی کند، مخصوصاً هنگامی که حالت ترمودینامیکی آن به ناحیه اشباع نزدیک شود. بنابراین لازم است محاسبه جریان بخار با سرعت بالا در شیپوره به صورت متفاوتی از حالت گاز ایده آل با گرماهای ویژه ثابت انجام گیرد. نمودار  $h-s$  را در شکل ۱۰-۱۱ در نظر بگیرید، که بخار آب در یک شیپوره به صورت آنتروپی ثابت

از حالت ۱ تا حالت ۳ منبسط می‌شود. با رسیدن به خط اشباع یعنی نقطه ۲، انتظار می‌رود که تقطیر شروع شود. اما این عمل همیشه صورت نمی‌گیرد. اگر سرعت جریان به اندازه کافی زیاد باشد (نظیر جریان در شیوره مافوق صوت) ممکن است زمان کافی برای تشکیل جوانه‌های اولیه قطرات موجود نباشد تا فرآیند انتقال حرارت مربوط به تقطیر انجام گیرد. موقعی که جریان به اندازه کافی داخل ناحیه اشباع شود قطراتی نسبتاً بزرگی تشکیل شده و فرآیند تقطیر ادامه می‌یابد و ضربه تقطیر<sup>۱</sup> مشاهده خواهد شد. تأخیر در تقطیر حالتی را به وجود می‌آورد که به طور مناسب فوق اشباع<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. پدیده تقطیر ارائه شده در بالا معمولاً در اصطلاح ترمودینامیکی به عنوان مسأله تعادل موقتی<sup>۳</sup>



شکل ۱۰-۱۱ نمودار انتالپی - آنتروپی برای جریان پر سرعت بخار

تشریح می‌شود. دقیقاً این معروف موقعیتی است که حالت تعادل ترمودینامیکی، جهت جابه‌جایی‌های کوچک ثابت باقی می‌ماند، اما برای جابه‌جایی‌های خیلی بزرگ به موقعیت تعادلی جدیدی می‌رسد. بدین معنی که در مثال بالا قطرات نسبتاً بزرگ باید تشکیل شود تا این تغییر صورت گیرد. از نقطه نظر میکروسکوپی، این چیزها خیلی پیچیده است و شامل جذب ملکولهای بخار از طریق سطح مایع قطره، نرخ رشد قطرات و انتقال کلی شان در جریان بخار آب می‌شود.

- 1- Condensation shock
- 2- Supersaturation
- 3- Metastable equilibrium

در نتیجه پدیده فوق اشباع، جریان بخار در شیوره می تواند دقیقتر از آنچه که از طریق فرض ثابت بودن مقدار  $\gamma$  در محدوده نسبتاً وسیعی از فشارها و دماها امکان پذیر بود، محاسبه گردد. برای بخار آب  $\gamma = 1/3$  تقریب خوبی می باشد. پس نسبت فشار بحرانی برابر است با:

$$\frac{P^*}{P_0} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} = 0.545 \quad (10-51)$$

اگر بخار آب به صورت بخار اشباع وارد شیوره شود، نسبت بحرانی با تقریب خوبی برابر  $0.557/1$  یا مقدار مربوط به  $\gamma = 1/14$  است.

### مثال ۱۰-۱۰ جریان بخار آب در یک شیوره

بخار آب به صورت آنتروپی ثابت در یک شیوره از حالت اشباع  $100 \text{ psia}$  و  $500^\circ\text{F}$  تا  $14/7 \text{ psia}$  منبسط می شود. نرخ جریان جرمی برابر  $1 \text{ lbm/s}$  می باشد. سطح مقطع خروجی لازم را با استفاده از جداول بخار آب و سطح مقطع گلوگاه را با استفاده از مفروضات خاصیت ثابت مربوط به معادله (10-51) محاسبه کنید.

**حل:** با مشخص کردن خواص خروجی با زیرنویس  $e$ ، داریم:

$$T_0 = 500^\circ\text{F} = 960^\circ\text{R} \quad P_e = 14.7 \text{ psia}$$

$$P_0 = 100 \text{ psia} \quad \dot{m} = 1 \text{ lbm/s}$$

از جداول بخار آب (جدول A-9) داریم:

$$s_0 = s_e = 1.7085 \text{ Btu/lbm}^\circ\text{R} \quad (a)$$

$$h_0 = 1279.1 \text{ Btu/lbm}$$

در می یابیم که در فشار خروجی  $14/7 \text{ psia}$ ، جریان در ناحیه اشباع می باشد و مقادیر زیر از جدول A-8 به دست می آید:

$$s_f = 0.3120 \quad s_{fg} = 1.4446 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$$

$$h_f = 180.15 \quad h_{fg} = 970.3 \text{ Btu/lbm}$$

$$v_f = 0.01672 \quad v_g = 26.80 \text{ ft}^3/\text{lbm}$$

با به کار بردن معادله (a) کیفیت خروجی را محاسبه می‌کنیم:

$$s_e = 1.7085 = s_f + x s_{fg} = 0.312 + x(1.4446)$$

$$x = 0.9667$$

بنابراین انتالپی و حجم مخصوص خروجی حاصله برابر است با:

$$h_e = 180.15 + (0.9667)(970.3) = 1118.1 \text{ Btu/lbm}$$

$$v_e = 0.01672 + (0.9667)(26.8 - 0.01672) = 25.91 \text{ ft}^3/\text{lbm}$$

سرعت خروجی را برای این مسأله می‌توان از معادله انرژی جریان - دائم محاسبه کرد.

$$h_e + \frac{V_e^2}{2g_c} = h_0 \quad (b)$$

با جایگزینی مقادیر عددی

$$V_e = [(2)(32.2)(778)(1279.1 - 1118.1)]^{1/2} = 2840 \text{ ft/s} \quad (931.8 \text{ m/s})$$

نرخ جریان جرمی می‌تواند به طریق زیر بیان شود:

$$\dot{m} = \rho A V_e = \frac{A V_e}{v} \quad (c)$$

از رابطه بالا سطح مقطع جریان تحت شرایط خروجی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$A_e = \frac{(1 \text{ lbm/s})(25.91 \text{ ft}^3/\text{lbm})}{2840 \text{ ft/s}} = 9.123 \times 10^{-3} \text{ ft}^2 = 1.314 \text{ in}^2$$

با فرض ثابت بودن خواص در معادله (۱۰-۵۱) سطح گلوگاه با استفاده از مقدار  $\gamma = ۱/۳$  محاسبه

می‌شود. سپس این مقدار را می‌توان در معادله (۱۰-۳۱) با انتخاب مقدار زیر برای ثابت گاز در بخار

آب به کار برد.

$$R = \frac{1545}{18} = 85.8 \text{ ft.lbf/lbm.}^{\circ}\text{R}$$

با به کار بردن معادله (۱۰-۳۱)

$$\begin{aligned} \frac{\dot{m}}{A^*} &= (100)(144) \left[ \frac{(1.3)(32.2)}{(85.8)(960)} \right]^{1/2} \left( \frac{2}{1.3 + 1} \right)^{(1.3+1)/2(1.3-1)} \\ &= 190 \text{ lbm/s.ft}^2 \end{aligned}$$

با  $\dot{m} = 1 \text{ lbm/s}$  سطح گلوگاه مورد نیاز برابر است با:

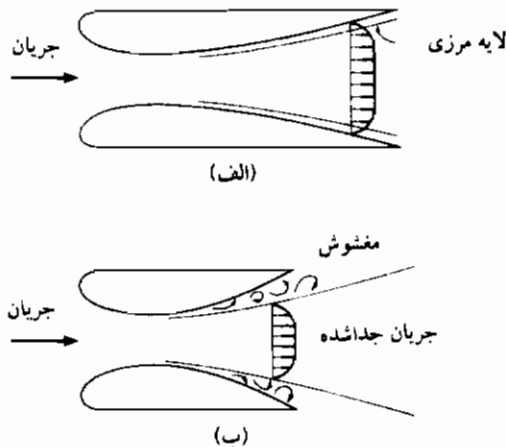
$$A^* = \frac{1}{190} = 5.263 \times 10^{-3} \text{ ft}^2 = 0.758 \text{ in}^2 \quad (4.89 \text{ cm}^2)$$

## ۱۰-۹ ضرایب شیپوره و پخش کن

تا این جا، جریان آدیاباتیک یک بعدی را به همراه اثرات مهم تراکم پذیری در آن بررسی کرده ایم. باستانی پدیده های موج ضربه ای، جریانها برای حالت ایده آل، برگشت پذیر یا آنتروپی ثابت در نظر گرفته شده است. فرض آدیاباتیک بودن برای حالات واقعی جریان در شیپوره و پخش کن فرض معقولی است، اما چندین عامل باعث می شود که جریان واقعی برگشت ناپذیر باشد. اصطکاک سیال همیشه در دیواره وجود دارد و باعث خواهد شد که کل جریان برگشت ناپذیر باشد. شکل دقیق شیپوره به علت تشکیل لایه مرزی لزج بر روی دیواره، بر ماهیت تأثیرهای اصطکاکی اثر می گذارد. بحث دقیق درباره این تأثیرات خارج از حیطه کار ما می باشد. اما می توانیم ماهیت گوناگون نشان را با توجه به دو حالت شکل (۱۰-۱۲) مشخص کنیم. در شکل (الف) منحنی شیپوره صاف و دارای شیب ملایمی است و اگر جریان مافوق صوت باشد شتاب ملایمی تا  $M = 1$  در گلوگاه وجود دارد و سپس  $M > 1$  در قسمت پخش کن با لایه مرزی لزج در دیواره مطابق آنچه در شکل نشان داده شده است مشاهده می شود. در شکل ب ۱۰-۱۲ جریان دوباره به آرامی تا  $M = 1$  در گلوگاه شتاب می گیرد، اما تغییر



سطح مقطع در قسمت پخش کن خیلی تندتر از حالت (الف) می باشد. در نتیجه ممکن است جریان پر سرعت بر روی دیواره ایجاد نشود و از ناحیه کاملاً مغشوش در دیواره مجزا<sup>۱</sup> یا جدا<sup>۲</sup> شود. جای تعجب نیست که ماهیت تأثیرات اصطکاکی سیال در (ب) کاملاً متفاوت از آنهایی است که در (الف) بود. تحلیل های بنیادی سیستمهای جریان شیوره بعضی اوقات می تواند تأثیرات اصطکاکی را پیش بینی کند و معمولاً نتایج بر حسب ضرایب عملکرد مشخصی بیان می شود که می توان آنها را با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه کرد. علی رغم موفقیت در تحلیل، اطلاعات تجربی را می توان برای تعیین مقدار ضرایب در طراحی به کار برد و حالا می خواهیم درباره ضرایب مهم بحث نماییم.



شکل ۱۰-۱۲ اثر قسمت منحنی شکل شیپوره بر جریان: (الف) انبساط تدریجی

(ب) افزایش خیلی شدید سطح مقطع و جریان جدا شده

بازده شیپوره  $\eta_N$  بوسیله رابطه زیر تعریف می شود:

$$\eta_N = \frac{\text{انرژی (KE) واقعی در قسمت خروجی}}{\text{انرژی (KE) در قسمت خروجی برای جریان آتروپی ثابت تا همان فشار خروجی}} \quad (۱۰-۵۲)$$

- 1- Detached
- 2- Separated

بازده‌ها بین ۹۰ تا ۹۹ درصد است و شیوره‌های بزرگتر دارای بازده بیشتری می‌باشند زیرا لایه مزری لزج، نسبتاً بخش کمتری از جریان را اشغال می‌کند و سطح مقطع جریان بزرگتر خواهد بود. اگر انرژی جنبشی ورودی کم باشد، انتالپی ورودی تقریباً برابر  $h_0$  است و بازده شیوره را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\eta_N = \frac{h_0 - h_e}{h_0 - h_{es}} \quad (۱۰-۵۳)$$

$h_e$  انتالپی خروجی واقعی است و  $h_{es}$  انتالپی خروجی آنتروپی ثابت برای انبساط تا فشار خروجی واقعی می‌باشد.

ضریب سرعت شیوره  $C_V^1$  به همین ترتیب تعریف می‌شود:

$$C_V = \frac{\text{سرعت واقعی در قسمت خروجی}}{\text{سرعت در قسمت خروجی برای جریان آنتروپی ثابت تا همان فشار خروجی}} \quad (۱۰-۵۴)$$

ضریب تخلیه  $C_D^2$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_D = \frac{\text{نرخ جرمی جریان واقعی}}{\text{نرخ جرمی جریان برای جریان آنتروپی ثابت}} \quad (۱۰-۵۵)$$

در بعضی از حالات منظور از طرح کانال جریان، کاهش سرعت جریان و افزایش فشار می‌باشد. برای این حالات، غالباً مناسب است که ضریب بازیافت فشار پخش‌کن  $C_p^3$  به صورت زیر تعریف شود:

$$C_p = \frac{\text{افزایش فشار واقعی}}{\text{افزایش فشار آنتروپی ثابت}} \quad (۱۰-۵۶)$$

1- Nozzle velocity coefficient

2- Coefficient of discharge

3- Diffuser pressure recovery factor

روش دیگر برای تشریح عملکرد پخش کن معرفی بازده پخش کن می باشد.

$$\eta_D = \frac{\text{افزایش انتالپی آنتروپی ثابت برای تخلیه در فشار سکون خروجی واقعی}}{\text{انرژی جنبشی ورودی}} \quad (۱۰-۵۷)$$

دلیل این تعریف مستقیماً آشکار نیست اما با مراجعه به شکل ۱۰-۱۳ واضح می شود. در این نمودار انرژی جنبشی ورودی برابر است با:

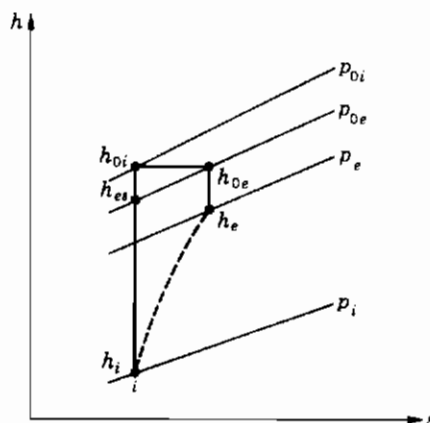
$$\frac{V_i^2}{2g_c} = h_{0i} - h_i$$

در حالی که انرژی جنبشی در قسمت خروجی برابر است با:

$$\frac{V_e^2}{2g_c} = h_{0e} - h_e$$

صورت معادله (۱۰-۵۷) حداکثر انرژی جنبشی را که می توانست برای تخلیه در فشار سکون خروجی واقعی حاصل شود معرفی می کند. بنابراین، برحسب شرح علائم شکل ۱۰-۱۳ به دست می آوریم:

$$\eta_D = \frac{h_{es} - h_i}{h_{0i} - h_i} \quad (۱۰-۵۸)$$



شکل ۱۰-۱۳ پارامترهای لازم جهت محاسبه بازده پخش کن

## مثال ۱۱-۱۰ بازیافت فشار پخش کن

پخش کن خاصی با بازده ۹۰ درصد برای کاهش سرعت جریان هوا از ۱۵۰ m/s، ۳۰۰ K و ۱۰۰ kPa تا سرعت ۶۰ m/s به کار می رود. نسبت سطح مقطع خروجی به سطح مقطع ورودی را برای انجام این کار محاسبه کنید. ضریب بازیافت فشار برای این پخش کن چقدر است؟

**حل:** از معادله انرژی برای جریان دائم

$$h_{0i} - h_i = \frac{V_i^2}{2g_c} = \frac{(150)^2}{(2)(1.0)(1000)} = 11.25 \text{ kJ/kg} \quad (a)$$

با به کار بردن علائم شکل ۱۳-۱۰ و معادله (۵۸-۱۰) به دست می آید

$$h_{0e} - h_i = (0.9)(11.25) = 10.125 \text{ kJ/kg} \quad (b)$$

داریم  $T_i = 300 \text{ K}$ ، بنابراین از (a) و (b)

$$T_{0i} = \frac{11.25}{1.005} + 300 = 311.2 \text{ K} = 38.2^\circ\text{C} = T_{0e}$$

$$T_{0e} = \frac{10.125}{1.005} + 300 = 310.1 \text{ K} = 37.1^\circ\text{C} \quad (c)$$

دمای خروجی واقعی را می توان از طریق زیر به دست آورد:

$$T_e = T_{0e} - \frac{1}{c_p} \left( \frac{V_e^2}{2g_c} \right) = 311.2 - \frac{(60)^2}{(1.005)(2)(1000)} = 309.4 \text{ K} = 36.4^\circ\text{C}$$

حالا با مشاهده شکل ۱۳-۱۰ می توانیم خط آنتروپی ثابت از نقطه  $i$  تا نقطه  $es$  را برای محاسبه فشار سکون خروجی دنبال کنیم

$$\frac{P_{0e}}{P_i} = \frac{P_{es}}{P_i} = \left( \frac{T_{es}}{T_i} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

$$P_{0e} = (100) \left( \frac{310.1}{300} \right)^{1.4/0.4} = 112.3 \text{ kPa} \quad (d)$$

به این ترتیب می توانیم بارفتن از نقطه  $e$  تا نقطه  $0e$  فشار خروجی واقعی را محاسبه کنیم

$$\frac{P_e}{P_{0e}} = \left( \frac{T_e}{T_{0e}} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

$$P_e = (112.3) \left( \frac{309.4}{311.2} \right)^{3.5} = 110.04 \text{ kPa} \quad (e)$$

نسبت سطح مقطع از رابطه پیوستگی جرم تعیین می‌شود

$$\dot{m} = \rho_i A_i V_i = \rho_e A_e V_e \quad (f)$$

اما  $\rho = \frac{P}{RT}$ ، به‌طوری که

$$\frac{A_e}{A_i} = \frac{P_i V_i T_e}{P_e V_e T_i} = \frac{(100)(150)(309.4)}{(110.04)(60)(300)} = 2.343$$

جهت محاسبه ضریب بازیافت فشار باید ابتدا افزایش فشار آنتروپی ثابت را تعیین کنیم. فشار سکون ورودی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{P_{0i}}{P_i} = \left( \frac{T_{0i}}{T_i} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

$$P_{0i} = (100) \left( \frac{311.2}{300} \right)^{3.5} = 113.7 \text{ kPa} \quad (g)$$

ضریب بازیافت فشار از رابطه (۱۰-۵۶) محاسبه می‌شود:

$$C_p = \frac{P_e - P_i}{P_{0i} - P_i} = \frac{110.04 - 100}{113.7 - 100} = 0.733$$

### خودآزمایی (سؤالات مروری)

- ۱ - معنی اصطلاح حالت سکون آنتروپی ثابت چیست؟
- ۲ - چرا فشار سکون در یک فرآیند آدیاباتیک برگشت ناپذیر کمتر از یک فرآیند آنتروپی ثابت است؟
- ۳ - منظور از اصطلاح فشار استاتیک چیست؟
- ۴ - عدد ماخ را تعریف کنید. چرا این عدد مهم است؟
- ۵ - تعریف لغوی سرعت صوت چیست؟

- ۶ - از لحاظ فیزیکی توضیح دهید که چرا سرعت صوت در یک گاز ایده آل تنها تابعی از دما می باشد.
- ۷ - معادله برنولی چیست؟
- ۸ - اصطلاح جریان خفه شده را توضیح دهید.
- ۹ - چرا برای ازدیاد سرعت جریان در قسمت مافوق صوت یک شیوره، سطح مقطع جریان باید افزایش یابد؟
- ۱۰ - از لحاظ فیزیکی توضیح دهید که چرا برای افزایش سرعت در یک شیوره آیزنتروپیک، فشار باید همیشه کاهش پیدا کند، علی رغم این که جریان مادن صوت و یا مافوق صوت باشد؟
- ۱۱ - معنی اصطلاح شار ممنتوم چیست؟
- ۱۲ - چرا قانون دوم حرکت نیوتن نمی تواند مستقیماً برای حجم کنترل (سیستم باز) به کار رود؟
- ۱۳ - موج ضربه ای را طوری تشریح کنید که یک عامی بفهمد.
- ۱۴ - چرا مجاز هستیم جریان را در عرض یک موج ضربه ای آدیاباتیک فرض کنیم؟
- ۱۵ - ضخامت تقریبی یک موج ضربه ای چقدر است؟
- ۱۶ - خطوط فانو و رایلی چیست؟
- ۱۷ - چرا جریان هنگام عبور از یک موج ضربه ای باید همیشه از شرایط مافوق صوت به شرایط مادن صوت برسد؟
- ۱۸ - چرا برای یک گاز ایده آل دمای سکون در عرض یک موج ضربه ای ثابت باقی می ماند؟
- ۱۹ - چرا حضور موج ضربه ای در قسمت واگرای یک شیوره همگرا-واگرا اثری بر نرخ جریان جرمی در شیوره ندارد؟

### مسائل (آحاد انگلیسی)

- ۱۰-۱ دما و فشار سکون را برای جریانهای زیر محاسبه کنید.
  - (الف) هلیوم در  $2000 \text{ ft/s}$ ،  $100^\circ\text{F}$  و  $1 \text{ psia}$
  - (ب) هوا در  $M = 5$ ،  $40^\circ\text{F}$  و  $1 \text{ atm}$
  - (ج) هیدروژن در  $100 \text{ m/s}$ ،  $100^\circ\text{C}$  و  $5 \text{ atm}$
  - (د) بخار آب در  $1500 \text{ ft/s}$ ،  $120^\circ\text{F}$  و  $1 \text{ psia}$

- ۱۰-۲ عدد ماخ یا سرعت جریان را برای هر حالت مسأله ۱-۱۳ محاسبه کنید. فرض کنید برای بخار آب  $\gamma = 1/3$  باشد.
- ۱۰-۳ موشک پرتاب شونده‌ای<sup>۱</sup> ممکن است مجدداً در سرعتهای خیلی بالا در حدود  $M = 10$  وارد جو شود. برای موقعیتی که  $T = -60^\circ\text{F}$  و  $p = 0.03 \text{ atm}$  باشد، دمای سکون در جلوی موشک را با فرض رفتار گاز ایده‌آل تخمین بزنید. اگر یک ضربه‌کمانی دماغه مخروط را احاطه نماید، فشار موجود در نقطه سکون را تخمین بزنید.
- ۱۰-۴ موج ضربه‌ای قائمی را به صورت وسیله‌ای برای کاهش سرعت جریان مافوق صوت در نظر بگیرید. برای  $M_x = 1/5$  مقدار "بازده پخش‌کن" را همان‌طور که با معادله ۱۰-۵۷ معرفی شده، محاسبه کنید.
- ۱۰-۵ شیپوره همگرا - واگرایی طوری طرح شده که با شرایط سکون ورودی  $150 \text{ psia}$  و  $200^\circ\text{F}$  و با تخلیه هوا در  $M = 2/5$  کار کند. با فرض ثابت ماندن شرایط سکون، فشار خروجی را تا چه مقدار باید بالا برد تا درست جریان مادون صوتی در تمامی شیپوره داشته باشیم؟
- ۱۰-۶ شیپوره همگرا - واگرایی طوری طرح شده تا یک جریان خروجی هوا را در  $M = 4$  و  $0.1 \text{ atm}$  تولید نماید. دمای سکون  $120^\circ\text{F}$  می‌باشد. سطح مقطع گلوگاه و جریان جرمی برای سطح مقطع خروجی  $1 \text{ in}^2$  را محاسبه نمایید.
- ۱۰-۷ پس فشار را تا چه میزان باید افزایش داد تا درست یک ضربه‌قائم در قسمت خروجی شیپوره مسأله ۱۰-۶ ایجاد شود؟
- ۱۰-۸ سرعت صوت را برای هوا، هیدروژن، هلیوم، دی‌اکسید کربن و پروپان در  $400^\circ\text{F}$  محاسبه کنید.
- ۱۰-۹ سرعت صوت را برای بخار آب در  $500 \text{ psia}$  و  $1000^\circ\text{F}$  با به کار بردن جداول بخار آب محاسبه کنید.
- ۱۰-۱۰ چند درصد کاهش نرخ جریان، در اثر پایین آوردن فشار سکون مسأله ۱۰-۵ تا  $100 \text{ psia}$ ، حاصل می‌شود؟

- ۱۰-۱۱ یک تسمه نقاله با سرعت  $10 \text{ ft/s}$  حرکت می‌کند و موادی را مستقیماً از بالا با نرخ  $900 \text{ lbm/min}$  دریافت می‌کند. موتور با چقدر اسب بخار لازم است که مستقیماً تسمه را صرف نظر از افت‌های اصطکاکی در قرقره<sup>۱</sup> و غیره، بچرخاند؟
- ۱۰-۱۲ طرح جالبی برای قایق موتوری استفاده از پمپ توربینی است تا آب را از قسمت ورودی در جلو بمکد و با سرعت بیشتری در پشت قایق تخلیه نماید. در طرح خاصی محاسبه می‌شود که  $500 \text{ lbf}$  نیروی پیش‌برنده لازم است تا قایق را با سرعت  $30 \text{ mph}$  براند. سطح مقطع جریان ورودی  $1 \text{ ft}^2$  است و می‌توان فرض کرد که آب با سرعت قایق داخل می‌شود. با توجه به این که کل نیروی پیش‌برنده در اثر افزایش ممتوم سیال حاصل شده باشد چه سطح مقطع جریان خروجی لازم است؟ اسب بخار پمپ جهت به حرکت درآوردن قایق چه مقدار می‌باشد؟
- ۱۰-۱۳ اگر دمای جریان آزاد برای جریان اطراف گلوله شکل ۹-۱۰،  $0^\circ\text{F}$  باشد دما و فشار سکون بر دماغه گلوله را حساب کنید.
- ۱۰-۱۴ پخش کنی جهت کاهش سرعت جریان هوا از  $M = 0.8$ ،  $p = 14/7 \text{ psia}$  و  $T = 70^\circ\text{F}$  به مقدار  $200 \text{ ft/s}$  به کار می‌رود. نسبت سطح مقطع خروجی به سطح مقطع ورودی را در صورتی که بازده پخش کن ۸۵ درصد باشد محاسبه کنید. همچنین ضریب بازیافت فشار را محاسبه نمایید. به ازای  $1 \text{ lbm}$  سیالی که از میان پخش کن عبور می‌کند چه مقدار حرارت اضافه می‌شود؟
- ۱۰-۱۵ هوا وارد قسمت همگرایی در  $200 \text{ ft/s}$ ،  $50 \text{ psia}$  و  $150^\circ\text{F}$  می‌شود. سطح مقطع خروجی و سطح مقطع ورودی به ترتیب برابر  $4 \text{ in}^2$  و  $6 \text{ in}^2$  است. سرعت، دما و فشار خروجی را برای جریان آنتروپی ثابت محاسبه کنید.
- ۱۰-۱۶ فرض کنید جریان هوایی در  $M = 2/5$ ،  $p = 0.1 \text{ atm}$  و  $T = 10^\circ\text{F}$  در ورود به شیوره همگرا - واگرای مسأله ۳۰-۱۰ برقرار شود و ضربه قائم در آن نقطه تشکیل گردد. شرایط جریان خروجی در این وضعیت چه خواهد بود؟
- ۱۰-۱۷ مخزن پر از آبی به حجم  $150 \text{ ft}^3$  بر روی چرخهایی قرار دارد به طوری که آزادانه بر روی



یک سطح مسطح حرکت می‌کند. پمپی که بر روی مخزن نصب شده آب را با نرخ  $50 \text{ lbm/s}$  از طریق شیوره‌ای با سطح مقطع خروجی  $1 \text{ in}^2$  تخلیه می‌کند. هنگامی که مخزن با سرعت  $20 \text{ ft/s}$  در خلاف جهت سرعت تخلیه شیوره حرکت می‌کند نیروی پیش‌برنده خالص تولید شده چقدر است؟

۱۰-۱۸ به دماهای خیلی پایین می‌توان از طریق انبساط هوای پرفشار در شیوره مافوق صوت دست یافت. چه نسبت سطح مقطع خروجی به سطح مقطع گلوگاهی لازم است تا هوای  $70^\circ\text{F}$  - از هوای پرفشار در  $70^\circ\text{F}$  و  $20 \text{ atm}$  تولید شود؟

۱۰-۱۹ به علت این که سطح مواد می‌تواند در سرعت‌های بالا دماهای معینی را تحمل کند، محدودیت‌های طراحی برای هواپیماهای پرسرعت وجود دارد. در هر سرعت، حداکثر درجه حرارت بدنه هواپیما دمای سکون می‌باشد. حداکثر سرعت برای پرواز در ارتفاعی که  $T = -50^\circ\text{F}$ ،  $p = 0.1 \text{ atm}$  و با حداکثر دمای مجاز سطح  $700^\circ\text{F}$ ، چقدر می‌باشد؟  
 ۱۰-۲۰ تونل باد مافوق صوت کوچکی باید طوری طرح شود که دارای مقطعی با مشخصات اندازه‌گیری شده  $M = 2$ ،  $T = -50^\circ\text{F}$  و  $p = 2 \text{ psia}$  باشد. سطح مقطع جریان باید  $1 \text{ ft}^2$  باشد و جریان هوا به وسیله تخلیه مخزن پرفشاری از طریق شیوره همگرا - واگرایی برقرار می‌شود. خواص سکون لازم در مخزن و جریان جرمی هوای لازم چقدر است؟ همچنین سطح مقطع گلوگاه شیوره را حساب کنید.

۱۰-۲۱ فرض کنید که شیوره بخار آب مسأله ۱۰-۲۳ دارای ضریب سرعت  $0.95$  باشد جریان جرمی در این وضعیت و ضریب تخلیه چقدر خواهد بود؟

۱۰-۲۲ موشک اسباب‌بازی کوچکی با هوا در  $2000 \text{ psia}$ ،  $110^\circ\text{F}$  شارژ شده است. هوا از طریق شیوره همگرا - واگرایی با سطح گلوگاه  $1 \text{ mm}^2$  و سطح خروجی  $3 \text{ mm}^2$  تخلیه می‌شود. تخلیه در فشار اتمسفر صورت می‌گیرد. نیروی پیش‌برنده خالص را هنگامی که موشک در موقعیت سکون است محاسبه نمایید.

۱۰-۲۳ بخار آب به‌طور آنتروپی ثابت در شیوره‌ای از  $500 \text{ psia}$ ،  $600^\circ\text{F}$  تا  $200 \text{ psia}$  منبسط می‌شود. سرعت ورودی کم است. سرعت خروجی و سطح مقطع خروجی را برای نرخ جریان  $2 \text{ lbm/s}$  محاسبه کنید.

- ۱۰-۲۴ نیتروژن به طور آنتروپی ثابت از ۱۵۰ psia و ۳۰۰°F تا فشار اتمسفر منبسط می‌شود. چه سطح مقطع گلوگاه و سطح مقطع خروجی برای جریان جرمی ۰/۱ lbm/s لازم خواهد بود؟
- ۱۰-۲۵ شیوره همگرا - واگرایی با نسبت سطح مقطع خروجی به سطح مقطع گلوگاهی معادل ۲/۴ به مخزن بزرگی حاوی هوادر ۲۰۰ psia و ۷۰°F متصل است. برای تولید ضربه‌ای قائم در خروجی شیوره چه پس فشاری باید اعمال شود؟

### مسائل (آحاد متریک)

- ۱۰-۱M دما و فشار سکون را برای جریانهای زیر محاسبه کنید.  
(الف) هلیوم در ۶۱۰ m/s، ۳۵°C، ۷ kPa  
(ب) هوادر  $M = ۵$ ، -۴۰°C، ۰/۰۱ atm  
(ج) هیدروژن در ۱۰۰۰ m/s، ۱۰۰°C، ۰/۵ atm  
(د) بخار آب در ۴۶۰ m/s، ۴۹°C، ۰/۵ atm
- ۱۰-۲M موشک پرتاب شونده‌ای ممکن است مجدداً در سرعتهای خیلی بالا در حدود  $M = ۱۰$  وارد جو شود. اگر  $T = -۵۰^\circ\text{C}$  و  $p = ۰/۰۳\text{ atm}$  باشد دمای سکون را در جلوی موشک با فرض گاز ایده آل تخمین بزنید. اگر یک ضربه کمائی دماغه مخروط را احاطه نماید، فشار موجود در نقطه سکون را تخمین بزنید.
- ۱۰-۳M شیوره همگرا-واگرایی طوری طرح شده که با شرایط سکون ورودی ۱ MPa و ۱۰۰°C و با تخلیه هوادر  $M = ۲/۵$  کار کند. با فرض ثابت ماندن شرایط سکون، فشار خروجی را تا چه مقدار باید بالا برد، تا جریان مادون صوتی در تمام شیوره داشته باشیم؟
- ۱۰-۴M شیوره همگرا-واگرایی طوری طرح شده تا یک جریان خروجی هوا را در  $M = ۴$  و ۱ atm تولید نماید. دمای سکون ۵۰°C است. سطح مقطع گلوگاه و جریان جرمی برای سطح مقطع خروجی ۶/۵ cm<sup>2</sup> را محاسبه نماید.
- ۱۰-۵M سرعت صوت را برای هوا، هیدروژن، هلیوم، دی اکسید کربن و پروپان در ۲۰۰°C محاسبه کنید.

۱۰-۶M سرعت صوت را برای بخار آب در  $3/5 \text{ MPa}$  و  $280^\circ\text{C}$  با به کار بردن جداول بخار آب محاسبه کنید.

۱۰-۷M هوا در  $900 \text{ kPa}$  و  $30^\circ\text{C}$  به طور آنتروپی ثابت در یک شیپوره تافشار  $170 \text{ kPa}$  منبسط می شود. سرعت ورودی ناچیز است. دما و سرعت خروجی را محاسبه کنید.

۱۰-۸M هوا در  $1 \text{ kPa}$  و  $60^\circ\text{C}$  در یک پخش کن آیزنتروپیک از  $M = 3$  تا  $M = 1$  در خروج از شیپوره کاهش شتاب می یابد. نرخ جریان  $12 \text{ kg/s}$  است. دما و فشار در خروج و ورود و سطح مقطع جریان خروجی را محاسبه کنید.

۱۰-۹M چند درصد کاهش نرخ جریان، در اثر پایین آوردن فشار سکون مسأله  $10-3M$  به  $700 \text{ kPa}$  حاصل می شود؟

۱۰-۱۰M یک تسمه نقاله با سرعت  $3 \text{ m/s}$  حرکت می کند و موادی را مستقیماً از بالا با نرخ  $33 \text{ kg/s}$  دریافت می کند. موتوری با چقدر اسب بخار لازم است تا مستقیماً تسمه را صرف نظر از افتهای اصطکاکی در قرقره و غیره، بچرخاند؟

۱۰-۱۱M طرح جالبی برای قایق موتوری استفاده از پمپ توربینی است تا آب را از قسمت ورودی در جلو بکشد و با سرعت بیشتری در پشت قایق تخلیه نماید. در طرح خاصی محاسبه می شود که  $2/2 \text{ kN}$  نیروی پیش برنده لازم است تا قایق را با سرعت  $13 \text{ m/s}$  براند. سطح مقطع جریان ورودی  $1 \text{ m}^2$  است و می توان فرض کرد که آب با سرعت قایق داخل می شود. با توجه به این که کل نیروی پیش برنده در اثر افزایش ممتوم سیال نتیجه شده باشد، چه سطح مقطع جریان خروجی لازم است؟ اسب بخار پمپ برای به حرکت در آوردن قایق چقدر است؟

۱۰-۱۲M به دماهای خیلی پایین می توان از طریق انبساط هوای پرفشار در شیپوره مافوق صوت دست یافت. چه نسبت سطح مقطع خروجی به سطح مقطع گلوگاهی لازم است تا هوای  $50^\circ\text{C}$  - از هوای پرفشار در  $20^\circ\text{C}$  و  $20 \text{ atm}$  تولید شود؟

۱۰-۱۳M دما و فشار سکون برای جریان بخار آب در  $6 \text{ MPa}$  و  $440^\circ\text{C}$  با سرعت  $150 \text{ m/s}$  را محاسبه کنید.

۱۰-۱۴M در هواپیمای جتی، خواص سکون هوا به صورت  $p_0 = 8/5 \text{ MPa}$  و  $T_0 = 875^\circ\text{C}$

برای فشار جریان آزاد  $35 \text{ kPa}$  اندازه گیری شده است. سرعت هواپیما و عدد ماخ را محاسبه کنید.

$10-15M$  شیوره کوچک جریان صوتی، جریان نیتروژن را در  $5 \text{ atm}$  و  $50^\circ\text{C}$  اندازه می گیرد. شیوره چه نرخ جریانی برای سطح مقطع خروجی  $4 \text{ mm}^2$  و تخلیه در فشار اتمسفر اندازه خواهد گرفت؟

$10-16M$  نرخ جریان برای شیوره مسأله  $10-15M$  با به کار بردن هوا و هلیوم برای همان فشار و دما چقدر است؟

$10-17M$  جریانی از گاز هلیوم با دمای بالا در شیوره همگرایی از  $T = 1000^\circ\text{C}$ ،  $p = 3 \text{ atm}$  و  $V = 100 \text{ m/s}$  تا  $M = 0.9$  شتاب می گیرد. با فرض جریان آنروپی ثابت نسبت سطح مقطع خروجی به سطح مقطع ورودی، دما و فشار خروجی را محاسبه کنید.

$10-18M$  یک سیلندر هوا با فشار زیاد از طریق شیوره همگرایی کوچکی، با سطح مقطع خروجی  $5 \text{ mm}^2$  تخلیه می شود. شرایط سیلندر  $100 \text{ atm}$  و  $30^\circ\text{C}$  می باشد و در حین فرآیند تخلیه می تواند ثابت فرض شود. با فرض جریان آنروپی ثابت و تخلیه به داخل اطاق بزرگی در فشار  $1 \text{ atm}$  چه نیروی پیش برنده ای حاصل می شود؟ چه نیروی پیش برنده ای حاصل می شد اگر بازده شیوره  $97\%$  درصد می بود؟

$10-19M$  به علت این که سطح مواد می تواند در سرعت های بالا دماهای معینی را تحمل کنند، محدودیتهای طراحی برای هواپیمای پرسرعت وجود دارد. در هر سرعت، حداکثر درجه حرارت بدنه هواپیما دمای سکون می باشد. حداکثر سرعت برای پرواز در ارتفاعی که  $T = -45^\circ\text{C}$  و  $p = 0.1 \text{ atm}$  و با حداکثر دمای مجاز سطح  $370^\circ\text{C}$  چقدر می باشد؟  $10-20M$  حداقل خواص سکون لازم جهت تولید جریان در  $M = 3$  و  $p = 1 \text{ atm}$  و  $T = 20^\circ\text{C}$  چقدر می باشد؟

$10-21M$  مخزن پر از آبی به حجم  $4200$  لیتر بر روی چرخهایی قرار دارد به طوری که به آزادی بر روی یک سطح مسطح حرکت می کند. پمپی که بر روی مخزن نصب شده آب را با نرخ  $23 \text{ kg/s}$  از طریق شیوره ای با سطح مقطع خروجی  $6/5 \text{ cm}^2$  تخلیه می کند. هنگامی که مخزن با سرعت  $6 \text{ m/s}$  در خلاف جهت سرعت تخلیه شیوره حرکت می کند، نیروی

پیش برنده خالص تولید شده چه مقدار می باشد؟

۱۰-۲۲M بخار آب به طور آنتروپی ثابت در شیوره ای از  $3/5 \text{ MPa}$ ،  $320^\circ\text{C}$  تا  $1/5 \text{ MPa}$  منبسط می شود. سرعت ورودی کوچک است. سرعت خروجی و سطح مقطع خروجی را برای نرخ جریان  $0.9 \text{ kg/s}$  محاسبه کنید.

۱۰-۲۳M نیتروژن به طور آنتروپی ثابت از  $1 \text{ MPa}$  و  $150^\circ\text{C}$  تا فشار اتمسفر منبسط می شود. چه سطح مقطع گلوگاه و سطح مقطع خروجی برای جریان جرمی  $0.05 \text{ kg/s}$  لازم خواهد بود؟

۱۰-۲۴M شیوره همگرا-واگرایی با نسبت سطح مقطع خروجی به سطح مقطع گلوگاهی معادل  $2/4$  به مخزن بزرگی حاوی هوا در  $1/3 \text{ MPa}$  و  $20^\circ\text{C}$  متصل است. برای تولید ضربه ای قائم در خروجی شیوره چه پس فشاری باید اعمال شود؟

۱۰-۲۵M فرض کنید که شیوره بخار آب مسأله ۱۰-۲۲M دارای ضریب سرعت  $0.95$  باشد. جریان جرمی در این وضعیت و ضریب تخلیه چقدر خواهد بود؟

۱۰-۲۶M تونل باد مافوق صوت کوچکی باید طوری طرح شود که دارای مقطعی با مشخصات اندازه گیری شده  $M = 2$ ،  $T = -45^\circ\text{C}$  و  $p = 14 \text{ kPa}$  باشد. سطح مقطع جریان باید  $0.1 \text{ m}^2$  باشد و جریان هوا به وسیله تخلیه مخزن فشار بالایی از طریق شیوره همگرا-واگرایی برقرار می شود. خواص سکون لازم در مخزن و جریان هوای لازم چقدر است؟ همچنین سطح مقطع گلوگاه شیوره را حساب کنید.

۱۰-۲۷M اگر دمای جریان آزاد برای جریان اطراف گلوله شکل ۱۰-۹،  $18^\circ\text{C}$  - باشد، دما و فشار سکون بر دماغه گلوله را حساب کنید.

۱۰-۲۸M پخش کنی برای کاهش سرعت جریان هوا از  $M = 0.8$  و  $p = 1 \text{ atm}$ ،  $T = 20^\circ\text{C}$  به مقدار  $60 \text{ m/s}$  به کار می رود. نسبت سطح مقطع خروجی به سطح مقطع ورودی را در صورتی که بازده پخش کن ۸۵ درصد باشد محاسبه کنید. همچنین ضریب بازیافت فشار را محاسبه نمایید. به ازای هر کیلوگرم سیالی که از میان پخش کن عبور می کند چقدر حرارت اضافه می شود؟

۱۰-۲۹M هوا وارد قسمت همگرایی در  $60 \text{ m/s}$ ،  $340 \text{ kPa}$  و  $65^\circ\text{C}$  می شود. سطح مقطع

خروجی و سطح مقطع ورودی به ترتیب برابر  $4 \text{ cm}^2$  و  $6 \text{ cm}^2$  است. سرعت، دما و فشار خروجی را برای جریان آنتروپی ثابت محاسبه کنید.

**۱۰-۳۰M** شیوره همگرا-واگرایی برای استفاده از هوا ساخته می شود به طوری که مقطع ورودی  $8 \text{ cm}^2$ ، حداقل سطح مقطع  $4 \text{ cm}^2$  و سطح مقطع خروجی نیز  $8 \text{ cm}^2$  باشد. چه عدد مایخی باید در قسمت ورودی موجود باشد تا شرایط صوتی در کمترین مقدار سطح مقطع تولید شود؟ عدد مایخ خروجی را تحت این شرایط محاسبه کنید. اگر دما و فشار ورودی  $25^\circ\text{C}$  و  $5 \text{ atm}$  باشد، نرخ جریان جرمی برای شرایط صوتی در حداقل سطح مقطع چقدر است؟ **۱۰-۳۱M** دما و فشار سکون برای جریان صوتی مسأله **۱۰-۳۰M** چقدر است؟

**۱۰-۳۲M** هوا در مخزنی به حجم  $0.5 \text{ m}^3$  در  $5 \text{ atm}$  و  $25^\circ\text{C}$  موجود می باشد و از طریق شیوره همگرایی با سطح مقطع خروجی  $1 \text{ cm}^2$  تخلیه می شود. تخلیه به داخل یک اتاق بزرگ در  $1 \text{ atm}$  صورت می گیرد و مخزن کاملاً عایق است. فرآیند تخلیه تا رسیدن فشار مخزن به  $3 \text{ atm}$  چقدر طول خواهد کشید؟

**۱۰-۳۳M** موج ضربه ای قائمی در هلیوم در نقطه ای که  $M = 3$  است تشکیل می شود و فشار و دمای جریان آزاد به ترتیب برابر  $0.2 \text{ atm}$  و  $10^\circ\text{C}$  است. فشار سکون پایین دست ضربه و سرعت جریان پایین دست را محاسبه کنید. این نتایج را با مقادیر به دست آمده برای هوایی که تحت ضربه ای در همان شرایط بالادست جریان قرار گرفته مقایسه نمایید.

**۱۰-۳۴M** موشک اسباب بازی کوچکی با هوا در  $13/5 \text{ MPa}$  و  $45^\circ\text{C}$  شارژ شده است. هوا از طریق شیوره همگرا-واگرایی با سطح گلوگاه  $1 \text{ mm}^2$  و سطح خروجی  $3 \text{ mm}^2$  تخلیه می شود. تخلیه در فشار اتمسفر صورت می گیرد. نیروی پیش برنده خالص را هنگامی که موشک ساکن است محاسبه نمایید.

**۱۰-۳۵M** حداکثر سرعتی را که می توان به صورت تئوری از انبساط هوا در شرایط سکون  $10 \text{ atm}$  و  $100^\circ\text{C}$  به دست آورد، محاسبه کنید.

**۱۰-۳۶M** فرض کنید که شیوره همگرا-واگرایی شال **۱۰-۴** با سطح مقطع ورودی  $8 \text{ cm}^2$  در معرض جریانی با  $M = 3$ ،  $p = 0.5 \text{ atm}$  و  $T = 0^\circ\text{C}$  قرار بگیرد و ضربه قائمی در قسمت ورودی تشکیل شود. دما، فشار و سرعت خروجی تحت این شرایط چقدر است؟

نرخ جریان تحت این شرایط و نیروی کلی اعمال شده بر سیال در حین حرکت درست از بالا دست ضربه تا خروج از شیوره چقدر است؟

### مراجع

- 1 Liepmann, H. W., and A. Roshko: "Elements of Dynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1957.
- 2 Shapiro, A. H.: "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Flow," The Ronald Press Company, New York, 1954.
- 3 Thompson, P. A.: "Compressible Fluid Dynamics," McGraw-Hill Book Company, New York, 1972.
- 4 Chapman, A. J., and W. F. Walker: "Introductory Gas Dynamics," Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York, 1971.





# فصل ۱۱

## اصول انتقال حرارت

### ۱-۱۱ مقدمه

در فصول قبلی دیدیم که ترمودینامیک می‌تواند برای موازنه انرژی در حالات فیزیکی متفاوتی مورد استفاده قرار گیرد. چند مثال عبارتند از:

۱- با انجام موازنه انرژی برای گرمکن آب تغذیه، مقدار بخار آب لازم برای تولید آب دمای بالا تعیین می‌شود.

۲- با انجام موازنه انرژی برای کویل تهویه مطبوع مقدار نرخ جریان میرد لازم برای سرمایش مقدار معینی از هوا تعیین می‌شود.

۳- با انجام موازنه انرژی مقدار حرارت لازم برای تبخیر مقدار معینی از آب تعیین می‌شود.

علی‌رغم موفقیت در اجرای این موازنه‌های انرژی و دیگر چیزها، ماهرگز روشهایی را برای تعیین اندازه مبدل‌های حرارتی که جهت گرمایش یا سرمایش بخصوصی لازم است تعیین نکرده‌ایم. فرآیند ساده دیگری را در نظر بگیرید:

یک قطعه فولادی در کوره‌ای تا  $200^{\circ}\text{C}$  حرارت داده می‌شود و سپس آن را از کوره خارج کرده می‌گذارند تا در هوای اطاق تا  $50^{\circ}\text{C}$  خنک شود. یک تحلیل ترمودینامیکی انرژی را می‌توان جهت تعیین انرژی اتلافی قطعه فولادی در فرآیند سرمایش به کار برد، اما نمی‌توان پاسخ داد که این فرآیند چه مدت طول خواهد کشید. علم انتقال حرارت می‌تواند جواب این سؤال را بدهد و همچنین

می تواند اندازه مبدل حرارتی را برای کاربردهایی نظیر آنچه در بالا گفته شد تعیین کند. در این فصل خلاصه ای از موضوع انتقال حرارت را ارائه خواهیم کرد. ابتدا درباره اصول سه نوع انتقال حرارت: هدایت، جابجایی<sup>۱</sup> و تابش بحث خواهیم کرد. سپس درباره کاربردهای مختلف این اصول برای طرح مبدلهای حرارتی بحث خواهیم کرد.

سه نوع انتقال حرارت وجود دارد: هدایت، جابجایی و تابش. هدایت در نتیجه انتقال انرژی به وسیله حرکت ملکولی در گازها و مایعات و به وسیله ترکیب ارتعاش شبکه ای و انتقال الکترون در جامدات صورت می گیرد. به طور کلی هادیهای خوب الکتریکی هادیهای خوب حرارتی نیز می باشند. انتقال حرارت جابجایی در اثر حرکت سیال از روی صفحه ای گرم صورت می گیرد، هرچه سیال سریع تر حرکت کند انتقال حرارت بیشتر است<sup>۲</sup>. انتقال حرارت جابجایی معمولاً متناسب با سطح تماس با سیال و اختلاف دمای بین سطح تماس و سیال فرض می شود. بدین ترتیب:

$$q_{\text{جابجایی}} = hA(T_{\text{سطح}} - T_{\text{سیال}}) \quad (۱۱-۱)$$

که  $h$  ضریب انتقال حرارت جابجایی نامیده می شود که تابعی شدید از خواص سیال و سرعت سیال می باشد. واحد  $h$ ،  $W/m^2 \cdot ^\circ C$  می باشد هنگامی که  $q$  بر حسب  $W$  و  $\Delta T$  بر حسب  $^\circ C$  باشد. گاهی مناسب است مقاومت جابجایی،  $R_{\text{جابجایی}} = \frac{1}{hA}$  در نظر گرفته شود بنابراین

$$q_{\text{جابجایی}} = \frac{T_{\text{سطح}} - T_{\text{سیال}}}{R_{\text{جابجایی}}} \quad (۱۱-۲)$$

انتقال حرارت تابشی نتیجه تابش الکترومغناطیس منتشره از سطح در نتیجه دمای آن است. این تابش با نوعهای دیگر تابش الکترومغناطیسی که به دما مربوط نمی شوند نظیر رادیو، تلویزیون، اشعه ایکس، اشعه گاما متفاوت می باشد. در قسمت زیر روشهای محاسبه برای انواع مختلف انتقال حرارت را به صورت مقدماتی بررسی می کنیم. اگرچه خواننده باید تشخیص دهد که این ارائه مختصر موضوع است و جزئیات بیشتر و بررسی دقیق موضوع در مراجع انتهای فصل یافت می شود.

۱- در این کتاب از کلمه «جابجایی» به جای ترجمه Convection و از کلمات «جابجایی» به جای ترجمه

displacement استفاده شده است (مترجم).

۲- این تعریف آقای هولمن در مورد جابجایی دقیق نیست (مترجم).

## ۲-۱۱ انتقال حرارت هدایتی در حالت دالم

هدایت حرارت به وسیله قانون فوریه بیان می شود که می گوید نرخ انتقال حرارت  $q$  (بر حسب وات) متناسب با گرادیان دما در جهت جریان حرارت و سطح عمود بر جریان حرارت می باشد (به شکل ۱۱-۱ نگاه کنید) یا

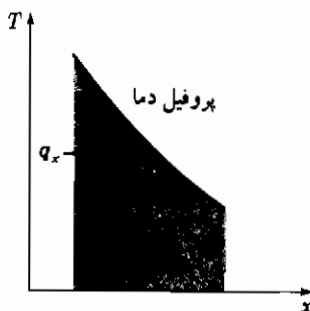
$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (11-3a)$$

$k$  ضریب تناسب است که به عنوان ضریب هدایت حرارتی تعریف می شود. علامت منفی به این علت است که انتقال حرارت در جهت کاهش دما صورت می گیرد، یعنی  $q_x$  مثبت است وقتی که  $\frac{\partial T}{\partial x}$  منفی باشد. واحد ضریب هدایت حرارتی  $W/m \cdot ^\circ C$  یا  $Btu/h \cdot ft \cdot ^\circ F$  می باشد. نمونه هایی از مقادیر  $k$  در جدول ۱-۱۱ نشان داده شده است. مقادیر ضرایب هدایت حرارتی برای تعدادی از فلزات و عایقهای حرارتی در جداول B-۱ و B-۲ ضمیمه B داده شده است.

برای سیستم ساده نشان داده شده در شکل ۲-۱۱ هدایت بوسیله انتگرال گرفتن معادله (۱۱-۳a) به دست می آید تا نتیجه دهد

$$q = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = \frac{T_1 - T_2}{\Delta x / kA} \quad (11-3b)$$

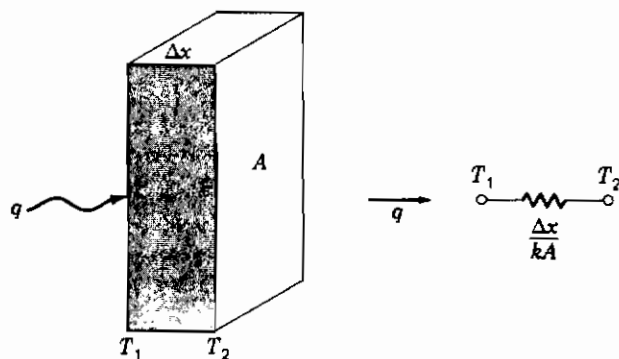
و مقاومت الکتریکی مشابه را می توان همانند شکل نشان داد



شکل ۱-۱۱ طرح نشان دهنده جهت جریان حرارت

جدول ۱-۱۱ ضریب هدایت حرارتی برای فلزات مختلف در °C

ضریب هدایت حرارتی $k$		مواد
W/m.°C	Btu/h.ft.°F	
فلزات		
۴۱۰	۲۳۷	نقره (خالص)
۳۸۵	۲۲۳	مس (خالص)
۲۰۲	۱۱۷	آلومینیم (خالص)
۹۳	۵۴	نیکل (خالص)
۷۳	۴۲	آهن (خالص)
۴۳	۲۵	فولاد کربن، ۱% C
۳۵	۲۰ / ۳	سرب (خالص)
۱۶ / ۳	۹ / ۴	فولاد کرم - نیکل (Ni % ۸, Cr % ۱۸)
جامدات غیر فلزی		
۴۱ / ۶	۲۴	کوارتز، موازی با محور
۴ / ۱۵	۲ / ۴	کربنات منیزیم طبیعی
۲ / ۰.۸ - ۲ / ۹۴	۱ / ۲ - ۱ / ۷	سنگ مرمر
۱ / ۸۳	۱ / ۰.۶	ماسه سنگ
۰ / ۷۸	۰ / ۴۵	شیشه، پنجره
۰ / ۱۷	۰ / ۰.۹۶	چوب افرا یا بلوط
۰ / ۰.۵۹	۰ / ۰.۳۴	خاک اره
۰ / ۰.۳۸	۰ / ۰.۲۲	پشم شیشه
مایعات		
۸ / ۲۱	۴ / ۷۴	جیوه
۰ / ۵۵۶	۰ / ۳۲۷	آب
۰ / ۵۴۰	۰ / ۳۱۲	آمونیاک
۰ / ۱۴۷	۰ / ۰.۸۵	روغن روغنکاری، SAE ۵۰
۰ / ۰.۷۳	۰ / ۰.۴۲	فریون ۱۲، $\text{CCl}_2\text{F}_2$
گازها		
۰ / ۱۷۵	۰ / ۱۰۱	هیدروژن
۰ / ۱۴۱	۰ / ۰.۸۱	هلیوم
۰ / ۰.۲۴	۰ / ۰.۱۳۹	هوا
۰ / ۰.۲۰۶	۰ / ۰.۱۱۹	بخار آب (اشباع)
۰ / ۰.۱۴۶	۰ / ۰.۰۸۴۴	دی اکسید کربن

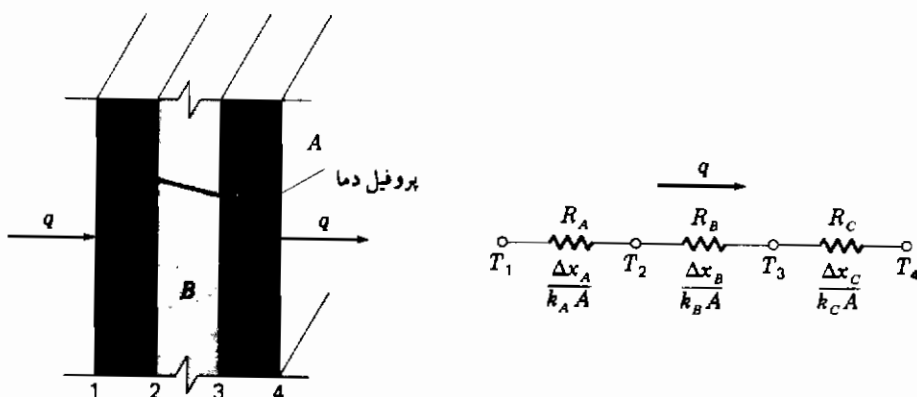


شکل ۱۱-۲ جریان حرارتی یک بعدی در دیوار و تشابه مقاومتی

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (۱۱-۴)$$

که در آن  $R = \frac{\Delta x}{kA}$ . هدایت از طریق دیوار سه لایه را مطابق شکل (۱۱-۳) می‌توان به صورت زیر تشریح کرد

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_A} = \frac{T_2 - T_3}{R_B} = \frac{T_3 - T_4}{R_C}$$



شکل ۱۱-۳ انتقال حرارت یک بعدی از میان دیوار مرکب و تشابه الکتریکی

یا

$$q = \frac{T_1 - T_2}{(\Delta x/kA)_A + (\Delta x/kA)_B + (\Delta x/kA)_C} \quad (۱۱-۵)$$

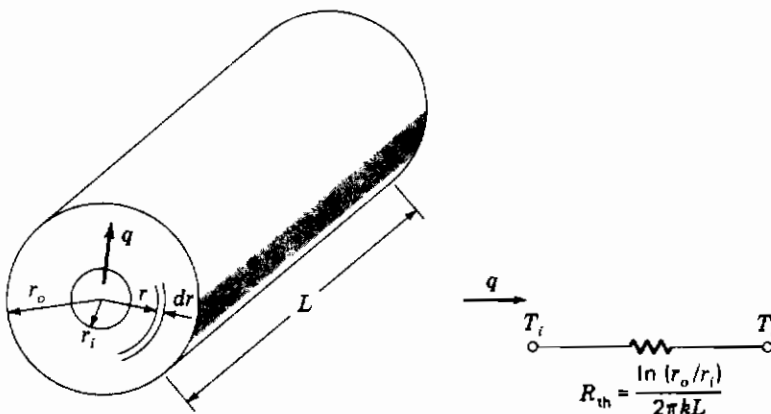
برای سیستم سیلندر توخالی در شکل ۱۱-۴ سطح انتقال حرارت در جهت شعاعی برابر  $2\pi rL$  است، بنابراین قانون فوری به صورت زیر در می آید

$$q_r = -k2\pi rL \frac{dT}{dr} \quad (۱۱-۶a)$$

با دماهای مشخص شده در شعاع داخلی و خارجی و انتگرال گرفتن از معادله (۱۱-۵) به دست می آید

$$q = \frac{T_i - T_o}{[\ln(r_o/r_i)]/2\pi kL} \quad (۱۱-۶b)$$

مخرج را می توان به صورت مقاومت حرارتی مطابق آنچه در شکل ۱۱-۴ نشان داده شده است در نظر گرفت. مطابق حالت دیوار چند صفحه ای شکل ۱۱-۳ سیستم سیلندری چند لایه ای را مطابق شکل ۱۱-۵ می توان در نظر گرفت. روابط مشابهی را می توان برای سیستمهای کروی استنتاج نمود.



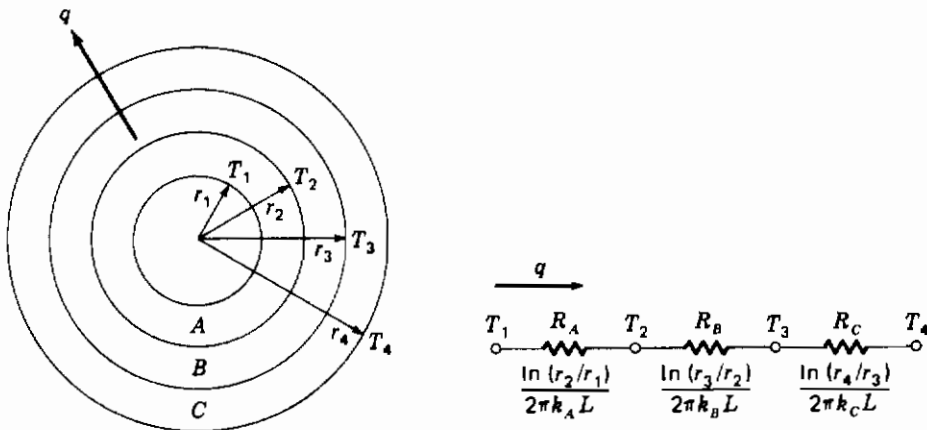
شکل ۱۱-۴ جریان حرارتی یک بعدی از میان یک سیلندر توخالی و تشابه الکتریکی

تحلیل بالا مربوط به سیستم‌های یک بعدی می‌شود که دما تابعی از یک محور مختصات فضایی می‌باشد. همچنین سیستم‌های دو بعدی وجود دارند که دما تابعی از دو محور مختصات می‌باشد. برای بعضی از موارد ساده که تنها در دو مرز حدی دما باشد انتقال حرارت می‌تواند به شکل زیر بیان شود

$$Q = kST \quad \text{کلی} \quad (۱۱-۷)$$

ضریب شکل هدایتی است که می‌توان با هر دو روش تحلیلی و آزمایشی آن را تعیین نمود. جدول ۱۱-۲ فهرست معادلاتی را می‌دهد که می‌تواند جهت محاسبه  $k$  در تعدادی از موارد به خدمت گرفته شود.

مثالها کاربرد رابطه‌های هدایت را نشان می‌دهد.

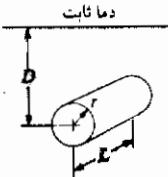

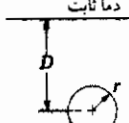
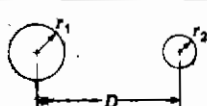






شکل ۱۱-۵ جریان حرارتی یک بعدی از میان مقاطع سیلندری چندگانه و تشابه الکتریکی

### مثال ۱۱-۱

دیوار خارجی ساختمانی را می‌توان به تقریب یک لایه ۴ in آجر معمولی ( $k = 0.7 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ) و یک لایه ۱/۵ in روکش گچی ( $k = 0.48 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ) در نظر گرفت. با چه ضخامتی باید عایق پشم سنگ ( $k = 0.065 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ) را اضافه نمود تا حرارت اتلافی (یا کسب

جدول ۲-۱۱ ضرایب شکل هدایت، خلاصه شده از مراجع [8 و 9]

سیستم فیزیکی	طرحواره	ضریب شکل	محدودیتها
سیلندر همدمای به شعاع $r$ مدفون در محیط نیمه - محدود با سطح همدمای	دما ثابت 	$\frac{2\pi L}{\cosh^{-1}(D/r)}$ $\frac{2\pi L}{\ln(2D/r)}$ $\frac{2\pi L}{\ln \frac{L}{r} \left[ 1 - \frac{\ln(L/2D)}{\ln(L/r)} \right]}$	$L \gg r$ $D > 3r$ $D \gg r$ $L \gg D$
کره همدمای با شعاع $r$ مدفون در محیط نامحدود		$4\pi r$	
کره همدمای به شعاع $r$ مدفون در محیط نیمه - محدود با سطح همدمای	دما ثابت 	$\frac{4\pi r}{1 - r/2D}$	
هدایت بین دو سیلندر همدمای مدفون در محیط نامحدود		$\frac{2\pi L}{\cosh^{-1} \left( \frac{D^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_2} \right)}$	$L \gg r$ $L \gg D$
دیسک نازک افقی مدفون در محیط نیمه - محدود با سطح همدمای	دما ثابت 	$4r$ $8r$	$D = 0$ $D \gg 2r$
نیم کره مدفون در محیط نیمه - محدود کره همدمای مدفون در محیط نیمه محدود با سطح عایق شده		$2\pi r$ $\frac{4\pi r}{1 - r/2D}$	
دو کره همدمای مدفون در محیط نامحدود		$\frac{4\pi}{\frac{r_2}{r_1} \left[ 1 - \frac{(r_1/D)^4}{1 - (r_2/D)^3} \right] - \frac{2r_2}{D}}$	$D > 5r$
صفحه نازک چهارگوش به طول $L$ ، مدفون در محیط نیمه - محدود با سطح همدمای	دما ثابت 	$\frac{\pi W}{\ln(4W/L)}$ $\frac{2\pi W}{\ln(4W/L)}$	$D = 0$ $D \gg W$



شده) از دیوار ۸۰ درصد کاهش یابد.

**حل :** اتلاف حرارت کلی با رابطه زیر داده می شود

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R_{th}}$$

چون اتلاف حرارتی با عایق پشم سنگ تنها ۲۰ درصد (۸۰ درصد کاهش) مقدار قبل از عایق خواهد بود.

$$\frac{q \text{ با عایق}}{q \text{ بدون عایق}} = 0.2 = \frac{\sum R_{th} \text{ عایق}}{\sum R_{th} \text{ بدون عایق}}$$

برای آجر و روکش به ازای واحد سطح داریم

$$R_b = \frac{\Delta x}{k} = \frac{(4)(0.0254)}{0.7} = 0.145 \text{ m}^2 \cdot \text{C/W}$$

$$R_p = \frac{\Delta x}{k} = \frac{(1.5)(0.0254)}{0.48} = 0.079 \text{ m}^2 \cdot \text{C/W}$$

و مقاومت حرارتی بدون عایق برابر است با

$$R = 0.145 + 0.079 = 0.224 \text{ m}^2 \cdot \text{C/W}$$

$$R_{\text{با عایق}} = \frac{0.224}{0.2} = 1.122 \text{ m}^2 \cdot \text{C/W} \quad \text{پس}$$

و این معرف جمع مقادیر قبلی ما و مقاومت برای پشم سنگ می باشد

$$1.122 = 0.224 + R_{rw}$$

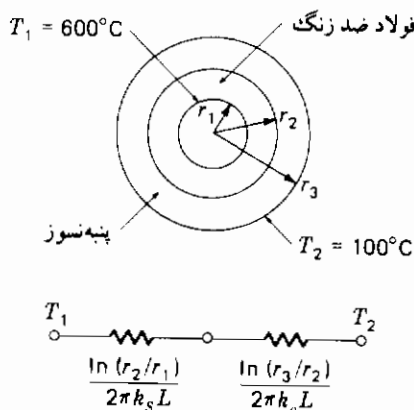
$$R_{rw} = 0.898 = \frac{\Delta x}{k} = \frac{\Delta x}{0.065}$$

بنابراین

$$\Delta x_{rw} = 0.0584 \text{ m} = 2.3 \text{ in}$$

## مثال ۱۱-۲

یک لوله جدار ضخیم از فولاد ضد زنگ (۸٪ Ni، ۱۸٪ Cr،  $k = ۱۹ \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ) با قطر داخلی (ID) ۲ cm و قطر خارجی (OD) ۴ cm با لایه‌ای از عایق پنبه نسوز ( $k = ۰.۲ \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ) به ضخامت ۳ cm پوشیده می‌شود. اگر دمای دیواره داخلی لوله در  $۶۰۰^\circ\text{C}$  و خارج عایق در  $۱۰۰^\circ\text{C}$  نگهداشته شود، حرارت اتلافی را به ازای هر متر طول محاسبه کنید.



شکل مثال ۱۱-۲

**حل:** شکل همراه شبکه حرارتی برای این مسأله را نشان می‌دهد. جریان حرارتی با رابطه زیر داده می‌شود

$$\frac{q}{L} = \frac{2\pi(T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)/k_s + \ln(r_3/r_2)/k_a} = \frac{2\pi(600 - 100)}{(\ln 2)/19 + (\ln 5/2)/0.2} = 680 \text{ W/m}$$

## مثال ۱۱-۳

یک سیلندر همدم با دمای سطح  $۵۰^\circ\text{C}$  و قطر ۱۵ cm در عمق ۳۰ cm (مرکز سیلندر) از سطح زمین دفن شده است و ضریب هدایت حرارتی خاک  $۱/۷ \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  است. دمای سطح زمین  $۲۰^\circ\text{C}$  است. اتلاف حرارتی به وسیله سیلندر را به ازای واحد طول محاسبه کنید.

**حل:** این مسأله دو بعدی است و با استفاده از علائم جدول ۱۱-۲،  $\frac{D}{r} = \frac{30}{15} = 2$  می‌باشد. بنابراین با استفاده از رابطه زیر:

$$q = kS\Delta T$$

انتقال حرارت محاسبه می‌شود و از جدول ۱۱-۲

$$S = \frac{2\pi L}{\cosh^{-1}(D/r)}$$

با توجه به این که:

$$\cosh^{-1}x = \ln(x \pm \sqrt{x^2 - 1})$$

داریم

$$\cosh^{-1} \frac{D}{r} = \cosh^{-1} \frac{30}{15} = 1.317$$

و برای واحد طول:

$$S = \frac{2}{1.317} = 4.77$$

$$q = kS\Delta T = (1.7)(4.77)(50 - 20) = 24.3 \text{ W/m}$$

و

### ۱۱-۳ هدایت گذرا

تاکنون ما هدایت در حالت دائم را در نظر گرفته‌ایم که دما با زمان تغییر نمی‌کند. یقیناً مسائل زیادی وجود دارد که باید در حالت گذرا در نظر گرفت که دما با زمان تغییر می‌کند. با تنها یک حالت ساده یعنی سرمایش جسم صلبی را در محیط با جابجایی حرارت در نظر خواهیم گرفت. برای این تحلیل یک توده حرارتی<sup>۱</sup> در شکل ۱۱-۶ را در نظر می‌گیریم، که مقاومت هدایتی داخلی آن در مقابل مقاومت جابجایی در سطح کم باشد. این بدین معنی است که گرادیان دمای کوچکی در جسم وجود خواهد داشت، به طوری که در هر لحظه جسم اساساً در یک دمای یکنواخت باقی می‌ماند. سپس حرارت اتلافی به وسیله جابجایی معادل کاهش انرژی داخلی جسم صلب خواهد بود یا

$$hA(T - T_{\infty}) = -\rho cV \frac{dT}{d\tau} \quad (۱۱-۸)$$

$T$  دمای جسم،  $T_{\infty}$  دمای جریان،  $A$  مساحت سطح برای جابجایی،  $\rho$  دانسیته جسم،  $c$  گرمای مخصوص و  $V$  حجم می‌باشد. اگر جسم ابتدا در  $T_0$  باشد، داریم

$$T = T_0 \quad \tau = 0 \text{ در}$$

با انتگرال گرفتن از معادله (۱۱-۸) نتیجه می‌گیریم

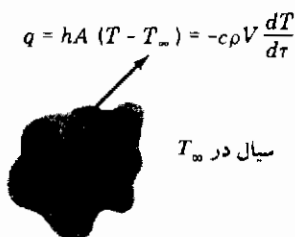
$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{-(hA/\rho cV)\tau} \quad (۱۱-۹)$$

همان طور که قبلاً اشاره شد، تحلیل با ظرفیت حرارتی یکپارچه را می‌توان هنگامی که مقاومت هدایتی در مقابل مقاومت جابجایی کوچک باشد به کار برد. در عمل این روش معمولاً هنگامی به کار می‌رود که:

$$\frac{h(V/A)}{k} < 0.1 \quad (۱۱-۱۰)$$

معادله (۱۱-۹) را می‌توان بر حسب مقاومت حرارتی برای جابجایی  $R_{th} = \frac{1}{h} A$  و خازن حرارتی با ظرفیت  $C_{th} = \rho cV$  بیان نمود، به طوری که

$$\frac{hA}{\rho cV} = \frac{1}{R_{th}C_{th}}$$



شکل ۱۱-۶ لیست علائم برای تحلیل ظرفیت حرارتی برای توده تنها

و سیستم نظیر خازنی الکتریکی که از طریق یک مقاومت تخلیه می شود رفتار می نماید.

### مثال ۴-۱۱

گلوله ای فولادی را ( $k = 35 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ،  $c = 0.46 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ) به قطر ۵ cm که در ابتدا در دمای یکنواخت  $450^\circ\text{C}$  می باشد ناگهان در محیطی قرار می دهیم که دمای آن در  $100^\circ\text{C}$  کنترل می شود. ضریب انتقال حرارت جابجایی  $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  است. زمان لازم را برای رسیدن دمای گلوله به درجه حرارت  $150^\circ\text{C}$  محاسبه کنید.

**حل:** فرض می کنیم که روش ظرفیت توده ای قابل کاربرد است زیرا مقدار  $h$  کم و مقدار  $k$  زیاد است. می توانیم با به کارگیری معادله ۱۱-۹ این امر را کنترل نماییم.

$$\frac{h(V/A)}{k} = \frac{(10)[(4.3)\pi(0.025)^3]}{4\pi(0.025)^2(35)} = 0.0023 < 0.1$$

بنابراین می توان از معادله (۱۱-۹) استفاده کرد. داریم:

$$T = 150^\circ\text{C} \quad \rho = 7800 \text{ kg/m}^3 \quad (486 \text{ lbm/ft}^3)$$

$$T_\infty = 100^\circ\text{C} \quad h = 10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \quad (1.76 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F})$$

$$T_0 = 450^\circ\text{C} \quad c = 460 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C} \quad (0.11 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{F})$$

$$\frac{hA}{\rho c V} = \frac{(10)4\pi(0.025)^2}{(7800)(460)(4\pi/3)(0.025)^3} = 3.344 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = e^{-(hA/\rho c V)\tau}$$

$$\frac{150 - 100}{450 - 100} = e^{-3.344 \times 10^{-4}\tau}$$

$$\tau = 5819 \text{ s} = 1.62 \text{ h}$$

#### ۴-۱۱ انتقال حرارت جابجایی

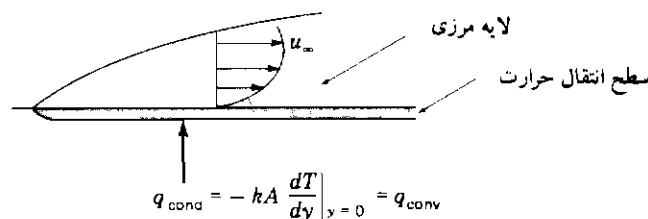
اشاره کرده‌ایم که انتقال حرارت جابجایی در اثر حرکت سیال بر روی سطح گرم صورت می‌گیرد. انتقال انرژی بستگی به سرعتی دارد که سیال می‌تواند حرارت را به خارج جابجا یا منتقل کند. برای جریان سیال به هم پیوسته (یک پارچه) سرعت لایه سیال نزدیک سطح انتقال حرارت صفر است در نتیجه تمام انتقال حرارت به صورت جابجایی بوسیله هدایت از طریق این لایه ساکن صورت می‌گیرد. بر حسب شکل ۷-۱۱ داریم

$$\begin{aligned} q_{\text{جابجایی}} &= q \text{ (هدایت در لایه سطح)} \\ &= -kA \frac{dT}{dy} \Big|_{y=0} \end{aligned}$$

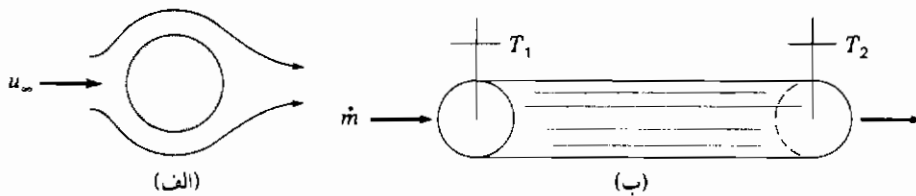
که  $k$  ضریب هدایت حرارتی سیال می‌باشد. ناحیه نزدیک صفحه که گرادین سرعت قابل ملاحظه‌ای دارد، لایه مرزی نامیده می‌شود.

سه نوع اصلی انتقال حرارت جابجایی وجود دارد:

- ۱ - جابجایی اجباری که سیال از روی سطح مطابق اشکال ۷-۱۱ و الف ۸-۱۱ یا از میان لوله یا کانالی، مشابه شکل ب ۸-۱۱، عبور داده می‌شود.
- ۲ - جابجایی آزاد یا طبیعی از روی سطوح مطابق شکل ۹-۱۱ نشان داده شده است. جابجایی آزاد نتیجه آن است که دانسته سیال نزدیک سطح گرم کاهش می‌یابد و در نتیجه در اثر نیروی شناوری به بالا حرکت خواهد کرد. هرچه اختلاف دمای سطح گرم شده و



شکل ۷-۱۱ انتقال حرارت جابجایی از صفحه مسطح



شکل ۸-۱۱ (الف) جریان عرضی بر روی یک سیلندر (ب) جابجایی اجباری در یک لوله

سیال بزرگتر باشد، نیروی شناوری نیز بیشتر خواهد بود.

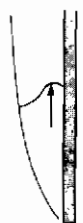
۳ - انتقال حرارت جابجایی با تغییر فاز آن گونه که در پدیده‌هایی چون جوش و تقطیر مشاهده می‌شود. مکانیزم این فرآیند خیلی پیچیده است و خواننده برای اطلاعات بیشتر باید به مراجع رجوع کند.

همان طور که قبلاً اشاره شد، یک روش متداول در انتقال حرارت جابجایی تعریف ضریب

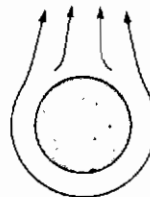
انتقال حرارت  $h$  می‌باشد:

$$q_{\text{جابجایی}} = hA(T_{\text{سطح}} - T_{\text{سیال}}) \quad (11-11)$$

که  $h$  بر حسب  $\text{W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$  است و  $A$  مساحت سطح برای انتقال حرارت جابجایی است. معادله



(الف)



(ب)

شکل ۹-۱۱ جابجایی آزاد بر روی (الف) صفحه قائم و (ب) سیلندر افقی

(۱۱-۱۱) بعضی اوقات قانون نیوتن (سرمایش) نامیده می شود.

در جابجایی اجباری در خارج سطوح سیال  $T$  دمای جریان آزاد  $T_{\infty}$  یا دمای سیال در دوردست سطح اندازه گیری می شود. برای جریان در لوله ها یا کانالها سیال  $T$  دمای انبوه یا دمای میانگین انرژی گرفته می شود. در موازنه های ترمودینامیکی دستگاههایی نظیر گرمکنهای آب تغذیه و کویل های سرمایش تهویه مطبوع، دماهای "ورودی" و "خروجی" مشخص شده در حقیقت دماهای میانگین می باشد.

انتقال حرارت جابجایی بستگی به خواص سیال دارد و آن نیز خود بستگی به دما دارد. در خیلی از مسائل عملی بستگی دما خیلی شدید نیست، اما وجود دارد. برای بیشتر مسائل جابجایی اجباری و آزاد محاسبات قابل قبولی را می توان با تعیین خواص در آنچه دمای فیلم  $T_f$  نامیده و به صورت زیر تعریف می شود، صورت داد.

$$T_f = \frac{T_{\text{سطح}} + T_{\text{جریان آزاد}}}{2} \quad (۱۱-۱۲)$$

در حالی که برای جریان در کانالها محاسبه در دمای متوسط معمولاً صحیح می باشد

$$T_b = \frac{T_{b \text{ خروجی}} + T_{b \text{ ورودی}}}{2} \quad (۱۱-۱۳)$$

در طول دهها سال محققین و کارورزان توانسته اند رابطه های تحلیلی و تجربی زیادی را برای ضریب انتقال حرارت در حالات مختلف به دست آورند. تقریباً در تمام حالات نتایج را می توان با متغیرهای بدون بعد به شکل زیر بیان کرد:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad \text{برای جابجایی اجباری} \quad (۱۱-۱۴)$$

و

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad \text{برای جابجایی آزاد} \quad (۱۱-۱۵)$$

این جملات در جداول ۱۱-۳ و ۱۱-۴ تعریف شده اند.

به طور کلی انتقال حرارت جابجایی بستگی به رفتار جریان سیال دارد که به وسیله عدد رینولدز



جدول ۳-۱۱ گروه‌های بدون بعد به کار برده شده در انتقال حرارت جابجایی

اسم	علامت	رابطه
عدد گراشف	Gr	$Gr_x = \frac{g\beta\rho^2(T_w - T_\infty)x^3}{\mu^2}$
		$Gr_L =$ با $x = L$ همان
		$Gr_d = \frac{g\beta\rho^2(T_w - T_\infty)d^3}{\mu^2}$
عدد نوسلت	Nu	$Nu_x = \frac{h_x x}{k}$
		$Nu_d = \frac{hd}{k}$
عدد نوسلت، متوسط	$\bar{Nu}$	$\bar{Nu}_L = \frac{hL}{k}$
		$\bar{Nu}_d = \frac{\bar{h}d}{k}$
عدد رینولدز	Re	$Re_x = \frac{\rho u_\infty x}{\mu} = \frac{u_\infty x}{\nu}$
		$Re_L = \frac{\rho u_\infty L}{\mu} = \frac{u_\infty L}{\nu}$
		$Re_d = \frac{\rho u_\infty d}{\mu} = \frac{u_\infty d}{\nu}$
		$Re_d = \frac{\rho u_m d}{\mu} = \frac{u_m d}{\nu}$
عدد پرانتل	Pr	$Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha}$

در جابجایی اجباری، و به وسیله عدد گراشف در جابجایی آزاد مشخص می‌گردد. این پارامترها تعیین می‌کنند که جریان آرام یا مغشوش است. عدد پرانتل نسبت انتقال محتوم و انتقال انرژی در سیال را

جدول ۴-۱۱ خواص و پارامترهای به کار برده شده در گروه‌های بدون بعد

علامت	خواص و یا پارامتر	واحد
$A$	مساحت سطح برای انتقال حرارت	$m^2$ یا $ft^2$
$A_c$	سطح مقطع جریان در لوله جریان $\frac{\pi d^2}{4}$	$m^2$ یا $ft^2$
$d$	قطر سیلندر یا لوله	$m$ یا $ft$
$g$	شتاب ثقل	$m/s^2$ یا $ft/s^2$
$h_x$	ضریب انتقال حرارت محلی در فاصله $x$ از لبه سطح	$W/m^2 \cdot ^\circ C$ یا $Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$
$h$	ضریب انتقال حرارت متوسط بر روی کل سطح یا سیلندر یا لوله داخل	$W/m^2 \cdot ^\circ C$ یا $Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$
$k$	ضریب هدایت حرارتی	$W/m \cdot ^\circ C$ یا $Btu/h \cdot ft \cdot ^\circ F$
$L$	طول صفحه مسطح	$m$ یا $ft$
$m$	نرخ جرمی جریان	$kg/s$ یا $lbm/h$
$T_b$	دمای میانگین در جریان لوله	$^\circ C$ یا $^\circ F$
$T_b$	دمای میانگین متوسط در جریان لوله	$^\circ C$ یا $^\circ F$
$T_f = \frac{T_\infty + T_w}{2}$	دمای فیلم	$^\circ C$ یا $^\circ F$
$T_\infty$	دمای جریان آزاد	$^\circ C$ یا $^\circ F$
$T_w$	دمای دیوار یا سطح	$^\circ C$ یا $^\circ F$
$u_\infty$	سرعت جریان آزاد در عرض صفحه یا سیلندر	$m/s$ یا $ft/s$
$u_m$	سرعت جریان متوسط در لوله تعریف شده به وسیله $\dot{m} = \rho u_m A_c$	$m/s$ یا $ft/s$
$x$	فاصله از لبه جلویی صفحه	$m$ یا $ft$
$\beta = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$	ضریب انبساط حجمی $\left( \frac{1}{\text{دمای مطلق برای گاز ایده آل}} \right)$	$K^{-1}$ یا $^\circ R^{-1}$
$\mu$	لزجت دینامیکی	$kg/m \cdot s$ یا $lbm/h \cdot ft$
$\nu = \frac{\mu}{\rho}$	لزجت سینماتیکی	$m^2/s$ یا $ft^2/s$
$\rho$	چگالی	$kg/m^3$ یا $lbm/ft^3$

تعیین می‌کند. معادلات برای رابطه‌های انتقال حرارت در جدولهای ۱۱-۵ و ۱۱-۶ خلاصه شده است. همان طور که قبلاً دیدیم انتقال حرارت جابجایی را می‌توان بر حسب مفهوم مقاومت حرارتی بیان نمود

$$q = hA(T_{\text{سطح}} - T_{\text{سیال}}) = \frac{T_{\text{سطح}} - T_{\text{سیال}}}{1/hA} \quad (11-16)$$

برای دیوار مستوی که در معرض دو محیط جابجایی  $T_A$  و  $T_B$  مطابق شکل ۱۱-۱۰ قرار گرفته است، داریم

$$\begin{aligned} q &= \frac{T_A - T_1}{1/h_A A} = \frac{T_1 - T_2}{\Delta x/kA} = \frac{T_2 - T_B}{1/h_B A} \\ &= \frac{T_A - T_B}{1/h_A A + \Delta x/kA + 1/h_B A} \end{aligned} \quad (11-17)$$

می‌بینیم که ما دارای سه مقاومت به صورت سری هستیم: ۲ تا جابجایی و یک هدایتی. روش مشابهی را می‌توان برای یک سیلندر توخالی مطابق شکل ۱۱-۱۱ به کار گرفت و انتقال حرارت کلی برابر است با

$$q = \frac{T_A - T_B}{1/h_i A_i + [\ln(r_o/r_i)]/2\pi kL + 1/h_o A_o} \quad (11-18)$$

که  $T_A$  و  $T_B$  دمای سیال داخلی و سیال خارجی است.

#### روش محاسباتی برای انتقال حرارت جابجایی

اگرچه جمع‌آوری فرمولها به نظر کمی سخت می‌آید، اما محاسبات ضرایب انتقال حرارت جابجایی هنگامی که مراحل زیر طی شود، تقریباً ساده است.

- ۱ - تعیین این که مسأله جابجایی آزاد و یا اجباری است.
- ۲ - تعیین کردن شکل هندسی
- ۳ - تعیین رژیم جریان به وسیله محاسبه عدد رینولدز در جابجایی اجباری یا حاصل ضرب عدد گراشف - پرانتل در جابجایی آزاد. باید مطمئن بود که برای محاسبه خواص سیال دمای

جدول ۵-۱۱ روابط انتقال حرارت جابجایی برای جابجایی اجباری  
(برای تعریف جملات به جداول ۱۱-۳ و ۱۱-۴ مراجعه کنید)

خواص محاسبه شده در

جریان در لوله مدور

$$\Delta T_b = T_{b2} - T_{b1}$$

$$q = \bar{h}A(T_w - \bar{T}_b) = \dot{m}c_p\Delta T_b$$

$$Re_d = \frac{\rho u_m d}{\mu} < 2000 \quad \text{و} \quad \frac{L/d}{Re_d Pr} > 0.05 \quad \text{جریان آرام کاملاً توسعه یافته:}$$

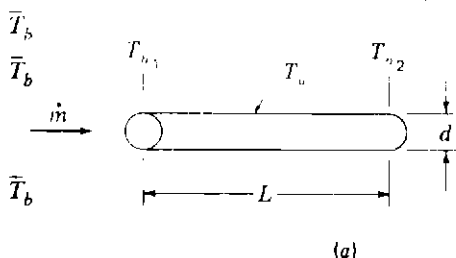
$$\bar{Nu}_d = 4.364 \quad \text{ثابت برای شار حرارتی (دیواره ثابت)}$$

$$\bar{Nu}_d = 3.66 \quad \text{ثابت برای دمای دیواره ثابت}$$

$$Re_d = \frac{\rho u_m d}{\mu} > 2000 \quad \text{جریان مضطرب کاملاً توسعه یافته:}$$

$$Nu_d = 0.023 Re_d^{0.8} Pr^n \quad n = 0.4 \quad \text{برای گرمایش}$$

$$n = 0.3 \quad \text{برای سرمایش}$$



جریان بر روی صفحه تخت، دمای دیواره ثابت

$$q = \bar{h}A(T_w - T_\infty)$$

$$Re_L < 5 \times 10^5 \quad \text{جریان آرام:}$$

$$Nu_x = 0.332 Re_x^{1/2} Pr$$

$$\bar{Nu}_L = 0.664 Re_L^{1/2} Pr$$

$$Re_L > 5 \times 10^5 \quad \text{جریان مضطرب:}$$

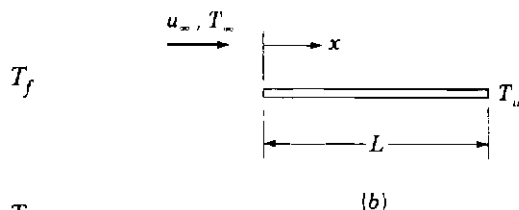
$$Nu_x = 0.0296 Re_x^{0.8} Pr^{1/3}$$

$$\bar{Nu}_L = (0.0374 Re_L^{0.8} - 850) Pr^{1/3}$$

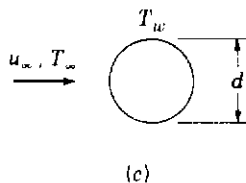
جریان در عرض سیلندر، دمای دیواره ثابت

$$q = \bar{h}A(T_w - T_\infty)$$

$$\bar{Nu}_d = C Re_d^n Pr^{1/3}$$



$n$	$C$	$Re_d$
0.330	0.989	0.4-4
0.385	0.911	4-40
0.466	0.683	40-4000
0.618	0.193	4000-40000
0.805	0.0266	40000-400000



جریان در عرض کره، دمای دیواره ثابت

$$\bar{Nu}_d = 0.37 Re_d^{0.6} \quad \text{گازها:}$$

$$\bar{Nu}_d = (1.2 + 0.53 Re_d^{0.54}) Pr^{0.3} \quad \text{آب و روغن:}$$

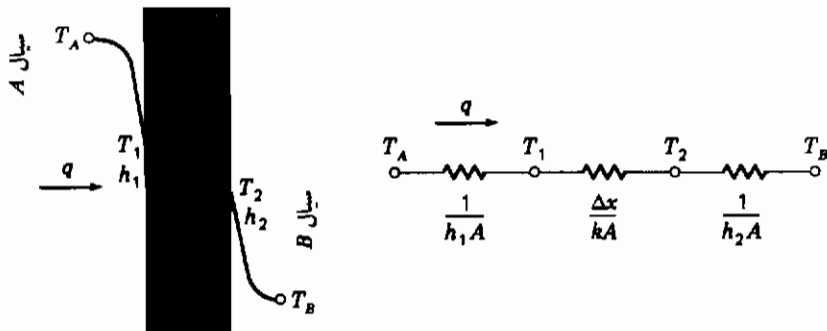
خطوط بالای  $\bar{Nu}$  و  $\bar{h}$  معرف مقادیر متوسط برای کل سطح انتقال حرارت

$T_f$

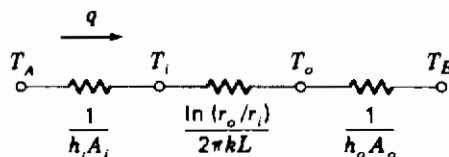
$T_f$

جدول ۱۱-۶ روابط انتقال حرارت جابجایی برای جابجایی آزاد، دمای ثابت سطح

رابطه کلی $\overline{Nu} = C(GrPr)^m$ با خواص محاسبه شده در دمای فیلم			
$m$	$C$	$GrPr$	
$1/4$	$0.59$	$10^4 - 10^9$	صفحات و سیلندره‌های عمودی
$1/3$	$0.10$	$10^9 - 10^{13}$	
$0.58$	$0.675$	$10^{-1} - 10^{-2}$	سیلندره‌های افقی
$0.148$	$1.02$	$10^{-2} - 10^2$	
$0.188$	$0.85$	$10^2 - 10^4$	
$1/4$	$0.53$	$10^4 - 10^9$	
$1/3$	$0.13$	$10^9 - 10^{12}$	
$1/4$	$0.54$	$2 \times 10^4 - 8 \times 10^6$	سطح بالایی صفحات گرم شده یا سطح پایینی صفحات سرد شده
$1/3$	$0.15$	$8 \times 10^6 - 10^{11}$	سطح بالایی صفحات گرم شده یا سطح پایینی صفحات سرد شده
$1/5$	$0.58$	$10^5 - 10^{11}$	سطح پایینی صفحات گرم شده یا سطح بالایی صفحات سرد شده



شکل ۱۱-۱۰ انتقال حرارت کلی از میان دیوار مستوی



شکل ۱۱-۱۱ تشابه مقاومتی برای سیلندر توخالی با مرزهای جابجایی

مناسب مورد استفاده قرار گیرد. معمولاً دمای فیلم برای جریان خارجی و دمای متوسط برای جریان دمای داخلی می‌باشد.

۴ - انتخاب معادلات مناسب از جداول ۱۱-۵ و ۱۱-۶ بر اساس سه مرحله بالا و محاسبه مقدار  $h$ ، ضریب انتقال حرارت جابجایی.

۵ - در صورت لزوم محاسبه نرخ انتقال حرارت  $q$  یا مساحت سطح از معادله (۱۱-۱۱).

خواص فیزیکی برای هوا و آب که باید در محاسبات انتقال حرارت مورد استفاده قرار گیرند در جداول B-۳ و B-۴ ضمیمه B داده شده‌اند. مثالهای زیرین نشان دهنده مفاهیم برای محاسبه انتقال حرارت جابجایی است. اکثر رابطه‌های انتقال حرارت جابجایی ارائه شده در این جا و سایر جاها در مجموعه برنامه‌های کامپیوتری به وسیله [7] Kraus در اختیار می‌باشند.

### مثال ۱۱-۵

هوا در ۱ atm و ۳۰۰ K در عرض یک سیلندر به قطر ۵ cm با سرعت ۵۰ m/s جریان دارد. سیلندر در دمای ثابت ۴۰۰ K نگهداشته می‌شود. حرارت اتلافی را به ازای واحد طول سیلندر محاسبه کنید.

حسب: با مراجعه به جدول ۱۱-۵ و یافتن رابطه زیر برای محاسبه ضریب انتقال حرارت:

$$Nu_d = \frac{hd}{k} = C Re_d^m Pr^{1/3}$$

با خواص محاسبه شده در دمای فیلم  $T_f$ :

$$T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2} = \frac{400 + 300}{2} = 350 \text{ K}$$

از جدول B-۳ خواص هوا در  $350 \text{ K}$  چنین است:

$$\nu = 20.76 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad k = 0.03003 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad \text{Pr} = 0.697$$

$$\text{Re}_d = \frac{u_\infty d}{\nu} = \frac{(50)(0.05)}{20.76 \times 10^{-6}} = 1.204 \times 10^5$$

بنابراین

دو مرتبه با مراجعه به جدول ۱۱-۵ پیدا می‌کنیم که:

$$C = 0.0266 \quad n = 0.805$$

بنابراین داریم:

$$\frac{\bar{h}d}{k} = (0.0266)(1.204 \times 10^5)^{0.805}(0.697)^{1/3} = 290.1$$

و

$$\bar{h} = \frac{(290.1)(0.03003)}{0.05} = 174 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$$

برای واحد طول، مساحت سطح سیلندر برابر است با

$$A = \pi d = \pi(0.05) = 0.1571 \text{ m}^2/\text{m}$$

بنابراین انتقال حرارت برابر است با

$$q = hA(T_w - T_\infty) = (174)(0.1571)(400 - 300) = 2733 \text{ W/m}$$

## مثال ۱۱-۶

آب از  $50^\circ\text{F}$  تا  $70^\circ\text{F}$  در لوله‌ای به قطر  $2 \text{ cm}$  که در  $120^\circ\text{F}$  نگهداشته شده است، حرارت می‌باید. نرخ جریان  $11 \text{ kg/min}$  است. طول لوله لازم برای انجام این گرمایش را محاسبه کنید.

**حل:** با مراجعه به جدول ۵-۱۱ می‌بینیم که خواص برای این نوع مسأله در دمای میانگین متوسط محاسبه می‌شود. بنابراین

$$T_b = \frac{50 + 70}{2} = 60^\circ\text{F}$$

و از جدول B-۴ خواص آب برابر است با

$$c_p = 4186 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\rho = 999 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1.12 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

$$k = 0.595 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\text{Pr} = 7.88$$

رژیم جریان به وسیله محاسبه عدد رینولدز تعیین می‌شود.

$$\text{Re}_d = \frac{\rho u_m d}{\mu}$$

سرعت متوسط جریان به صورت زیر تعیین می‌شود

$$\dot{m} = \rho \frac{\pi d^2}{4} u_m$$

$$u_m = \frac{11/60}{(999)\pi(0.02)^2/4} = 0.584 \text{ m/s}$$

$$\text{Re}_d = \frac{(999)(0.584)(0.02)}{1.12 \times 10^{-3}} = 10421 > 2000$$

و

بنابراین جریان مغشوش است و از رابطه زیر استفاده می‌کنیم

$$\overline{\text{Nu}}_d = \frac{\bar{h}d}{k} = 0.023 \text{ Re}_d^{0.8} \text{ Pr}^{0.4}$$

جهت محاسبه  $\bar{h}$ :

$$\overline{\text{Nu}}_d = (0.023)(10421)^{0.8}(7.88)^{0.4} = 86.03$$



$$\bar{h} = \frac{(86.03)(0.595)}{0.02} = 2560 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \quad \text{و}$$

انتقال حرارت کلی برابر است با

$$q = \dot{m} c_p \Delta T_b = \left( \frac{11}{60} \right) (4186) (70 - 50) \left( \frac{5}{9} \right) = 8527 \text{ W}$$

و این همچنین معادل است با:

$$q = \bar{h} A (T_w - T_b)$$

که مساحت سطح برای جابجایی برابر است با  $A = \pi d L$ . بنابراین

$$q = 8527 \text{ W} = (2560)(\pi)(0.02) L (120 - 60) \left( \frac{5}{9} \right)$$

$$L = 1.59 \text{ m} \quad \text{و}$$

### مثال ۱۱-۷

هوا در  $1 \text{ atm}$  و  $300 \text{ K}$  در عرض یک صفحه مربع شکل  $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$  در سرعت  $50 \text{ m/s}$  جریان می‌یابد. صفحه در دمای ثابت  $400 \text{ K}$  نگهداشته می‌شود. حرارت اتلافی به وسیله صفحه را محاسبه کنید.

**حل:** با مراجعه به جدول ۵-۱۱ در می‌یابیم که خواص برای این هندسه در دمای فیلم حساب می‌شود. برای هوا در  $1 \text{ atm}$  از جدول B-۳ به دست می‌آوریم:

$$T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2} = \frac{400 + 300}{2} = 350 \text{ K}$$

$$\nu = 20.76 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad k = 0.03003 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C} \quad \text{Pr} = 0.697 \quad \text{و}$$

حالا باید عدد رینولدز را برای تعیین رژیم جریان و در نتیجه رابطه مورد استفاده برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی به دست آوریم:

$$Re_L = \frac{u_{\infty} L}{\nu} = \frac{(50)(0.5)}{20.76 \times 10^{-6}} = 1.204 \times 10^6$$

بنابراین از جدول ۱۱-۵ رابطه برای تعیین  $h$  برابر است با

$$\begin{aligned} \overline{Nu}_L &= \frac{\bar{h}L}{k} = (0.037 Re_L^{0.8} - 850) Pr^{1/3} \\ &= [(0.037)(1.204 \times 10^6)^{0.8} - 850](0.697)^{1/3} = 1648 \end{aligned}$$

$$\bar{h} = \frac{(1648)(0.03003)}{0.5} = 99 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \quad \text{و}$$

مساحت سطح برای جابجایی برابر است با  $A = 0.5 \times 0.5 = 0.25 \text{ m}^2$  بنابراین

$$q = \bar{h}A (T_w - T_{\infty}) = (99)(0.25)(400 - 200) = 2475 \text{ W}$$

### مثال ۸-۱۱

سیلندر افقی به قطر ۶ cm در معرض هوای ساکن اطاق در ۱ atm و ۳۰۰ K قرار می‌گیرد. سطح سیلندر در دمای ثابت ۴۰۰ K نگهداشته می‌شود. حرارت اتلافی را از سیلندر به‌ازای واحد طول محاسبه کنید.

**حل:** این مسأله جابجایی آزاد است زیرا هیچ گونه حرکت اجباری هوا در عرض سطح انتقال حرارت وجود ندارد. با مراجعه به جدول ۱۱-۶، خواص سیال در دمای فیلم را به‌دست می‌آوریم:

$$T_f = \frac{T_w + T_{\infty}}{2} = \frac{400 + 300}{2} = 350 \text{ K}$$

از جدول B-۳، خواص هوا در ۱ atm برابر است با

$$\rho = 0.998 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 2.075 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$$

$$k = 0.03003 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$Pr = 0.697$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{350} = 0.00286$$

رژیم جریان به وسیله محاسبه حاصل ضرب عدد گراشف - پرانتل تعیین می شود:

$$\begin{aligned} Gr_d Pr &= \frac{g \beta \rho^2 (T_w - T_\infty) d^3}{\mu^2} Pr \\ &= \frac{(9.8)(0.00286)(0.998)^2(400 - 300)(0.06)^3}{(2.075 \times 10^{-5})^2} 0.697 \\ &= 9.76 \times 10^5 \end{aligned}$$

از جدول ۱۱-۶ به دست می آوریم

$$\overline{Nu}_d = C(Gr Pr)^n$$

$$و \quad C = 0.53, n = \frac{1}{4} \quad \text{بنابراین}$$

$$\overline{Nu}_d = (0.53)(9.76 \times 10^5)^{1/4} = 16.66$$

$$\bar{h} = \frac{(16.66)(0.03003)}{0.06} = 8.34 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \quad \text{و}$$

مساحت سطح به ازای واحد طول برابر است با  $A = \pi d = \pi(0.06) = 0.1884 \text{ m}^2/\text{m}$

بنابراین انتقال حرارت برابر است با

$$q = \bar{h} A (T_w - T_\infty) = (8.34)(0.1884)(400 - 300) = 157 \text{ W/m}$$

## ۱۱-۵ انتقال حرارت تابشی

همان طور که قبلاً اشاره کردیم تابش حرارتی، تابش امواج الکترومغناطیس است که جسمی در نتیجه دمایش از خود ساطع می کند. اصل فیزیکی که چنین تابشی را تعیین می کند قانون استفان - بولتزمن است که می گوید انرژی منتشره به وسیله یک تابنده ایده آل، یا جسم سیاه، به ازای واحد سطح

در واحد زمان متناسب با توان چهارم دمای مطلق است. بنابراین

$$\frac{q}{A} = \sigma T^4 = E_b \quad \text{W/m}^2 \quad (۱۱-۱۹)$$

که ضریب تناسب  $\sigma$  به عنوان ثابت استفان - بولتزمن تعریف می شود و دارای مقدار زیر می باشد

$$\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 = 0.1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/h.ft}^2 \cdot ^\circ\text{R}^4 \quad (۱۱-۲۰)$$

$E_b$  توان تابشی جسم سیاه نامیده می شود. جسم سیاه جسمی است که تمام تابش برخورد کننده به آن را جذب نماید.

تابش حرارتی در طیفی از طول موجهای  $۰/۱$  تا  $۱۰۰ \mu\text{m}$  صورت می گیرد و توزیع طیفی به وسیله فرمول توزیع جسم سیاه پلانک تشریح می شود

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (۱۱-۲۱)$$

که  $\lambda$  = طول موج ،  $\mu\text{m}$

$T$  = دما ، K

$$C_1 = 3.743 \times 10^8 \text{ W}\cdot\mu\text{m}^4/\text{m}^2$$

$$C_2 = 1.4387 \times 10^4 \mu\text{m}\cdot\text{K}$$

$E_{b\lambda}$  توان نمایی تک رنگی (تک فام) جسم سیاه نامیده می شود و دارای واحد  $\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$  است.

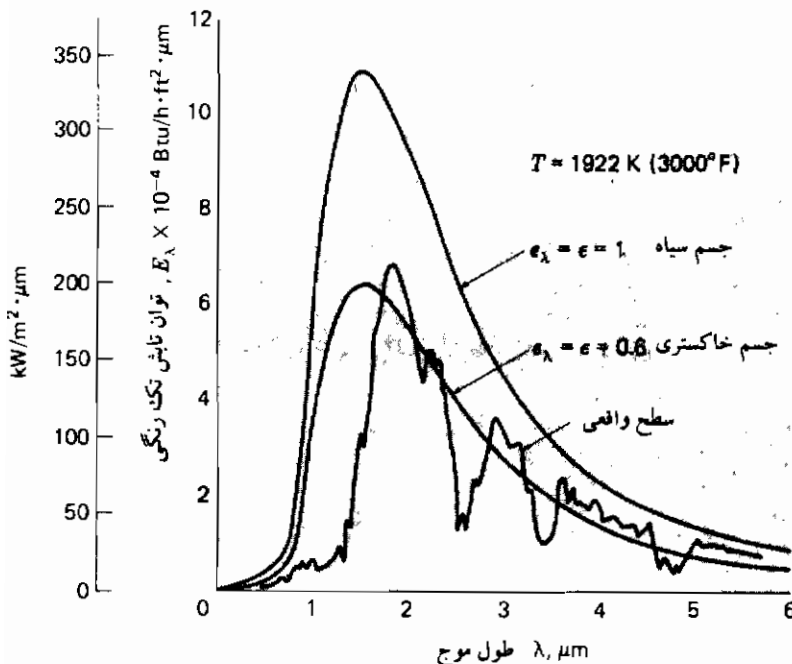
سطوح واقعی، انرژی تابشی کمتری نسبت به جسم سیاه منتشر می کنند، و خاصیت موسوم به ضریب صدور تشعشعی  $\varepsilon$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (۱۱-۲۲)$$

که  $E$  توان تابشی سطح واقعی است. جسم خاکستری به جسمی گفته می شود که ضریب صدور تشعشعی تک رنگی آن در تمام طول موجها ثابت باشد:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{b\lambda}} = \text{برای جسم خاکستری ثابت}$$

سطوح واقعی خاکستری نیستند، اما تقریباً دارای توزیع تابشی نشان داده شده در شکل ۱۱-۱۲ می‌باشند. با این وصف فرض جسم خاکستری، تقریب نسبتاً خوبی برای اکثر مسائل تابشی عملی می‌باشد.



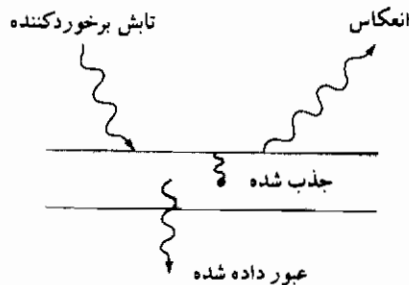
شکل ۱۱-۱۲ مقایسه حجم سیاه ایده‌آل، جسم خاکستری و سطح واقعی

هنگامی که تابش به سطحی، مشابه آنچه در شکل ۱۱-۱۳ نشان داده شده است، برخورد می‌کند، جزئی از آن به نسبت  $\rho$  منعکس می‌شود، به نسبت  $\alpha$  جذب می‌شود و به نسبت  $\tau$  از جسم عبور می‌کند. این نسبتها به ترتیب ضریب انعکاس، ضریب جذب و ضریب عبور نامیده می‌شود. می‌توان برای یک جسم خاکستری نشان داد که (به مرجع [1] مراجعه شود):

$$\varepsilon = \alpha$$

(۱۱-۲۳)

این رابطه قانون گیرشلف نامیده می‌شود. انتقال انرژی تابشی واقعی بین دو سطح ۱ و ۲ نشان داده شده



شکل ۱۱-۱۳ طرح نشان دهنده تأثیرات تابش برخورد کننده در سطح

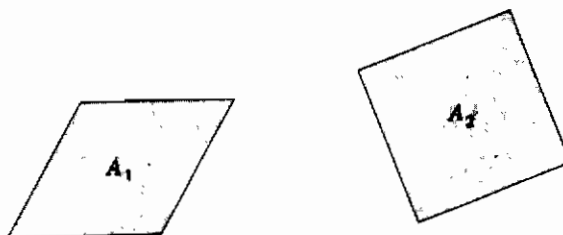
در شکل ۱۱-۱۴ بستگی به دمای دو سطح، ضریب صدور تشعشعی سطوحها و موقعیت هندسی آنها در فضا دارد. ضریب شکل تابشی،  $F_{12}$ ، به صورت نسبت انرژی خروجی از سطح ۱ که به سطح ۲ وارد می شود، تعریف می شود. به همین ترتیب  $F_{21}$  به صورت نسبت انرژی ترک شده از ۲ که در ۱ دریافت می شود تعریف می شود.  $F_{12}$  و  $F_{21}$  تنها توابع هندسی می باشند. می توان نشان داد (به مرجع [1] مراجعه شود) که رابطه متقابل زیر وجود دارد.

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \quad (۱۱-۲۴)$$

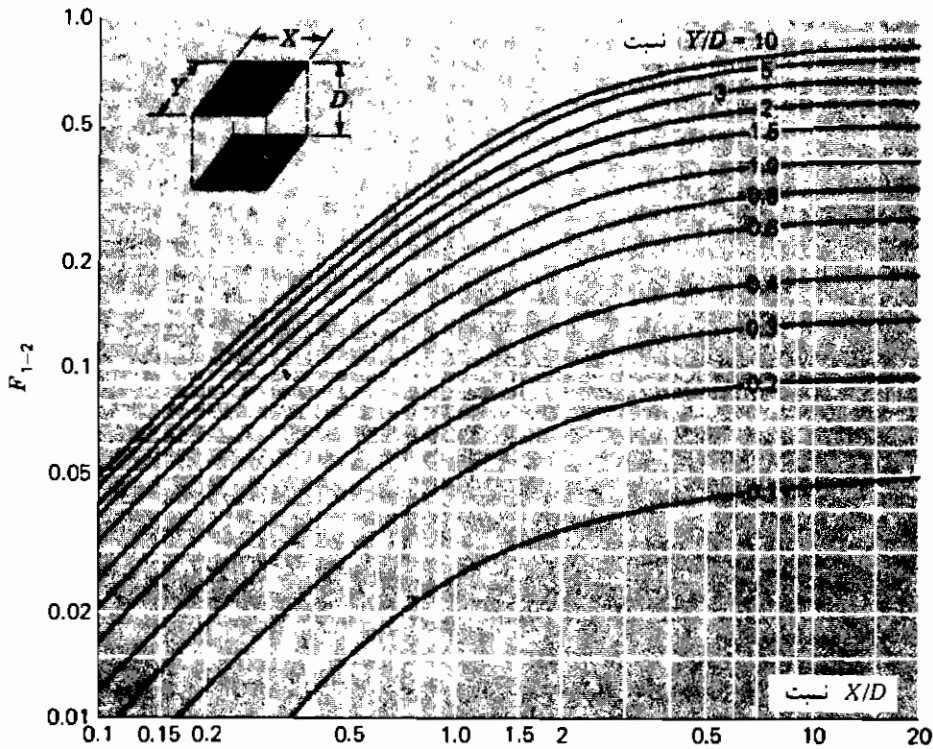
یا برای سطوح کلی  $A$  و  $z$

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (۱۱-۲۵)$$

نمودارهای  $F_{12}$  برای سه شکل هندسی مختلف در شکلهای ۱۱-۱۵ تا ۱۱-۱۷ نشان داده شده اند.



شکل ۱۱-۱۴ اثر موقعیت هندسی در تبادل تابش



شکل ۱۱-۱۵ ضریب شکل تابش برای تابش بین مربع مستطیل‌های موازی

### تجزیه و تحلیل تبادل تابشی

دو اصطلاح جدید به صورت زیر تعریف می‌شود.

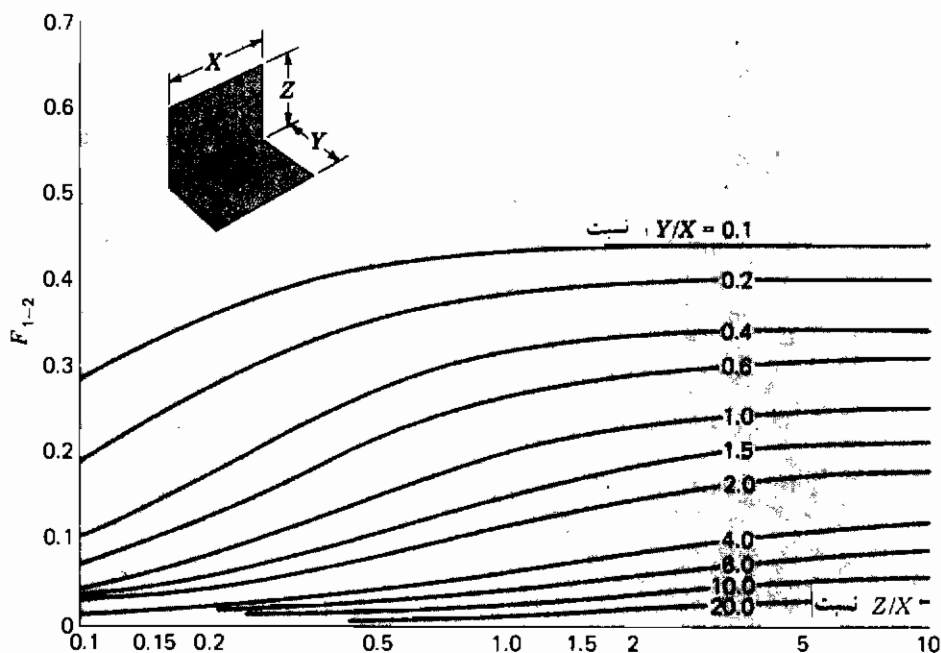
رادیوسیتی<sup>۱</sup>  $J =$  انرژی کلی ترک شده از یک سطح به ازای واحد سطح و واحد زمان (مجموع انرژیهای تابنده و منعکس شده)

تابش حرارتی<sup>۲</sup>  $G =$  انرژی کلی برخوردکننده بر سطح به ازای واحد سطح و واحد زمان.

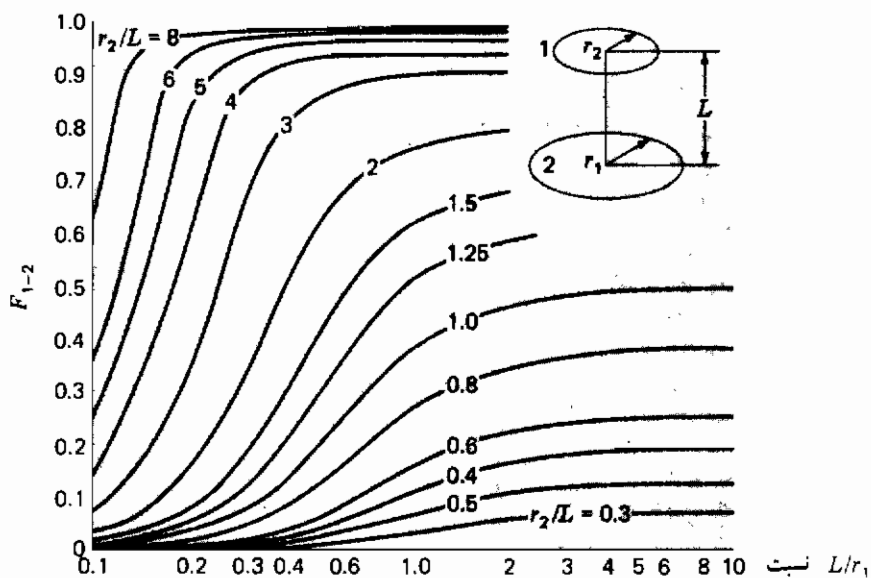
به صورت تحلیلی برای سطح کدر با  $\tau = 0$ ,

1- Radiosity

2- Irradiation



شکل ۱۱-۱۶ ضریب شکل تابش برای تابش بین مربع مستطیل‌های عمود برهم با یال مشترک



شکل ۱۱-۱۷ ضریب شکل تابش برای تابش بین دو دیسک هم مرکز موازی



$$J = \varepsilon E_b + \rho G = \varepsilon E_b + (1 - \alpha)G$$

گرمایش تابشی خالص ترک کننده سطح برابر است با

$$\frac{q}{A} = J - G$$

با قرار دادن  $\varepsilon = \alpha$  و پس از عملیات جبری

$$q = \frac{E_b - J}{(1 - \varepsilon)/\varepsilon A} \quad (11-26)$$

تشابه الکتریکی برای این معادله در شکل الف ۱۸-۱۱ نشان داده می شود. از انرژی ترک کننده سطح ۱، مقدار دریافت شده در ۲ برابر خواهد بود با

$$q_{1 \rightarrow 2} = J_1 A_1 F_{12}$$

و از انرژی ترک کننده ۲ مقدار انرژی رسیده به ۱ برابر است با

$$q_{2 \rightarrow 1} = J_2 A_2 F_{21}$$

تبادل خالص برابر است با

$$q_{12 \text{ خالص}} = J_1 A_1 F_{12} - J_2 A_2 F_{21} = \frac{J_1 - J_2}{1/A_1 F_{12}} \quad (11-27)$$

که در آن از رابطه متقابل  $A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$  استفاده شده است. تشابه الکتریکی برای معادله (۱۱-۲۷) در شکل ب ۱۸-۱۱ نشان داده شده است.

روش شبکه تابش شامل ترکیب اجزای مقاومتی بالا و سپس حل آنها برای شدت جریانها به عنوان انتقالهای حرارت، صورت می گیرد.

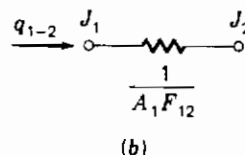
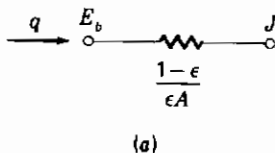
شبکه الکتریکی برای مسائل با دو و سه سطح در شکل ۱۹-۱۱ و ۲۰-۱۱ نشان داده شده است. روش عمومی این است که مقاومت سطحی بین هر  $E_b$  و هر  $J$  و مقاومت فضایی بین هر دو  $J$  متصل شود.

برای حالت خاصی که سطح ۱ به وسیله سطح خیلی بزرگ ۲ محصور شده باشد، مقاومت

در شکل ۱۹-۱۱ نسبت به دو مقاومت دیگر خیلی کم است. بعلاوه در این حالت اگر سطح ۱ محدب باشد  $F_{12} = 1$  و انتقال حرارت کلی از ۱ به ۲ برابر است با:

$$q = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{[(1 - \epsilon_1)/\epsilon_1 A_1] + (1/A_1) + 0}$$

$$= A_1 \epsilon_1 (E_{b1} - E_{b2}) = A_1 \epsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (11-28)$$



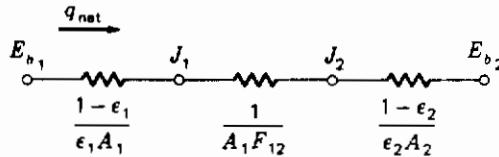
شکل ۱۱-۱۸ تشابه الکتریکی برای تابش (الف) مقاومت سطح (ب) مقاومت فضایی

### مثال ۹-۱۱

دو سیلندر طویل هم مرکز با قطرهای ۵ و ۱۰ سانتیمتر، حرارت را از طریق تابش مبادله می‌کنند. سیلندر داخلی با  $T_1 = 800 \text{ K}$  و  $E_1 = 0.65$  در حالی که سیلندر خارجی با  $T_2 = 400 \text{ K}$  و  $E_2 = 0.4$  می‌باشد. مقدار انتقال حرارت خالص بین دو سیلندر را به ازای واحد طول سیلندر محاسبه کنید.

**حل:** طرحواره این مسأله در شکل همراه و شبکه تابشی در شکل ۱۹-۱۱ نشان داده شده است. این مسأله دو جسمی است زیرا سیلندرها خیلی طویل می‌باشند و تابش خیلی کمی از انتهای آنها نشت می‌کند. بنابراین مقاومت‌های شبکه به ازای واحد طول و توانهای تابشی جسم سیاه را محاسبه می‌کنیم. تمام تابش ترک کرده سیلندر داخلی به سیلندر خارجی می‌رسد بنابراین  $F_{12} = 1$ ، سپس برای واحد طول

$$A_1 = \pi d_1 = \pi(0.05) = 0.157 \quad A_2 = \pi(0.1) = 0.314$$



شکل ۱۱-۱۹ شبکه تابشی برای دو سطح که همدیگر را می بینند و نه چیز دیگری

$$\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} = \frac{1 - 0.65}{(0.65)(0.157)} = 3.43 \quad \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2} = \frac{1 - 0.4}{(0.4)(0.314)} = 4.78$$

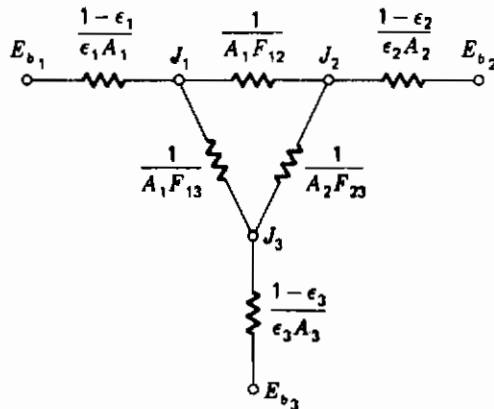
$$\frac{1}{A_1 F_{12}} = \frac{1}{(0.157)(1.0)} = 6.38$$

$$E_{b1} = \sigma T_1^4 = (5.669 \times 10^{-8})(800)^4 = 23220 \text{ W/m}^2$$

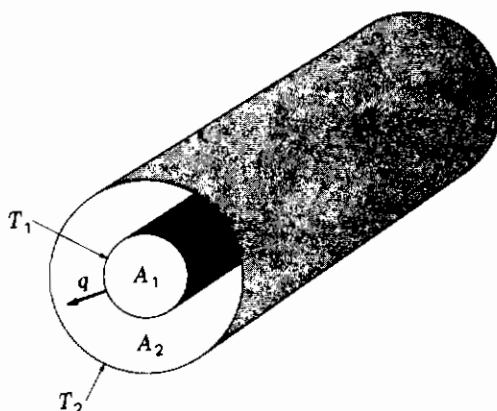
$$E_{b2} = \sigma T_2^4 = (5.669 \times 10^{-8})(400)^4 = 1451 \text{ W/m}^2$$

حالا انتقال حرارت کلی از شبکه شکل ۱۱-۱۹ به دست می آید:

$$q = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\Sigma R} = \frac{23220 - 1451}{3.43 + 6.37 + 4.78} = 1493 \text{ W/m طول}$$



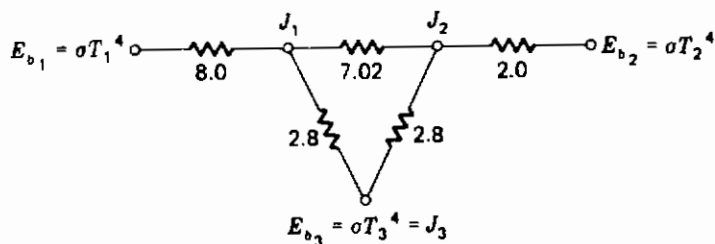
شکل ۱۱-۲۰ شبکه تابش برای سه سطحی که تنها همدیگر را می بینند و نه چیز دیگری



شکل مثال ۹-۱۱

## مثال ۱۰-۱۱ صفحات داغ در اتاق

دو صفحه موازی ۰/۵ در ۱ متر به فاصله ۰/۵ متر از همدیگر قرار دارند. یک صفحه در  $1000^{\circ}\text{C}$  و دیگری در  $500^{\circ}\text{C}$  قرار دارد. ضریب صدور تشعشی صفحات به ترتیب برابر ۰/۲ و ۰/۵ است. صفحات در داخل اتاق خیلی بزرگی قرار دارند و دیوارها در  $27^{\circ}\text{C}$  می باشند. صفحات بین خود و اتاق حرارت منتقل می کنند، اما تنها صفحات صاف مقابل همدیگر در تجزیه و تحلیل در نظر گرفته می شوند. تعداد انتقال حرارت خالص از هر صفحه و اتاق را پیدا کنید.



شکل مثال ۱۰-۱۱

**حل:** این یک مسأله سه جسمی است. دو صفحه و اتاق، بنابراین شبکه تابشی آن همانند شکل

۲۰-۱۱ نشان داده می شود. از اطلاعات مسأله داریم

$$T_1 = 1000^\circ\text{C} = 1273 \text{ K} \quad A_1 = A_2 = 0.5 \text{ m}^2$$

$$T_2 = 500^\circ\text{C} = 773 \text{ K} \quad \varepsilon_1 = 0.2$$

$$T_3 = 27^\circ\text{C} = 300 \text{ K} \quad \varepsilon_2 = 0.5$$

چون سطح اتاق  $A_3$  خیلی بزرگ است، مقاومت  $\frac{(1 - \varepsilon_3)}{\varepsilon_3 A_3}$  می تواند صفر در نظر گرفته شود و  $E_{b3} = J_3$  را به دست می آوریم. ضریب شکل از شکل ۱۵-۱۱ به دست می آید:

$$F_{12} = 0.285 = F_{21}$$

$$F_{13} = 1 - F_{12} = 0.715$$

$$F_{23} = 1 - F_{21} = 0.715$$

مقاومتها در شبکه به صورت زیر محاسبه می شوند

$$\begin{aligned} \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} &= \frac{1 - 0.2}{(0.2)(0.5)} = 8.0 & \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2} &= \frac{1 - 0.5}{(0.5)(0.5)} = 2.0 \\ \frac{1}{A_1 F_{12}} &= \frac{1}{(0.5)(0.285)} = 7.018 & \frac{1}{A_1 F_{13}} &= \frac{1}{(0.5)(0.715)} = 2.797 \\ \frac{1}{A_2 F_{23}} &= \frac{1}{(0.5)(0.715)} = 2.797 \end{aligned}$$

با در نظر گرفتن مقاومت  $\frac{(1 - \varepsilon_3)}{\varepsilon_3 A_3}$  برابر صفر، ما دارای شبکه مشابه آنچه نشان داده شده می باشیم. جهت محاسبه حرارت جریان یافته به هر سطح می باید رادیوسیتی  $J_1$  و  $J_2$  تعیین شود. شبکه با قرار دادن جمع شدت جریانهای حرارت وارده در هر گره  $J_1$  و  $J_2$  برابر صفر، حل می گردد.

$$\text{گره } J_1: \frac{E_{b1} - J_1}{8.0} + \frac{J_2 - J_1}{7.018} + \frac{E_{b3} - J_1}{2.797} = 0 \quad (a)$$

$$\text{گره } J_2: \frac{J_1 - J_2}{7.018} + \frac{E_{b3} - J_2}{2.797} + \frac{E_{b2} - J_2}{2.0} = 0 \quad (b)$$

حالا

$$E_{b1} = \sigma T_1^4 = 148.87 \text{ kW/m}^2 \quad (47190 \text{ Btu/h.ft}^2)$$

$$E_{b2} = \sigma T_2^4 = 20.241 \text{ kW/m}^2 \quad (6416 \text{ Btu/h.ft}^2)$$

$$E_{b3} = \sigma T_3^4 = 0.4592 \text{ kW/m}^2 \quad (145.6 \text{ Btu/h.ft}^2)$$

با جایگزینی مقادیر  $E_{b1}$  و  $E_{b2}$  و  $E_{b3}$  در معادلات (a) و (b) دارای دو معادله و دو مجهول  $J_1$  و  $J_2$  هستیم که با حل همزمان دو معادله می‌دهد

$$J_1 = 33.469 \text{ kW/m}^2 \quad J_2 = 15.054 \text{ kW/m}^2$$

حرارت کلی اتلاف به وسیله سطح ۱ برابر است با

$$q_1 = \frac{E_{b1} - J_1}{(1 - \varepsilon_1)/\varepsilon_1 A_1} = \frac{148.87 - 33.469}{8.0} = 14.425 \text{ kW}$$

و حرارت کلی اتلافی به وسیله سطح ۲ برابر است با

$$q_2 = \frac{E_{b2} - J_2}{(1 - \varepsilon_2)/\varepsilon_2 A_2} = \frac{20.241 - 15.054}{2.0} = 2.594 \text{ kW}$$

حرارت کلی دریافت شده به وسیله اتاق برابر است با:

$$\begin{aligned} q_3 &= \frac{J_1 - J_3}{1/A_1 F_{13}} + \frac{J_2 - J_3}{1/A_2 F_{23}} \\ &= \frac{33.469 - 0.4592}{2.797} + \frac{15.054 - 0.4592}{2.797} \\ &= 17.020 \text{ kW} \quad (58070 \text{ Btu/h}) \end{aligned}$$

از لحاظ موازنه کلی باید داشته باشیم

$$q_3 = q_1 + q_2$$

چون انرژی خالص اتلافی به وسیله هر دو صفحه باید به وسیله اتاق جذب شده باشد.

## مثال ۱۱-۱۱ سطح در توازن تابشی

دو صفحه مربع شکل ۵۰ cm در ۵۰ به صورت عمود برهم با یک یال مشترک قرار گرفته‌اند. یک سطح دارای  $T_1 = 1000 \text{ K}$ ،  $\epsilon_1 = 0.6$ ، در حالی که سطح دیگر عایق می‌شود و در موازنه تابشی با اتاق بزرگ محیط به آن، در  $300 \text{ K}$  می‌باشد. دمای سطح عایق شده و حرارت اتاق را از سطح در  $1000 \text{ K}$  محاسبه کنید.

حاصل: شبکه تابشی در شکل همراه نشان داده شده است که سطح ۳، اتاق و سطح ۲، سطح عایق است. توجه کنید که  $E_{b3} = J_3$  زیرا اتاق بزرگ است و  $\frac{(1 - \epsilon_3)}{\epsilon_3 A_3}$  به سمت صفر نزدیک می‌شود. از آنجایی که سطح ۲ عایق است دارای انتقال حرارت صفر است و  $J_2 = E_{b2}$  در شبکه "شناور است" و از موازنه تابشی تعیین می‌گردد. از شکل ۱۱-۱۶ ضرایب شکل برابر است با:

$$F_{12} = 0.2 = F_{21}$$

چون  $F_{11} = 0$  و  $F_{22} = 0$  است، داریم

$$F_{12} + F_{13} = 1.0 \quad \text{و} \quad F_{13} = 1 - 0.2 = 0.8 = F_{23}$$

$$A_1 = A_2 = (0.5)^2 = 0.25 \text{ m}^2$$

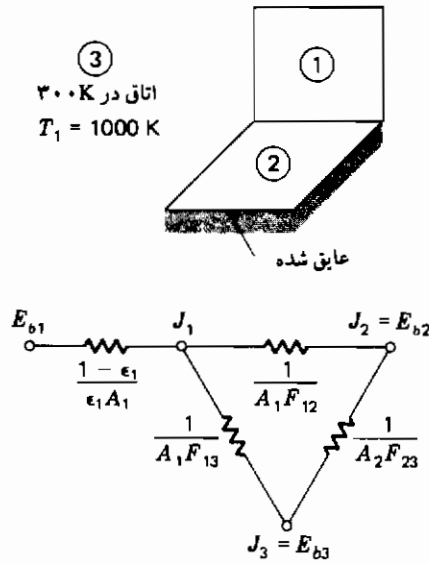
مقاومتها برابرند با

$$\begin{aligned} \frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} &= \frac{0.4}{(0.6)(0.25)} = 2.667 \\ \frac{1}{A_1 F_{13}} &= \frac{1}{A_2 F_{23}} = \frac{1}{(0.25)(0.8)} = 5.0 \\ \frac{1}{A_1 F_{12}} &= \frac{1}{(0.25)(0.2)} = 20.0 \end{aligned}$$

همچنین داریم:

$$E_{b1} = (5.669 \times 10^{-8})(1000)^4 = 5.669 \times 10^4 \text{ W/m}^2$$

$$J_3 = E_{b3} = (5.669 \times 10^{-8})(300)^4 = 459.2 \text{ W/m}^2$$



مدار کلی یک آرایش سری - موازی است و انتقال حرارت برابر است با:

$$q = \frac{E_{b1} - E_{b3}}{R_{\text{معادل}}}$$

داریم

$$R_{\text{معادل}} = 2.667 + \frac{1}{1/5 + 1/(20 + 5)} = 6.833$$

و

$$q = \frac{56690 - 459.2}{6.833} = 8.229 \text{ kW} \quad (28086 \text{ Btu/h})$$

این انتقال حرارت می تواند به صورت زیر نیز نوشته شود

$$q = \frac{E_{b1} - J_1}{(1 - \epsilon_1)/\epsilon_1 A_1}$$

با جایگزینی مقادیر به دست می آوریم

$$J_1 = 34745 \text{ W/m}^2$$



مقدار  $J_2$  از تناسب قرار دادن مقاومتهای بین  $J_1$  و  $J_3$  تعیین می‌شود. به طوری که

$$\frac{J_1 - J_2}{20} = \frac{J_1 - J_3}{20 + 5}$$

$$J_2 = 7316 = E_{b2} = \sigma T_2^4 \quad \text{و}$$

نهایتاً، دما را به صورت زیر به دست می‌آوریم

$$T_2 = \left( \frac{7316}{5.669 \times 10^{-8}} \right)^{1/4} \\ = 599.4 \text{ K} \quad (619^\circ\text{F})$$

## ۱۱-۶ فینها (پره‌ها)

اکثر خوانندگان چندین نوع سطح انتقال حرارت را با فینهای متصل به آن جهت افزایش سطح در جابجایی و بنابراین جهت افزایش نرخ انتقال حرارت دیده‌اند. نمونه‌ای از این فینها، فین صاف با پروفیل مربع مستطیل، در شکل ۱۱-۲۱ نشان داده شده است. با ترکیب موازنه‌های انرژی هدایتی و جابجایی بر روی فین امکان دستیابی به رابطه‌ای برای توزیع دما در هر موقعیت  $x$  به وجود می‌آید (به مرجع [۱] مراجعه شود).

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \frac{\cosh[m(L_c - x)]}{\cosh(mL_c)} \quad (11-29)$$

$T_0$  دما در پایه فین است،  $L_c = L + \frac{t}{4}$ ،  $L$  طول فین است،  $t$  ضخامت فین است،  $T_\infty$  دمای جریان آزاد،  $h$  ضریب انتقال حرارت است،  $k$  ضریب هدایت حرارتی فین و

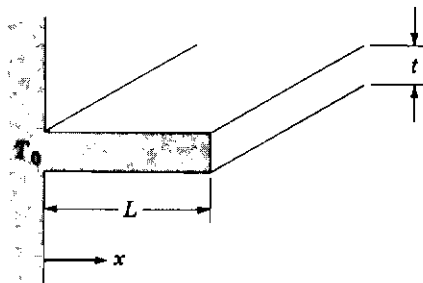
$$m = (2h/kt)^{1/2} \quad (11-30)$$

بازده فین را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\text{بازده فین} = \frac{\text{انتقال حرارت واقعی}}{\text{حرارتی که منتقل می‌شد اگر کل سطح فین در دمای پایه آن قرار داشت}} = \eta_f \quad (11-31)$$

برای فین مربع مستطیل شکل بازده فین از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta_f = \frac{\tanh(mL_e)}{mL_e} \quad (11-32)$$



شکل ۱۱-۲۱ فین صاف با پروفیل مربع مستطیل

توابع هیربولیک به صورت زیر تعریف می‌شوند

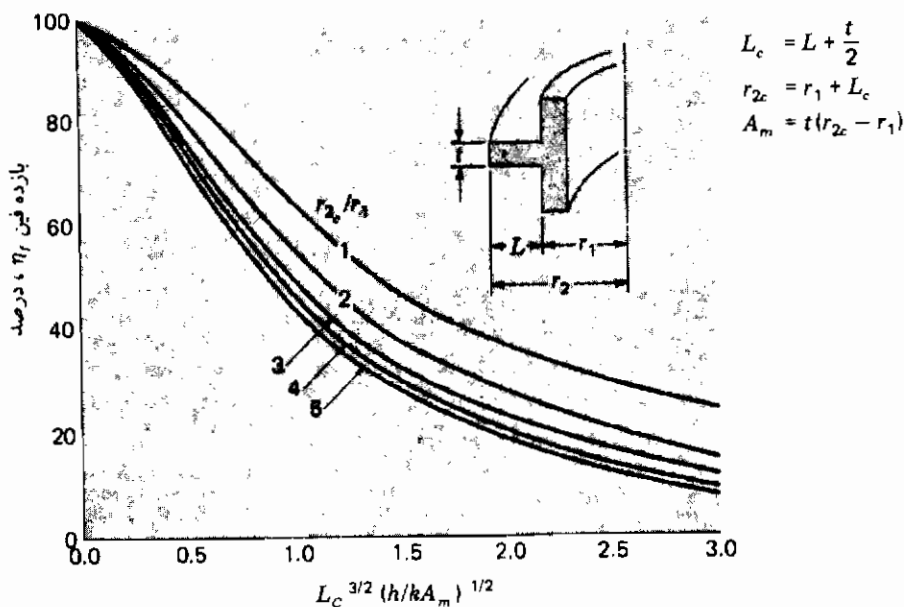
$$\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad \tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

روابط تحلیلی را برای فینهای مدور نیز می‌توان استنتاج کرد، اما خیلی پیچیده است و بنابراین نتایج آن به صورت ترسیمی در شکل ۱۱-۲۲ داده می‌شود. منحنی بالایی برای  $\frac{T_{2c}}{T_1} = 1$  است که بازده فین برای فین صاف با پروفیل مربع مستطیل نیز می‌باشد. بدین ترتیب از تعریف  $\eta_f$ ، انتقال حرارت واقعی به دست می‌آید.

$$q_{\text{واقعی}} = \eta_f \times h \times (\text{سطح برای جابجایی}) \times (T_0 - T_\infty) \quad (11-33)$$

## مثال ۱۱-۱۲

فین آلومینیومی ( $k = 200 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ) با ضخامت  $3 \text{ mm}$  و طول  $7/5 \text{ cm}$  از دیواره‌ای مطابق شکل ۱۱-۲۱ بیرون آمده است. پایه در  $300^\circ\text{C}$  نگهداشته می‌شود و دمای محیط برابر  $50^\circ\text{C}$  با  $h = 10 \text{ W/m}^2\text{C}^\circ$  است. حرارت اتلافی از فین را به ازای واحد عرض آن محاسبه کنید.



شکل ۱۱-۲۲ بازده‌های فین‌های محیطی با پروفیل مربع مستطیل شکل

حل: داریم

$$L_c = L + \frac{t}{2} = 7.5 + 0.15 = 7.65 \text{ cm} \quad (3.01 \text{ in})$$

$$m = \frac{2h}{kt}$$

$$m = \left[ \frac{(2)(10)}{(200)(3 \times 10^{-3})} \right]^{1/2} = 5.774$$

یا

از معادله (۱۱-۳۲) بازده فین برابر است با

$$\eta_f = \frac{\tanh(mL_c)}{mL_c}$$

$$mL_c = (5.774)(0.0765) = 0.4417$$

و

$$\eta_f = \frac{0.4151}{0.4417} = 0.94$$

بنابراین

برای واحد عرض، انتقال حرارت حداکثر برابر است با

$$\begin{aligned} q_{\text{حداکثر}} &= h \times \text{مساحت سطح} \times (T_0 - T_{\infty}) \\ &= (10)(2)(0.0765)(300 - 50) = 382.5 \text{ W/m} \end{aligned}$$

بنابراین انتقال حرارت واقعی برابر است با

$$q_{\text{واقعی}} = \eta_f q_{\text{حداکثر}} = (0.94)(382.5) = 360 \text{ W/m}$$

### مثال ۱۱-۱۳

فینهای آلومینیومی به عرض ۱/۵ cm و به ضخامت ۱ mm بر روی لوله‌ای به قطر ۲/۵ cm برای دفع حرارت قرار داده شده است. دمای سطح لوله ۱۷۰°C و دمای سیال در محیط ۲۵°C می‌باشد. حرارت اتلافی هر فین را برای  $h = ۱۳۰ \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  محاسبه کنید. فرض کنید برای آلومینیوم  $k = ۲۰۰ \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  باشد.

**حل:** برای این مثال، انتقال حرارت را می‌توانیم با استفاده از منحنیهای بازده فین در شکل ۱۱-۲۲ محاسبه کنیم. پارامترهای لازم عبارت است از

$$L_c = L + \frac{t}{2} = 1.5 + 0.05 = 1.55 \text{ cm}$$

$$r_1 = \frac{2.5}{2} = 1.25 \text{ cm}$$

$$r_{2c} = r_1 + L_c = 1.25 + 1.55 = 2.8 \text{ cm}$$

$$\frac{r_{2c}}{r_1} = \frac{2.80}{1.25} = 2.24$$

$$A_m = t(r_{2c} - r_1) = (0.001)(2.8 - 1.25)(10^{-2}) = 1.55 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$L_c^{3/2} \left( \frac{h}{k A_m} \right) = (0.015)^{3/2} \left[ \frac{130}{(200)(1.55 \times 10^{-5})} \right]^{1/2} = 0.396$$

از شکل ۲۲-۱۱،  $\eta_f = 82\%$  است. حرارتی که منتقل می‌شد اگر تمام فین در دمای پایه قرار داشت برابر است با (هر دو طرف انتقال حرارت فین)

$$q_{max} = 2\pi(r_2^2 - r_1^2)h(T_0 - T_\infty) \\ = 2\pi(2.8^2 - 1.25^2)(10^{-4})(130)(170 - 25) = 74.35 \text{ W} \quad (253.7 \text{ Btu/h})$$

بنابراین انتقال حرارت واقعی برابر است با حاصل ضرب این جریان حرارت و بازده فین:

$$q_{\text{واقعی}} = (0.82)(74.35) = 60.97 \text{ W} \quad (208 \text{ Btu/h})$$

## ۷-۱۱ مبدل‌های حرارتی

هنگامی که از سیکل‌های قدرت و تبرید بحث میشد به مبدل‌های حرارتی نظیر گرمکن‌های آب تغذیه و کویل‌های سرمایش تهویه مطبوع اشاره کردیم. حال ابتدا یک نوع اصلی مبدل حرارتی، یعنی مبدل دو لوله در شکل ۲۳-۱۱ را، همراه با شبکه مقاومت حرارتی آن در نظر می‌گیریم. اگر سیال A سیال گرستر باشد، انتقال حرارت به وسیله معادله (۱۸-۱۱) داده می‌شود که برای راحتی کار دوباره در این جا تکرار می‌شود:

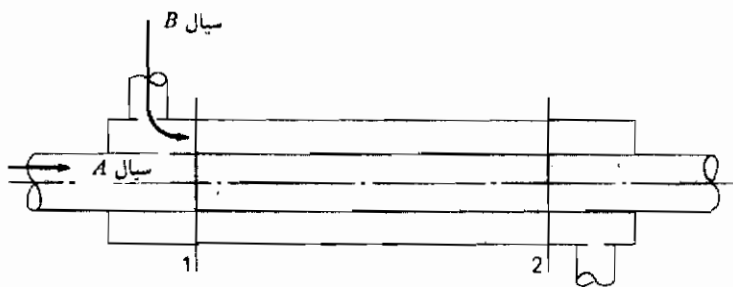
$$q = \frac{T_A - T_B}{1/h_i A_i + [\ln(r_o/r_i)/2\pi kL] + 1/h_o A_o} \quad (11-34)$$

و معمول است که ضریب انتقال حرارت کلی  $U$ ، به صورت زیر تعریف می‌گردد:

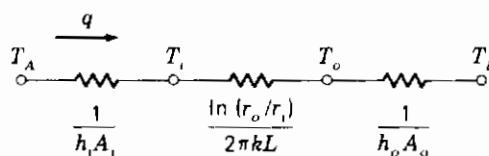
$$q = UA(T_A - T_B) \quad (11-35)$$

حاصل ضرب  $UA$  عکس مخرج در معادله (۱۱-۳۴) است. چند مقدار تقریبی  $U$  در جدول ۷-۱۱ داده شده است.

مبدل حرارتی دو لوله‌ای همان گونه که در شکل ۴۴-۱۱ نشان داده شده است می‌تواند به صورت جریان موازی یا جریان مخالف (ناهمسو) کار کند. واضح است که پروفیل دمای کاملاً متفاوتی به دست می‌آید و سؤال اساسی این است: چه اختلاف دمای متوسطی در محاسبه انتقال حرارت در معادله



(الف)

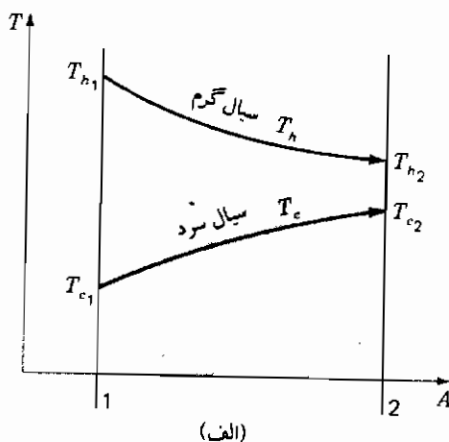


(ب)

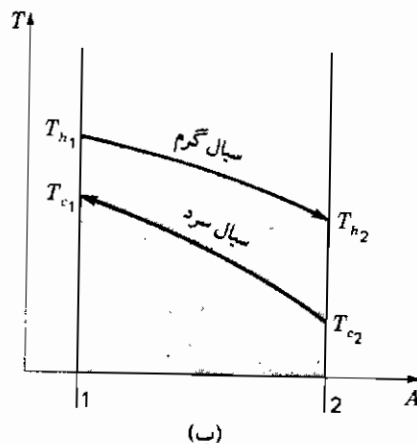
شکل ۱۱-۲۳ مبدل حرارتی دولوله

(الف) طرحواره (ب) شبکه مقاومت حرارتی برای انتقال حرارت کلی

(۱۱-۳۵) باید به کار رود؟ می‌توان نشان داد که برای مبدل حرارتی دولوله، مقدار صحیح اختلاف دما، متوسط لگاریتمی اختلاف دما، LMTD، است که به صورت زیر تعریف می‌شود:



(الف)



(ب)

شکل ۱۱-۲۴ پروفیل دما برای جریان موازی و جریان ناهمسو در مبدل حرارتی دولوله

جدول ۱۱-۲ مقادیر تقریبی ضرایب انتقال حرارت کلی

$U$		حالات فیزیکی
$W/m^2 \cdot ^\circ C$	$Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$	
۲/۵۵	۰/۴۵	دیواره خارجی آجر، داخلی گچ، عایق نشده دیواره خارجی قاب، داخلی گچ :
۱/۴۲	۰/۲۵	عایق نشده
۰/۴	۰/۰۷	عایق با پشم سنگ
۶/۲	۱/۱۰	پنجره شیشه‌ای ساده
۲/۳	۰/۴	پنجره با شیشه دوبر
۱۱۰۰-۵۶۰۰	۲۰۰-۱۰۰۰	چگالنده بخار
۱۱۰۰-۸۵۰۰	۲۰۰-۱۵۰۰	گرمکن آب تغذیه
۲۸۰-۸۵۰	۵۰-۱۵۰	چگالنده فریون ۱۲ با سردکننده آبی
۸۵۰-۱۷۰۰	۱۵۰-۳۰۰	مبدل حرارتی آب - با - آب مبدل حرارتی با لوله فین دار، آب در لوله‌ها، هوا از روی لوله‌ها عبور می‌کند
۲۵-۵۵	۵-۱۰	مبدل حرارتی آب - با - روغن
۱۱۰-۳۵۰	۲۰-۶۰	بخار آب با گاز و تیل سبک
۱۷۰-۳۴۰	۳۰-۶۰	بخار آب با گاز و تیل سنگین
۵۶-۱۷۰	۱۰-۳۰	بخار آب با نفت یا بنزین
۲۸۰-۱۱۴۰	۵۰-۲۰۰	مبدل حرارتی لوله فین دار، بخار آب در لوله‌ها هوا از روی لوله‌ها عبور می‌کند
۲۸-۲۸۰	۵-۵۰	چگالنده آمونیاکی، آب در لوله‌ها
۸۵۰-۱۴۰۰	۱۵۰-۲۵۰	چگالنده الکلی، آب در لوله‌ها
۲۵۵-۱۸۰	۴۵-۱۲۰	مبدل حرارتی گاز - با - گاز
۱۰-۴۰	۲-۸	

$$LMTD = \Delta T_m = \frac{(T_{h2} - T_{c2}) - (T_{h1} - T_{c1})}{\ln[(T_{h2} - T_{c2}) / (T_{h1} - T_{c1})]} \quad (11-36)$$

هر یک از دماها در شکل‌های ۱۱-۲۳ و ۱۱-۲۴ مشخص شده است. آنگاه انتقال حرارت کلی برای

مبدل حرارتی برابر است با

$$q = UA\Delta T_m \quad (۱۱-۳۷)$$

نوع دیگر مبدل حرارتی مبدل با لوله فین دار یا مبدل حرارتی با جریان عمودی است که در شکل ۱۱-۲۵ نشان داده شده است. این نوع مبدل حرارتی معمولاً در کویل‌های سرمایش تهویه مطبوع به کار می‌رود.

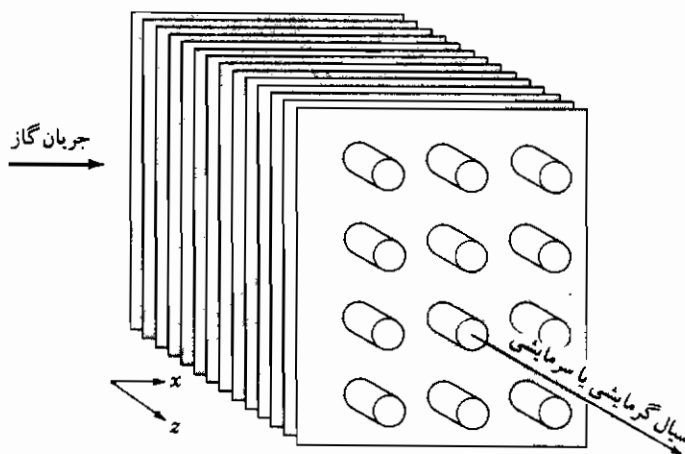
روش دیگر تحلیل مبدل‌های حرارتی بر اساس تعریف ضریب سودمندی مبدل حرارتی  $\varepsilon$  استوار است.

$$\varepsilon = \frac{\text{انتقال حرارت واقعی}}{\text{حداکثر انتقال حرارت ممکن}} \quad (۱۱-۳۸)$$

برای مبدل حرارتی دو لوله جریان موازی، موازنه انرژی می‌دهد

$$q = \dot{m}_h c_h (T_{h1} - T_{h2}) = \dot{m}_c c_c (T_{c2} - T_{c1})$$

حداکثر انتقال حرارت ممکن، به صورت زیر بیان می‌شود



شکل ۱۱-۲۵ مبدل حرارتی با جریانی عمودی، هردو سیال مخلوط نمی‌شوند



$$\dot{m}_h c_h = \frac{170.97}{60} 1900 = 5414 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_c c_c = \frac{40}{60} 4180 = 2787 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

بنابراین آب (سیال سرد) سیال حداقل است و

$$\frac{C_{\text{حداقل}}}{C_{\text{حداکثر}}} = \frac{2787}{5414} = 0.515$$

$$NTU_{\text{حداکثر}} = \frac{UA}{C_{\text{حداقل}}} = \frac{(320)(15.82)}{2787} = 1.816 \quad (b)$$

که سطح  $15/82 \text{ m}^2$  از مثال ۱۴-۱۱ گرفته می‌شود. از شکل ۲۷-۱۱ ضریب سودمندی برابر است با

$$\varepsilon = 0.744$$

و چون سیال سرد حداقل است، می‌توانیم بنویسیم

$$\varepsilon = \frac{\Delta T_{\text{سرد}}}{\Delta T_{\text{حداکثر}}} = \frac{\Delta T_{\text{سرد}}}{110 - 35} = 0.744 \quad (c)$$

$$\Delta T_{\text{سرد}} = 55.8^\circ\text{C}$$

و دمای آب خروجی برابر است با

$$T_w, \text{ خروجی} = 35 + 55.8 = 90.8^\circ\text{C}$$

انتقال حرارت کلی تحت شرایط جدید به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$q = \dot{m}_c c_c \Delta T_c = \frac{40}{60} (4180)(55.8) \quad (d)$$

$$= 155.5 \text{ kW } (5.29 \times 10^5 \text{ Btu/h})$$

توجه کنید که اگرچه نرخ جریان ۴۱ درصد کاهش یافته است (۶۸ به  $40 \text{ kg/min}$ )، انتقال حرارت تنها ۱۸ درصد کاهش یافته است ( $189/5$  به  $155/5 \text{ kW}$ ) زیرا در نرخ جریان کمتر، مبدل حرارتی مؤثرتر است.

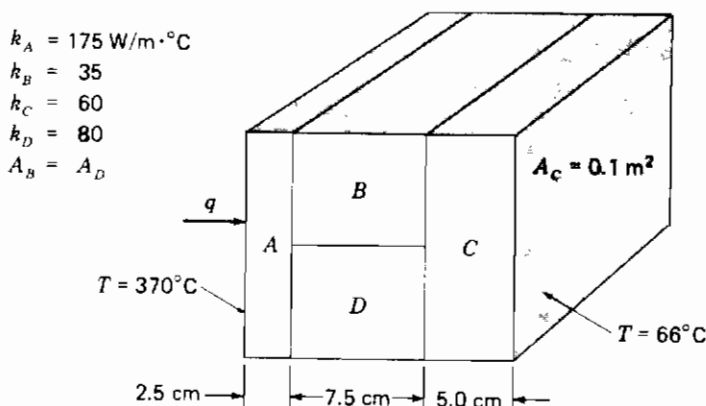
## خود آزمایی (سؤالات مروری)

- ۱ - چرا موضوع انتقال حرارت با موضوع ترمودینامیک فرق دارد؟
- ۲ - قانون هدایت حرارتی فوریه چیست؟
- ۳ - ضریب هدایت حرارتی را تعریف کنید.
- ۴ - تشابه مقاومت حرارتی برای هدایت و جابجایی را شرح دهید.
- ۵ - ضریب شکل هدایت چیست؟
- ۶ - منظور از تحلیل ظرفیت یکپارچه چیست؟
- ۷ - مکانیزم فیزیکی جابجایی را شرح دهید؟
- ۸ - ضریب انتقال حرارت جابجایی را تعریف کنید.
- ۹ - جابجایی آزاد چه فرقی با جابجایی اجباری دارد؟
- ۱۰ - قانون سرمایش نیوتن چیست؟
- ۱۱ - دماهای فیلم و میانگین را تعریف کنید.
- ۱۲ - اعداد نوسلت، رینولدز، و گراشف را تعریف کنید.
- ۱۳ - قانون استفان - بولتزمن چیست؟
- ۱۴ - ضریب صدور تشعشعی را تعریف کنید.
- ۱۵ - جسم خاکستری چیست؟
- ۱۶ - روش شبکه تابش چیست؟
- ۱۷ - بازده فین را تعریف کنید.
- ۱۸ - منظور از ضریب انتقال حرارت کلی چیست؟
- ۱۹ - رابطه‌ای برای بیان LMTD یک مبدل حرارتی دو لوله را بنویسید.
- ۲۰ - ضریب سودمندی مبدل حرارتی را تعریف کنید.

## مسائل

- ۱۱-۱ نرخ انتقال حرارت به‌ازای واحد سطح از دیوار مرکب نشان داده را پیدا کنید. جریان

حرارت را یک بعدی فرض کنید.



شکل مسأله ۱۱-۱

۱۱-۲ یک طرف بلوکی مسی به ضخامت ۵ cm در  $260^\circ\text{C}$  نگهداشته می‌شود. طرف دیگر با لایه‌ای از پشم شیشه به ضخامت ۲/۵ cm پوشیده می‌شود. دمای سطح خارجی پشم شیشه  $38^\circ\text{C}$  است و کل جریان حرارت از طریق ترکیب پشم شیشه - مس  $44 \text{ kW}$  است. سطح قطعه باریک چقدر است؟

۱۱-۳ یک لوله فولادی با قطر خارجی ۵ cm با  $6/4 \text{ mm}$  عایق پنبه نسوز ( $k = 0.096 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}$ ) پوشیده شده و سپس به وسیله لایه ۲/۵ cm از عایق پشم شیشه ( $k = 0.028 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}$ ) پوشیده می‌شود. دمای دیوار لوله  $315^\circ\text{C}$  است و دمای خارجی عایق  $38^\circ\text{C}$  است. دمای سطح مشترک بین پنبه نسوز و پشم شیشه را محاسبه کنید.

۱۱-۴ یک دیوار به ضخامت ۲ cm باید با ماده‌ای ساخته شود که دارای ضریب هدایت حرارتی متوسط  $1/3 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  است. دیوار باید با ماده‌ای که دارای ضریب هدایت حرارتی متوسط  $0.35 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  است عایق گردد، به طوری که اتلاف حرارتی به ازای هر متر مربع از  $1830 \text{ W}$  تجاوز نکند. با فرض این که دماهای سطوح داخلی و خارجی دیوار عایق شده

- به ترتیب  $1300^{\circ}\text{C}$  و  $30^{\circ}\text{C}$  باشد، ضخامت عایق لازم را محاسبه کنید.
- ۱۱-۵ اختلاف دمای  $85^{\circ}\text{C}$  در عرض یک لایه پشم شیشه به ضخامت  $13\text{ cm}$  برقرار است. ضریب هدایت حرارتی پشم شیشه  $0.035\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$  است. حرارت منتقل شده از میان ماده را به ازای هر ساعت و هر واحد سطح محاسبه کنید.
- ۱۱-۶ دماهای سطح دیواره صافی به ضخامت  $15\text{ cm}$ ،  $370^{\circ}\text{C}$  و  $93^{\circ}\text{C}$  است. دیواره از شیشه مخصوصی با خواص زیر ساخته شده است:  $c_p = 0.84\text{ kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ ،  $k = 0.78\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ،  $\rho = 2700\text{ kg/m}^3$  و  $\rho = 2700\text{ kg/m}^3$  و  $c_p = 0.84\text{ kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ . جریان حرارت از میان دیواره در شرایط دائم چقدر است؟
- ۱۱-۷ یک عایق فوق العاده ویژه دارای ضریب هدایت حرارتی  $1.04\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$  برای عایق کردن مخزن نگهداری مایع نیتروژن در  $320^{\circ}\text{F}$  به کار می رود.  $85/8\text{ Btu}$  برای تبخیر هر پوند جرم نیتروژن در این دما لازم است. با فرض این که مخزن کروی و دارای قطر داخلی  $2\text{ ft (ID)}$  باشد، مقدار نیتروژن تبخیر شده در هر روز را برای عایق به ضخامت  $1\text{ in}$  و دمای محیط  $70^{\circ}\text{F}$  تعیین کنید. فرض کنید که دمای سطح خارجی عایق  $70^{\circ}\text{F}$  است.
- ۱۱-۸ یک خط لوله به قطر  $50\text{ cm}$  که در قطب شمال، نفت داغ  $30^{\circ}\text{C}$  را منتقل می کند در معرض دمای محیط  $20^{\circ}\text{C}$  می باشد. عایقی مخصوص به ضخامت  $5\text{ cm}$  اطراف لوله را در بر گرفته و دارای ضریب هدایت حرارتی  $7\text{ mW/m}\cdot^{\circ}\text{C}$  می باشد. ضریب انتقال حرارت جابجایی در خارج لوله برابر  $12\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$  است. انرژی اتلافی از لوله را به ازای هر متر طول تخمین بزنید.
- ۱۱-۹ یک طرف دیواره صافی در  $100^{\circ}\text{C}$  نگهداشته می شود و طرف دیگر در معرض محیط جابجایی دارای  $T = 10^{\circ}\text{C}$  و  $h = 10\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$  قرار گرفته است. دیوار دارای  $k = 1/6\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$  و ضخامت  $40\text{ cm}$  می باشد. نرخ انتقال حرارت از دیواره را محاسبه کنید.
- ۱۱-۱۰ یک طرف بلوک مسی به ضخامت  $4\text{ cm}$  در  $200^{\circ}\text{C}$  نگهداشته می شود. طرف دیگر با لایه ای از پشم شیشه به ضخامت  $2/5\text{ cm}$  پوشیده می شود. قسمت خارجی پشم شیشه در  $90^{\circ}\text{C}$  نگهداشته می شود و جریان حرارت کلی از میان بلوک عایق شده  $300\text{ W}$  است. چه سطحی برای بلوک لازم است؟

$$q_{\text{حداکثر}} = (\dot{m}c)(T_{h\text{ورودی}} - T_{c\text{ورودی}}) \quad (۱۱-۳۹)$$

که برابر خواهد بود با

$$q_{\text{حداکثر}} = (\dot{m}c)_{\text{حداقل}}(T_{h1} - T_{c1})$$

برای مبدل حرارتی با جریان موازی و

$$q_{\text{حداکثر}} = (\dot{m}c)_{\text{حداقل}}(T_{h1} - T_{c2})$$

برای مبدل حرارتی با جریان مخالف.

با گرفتن  $\dot{m}c = C$ ، تحلیل نشان می‌دهد که ضریب سودمندی را می‌توان به صورت تابعی به شکل زیر ارائه کرد:

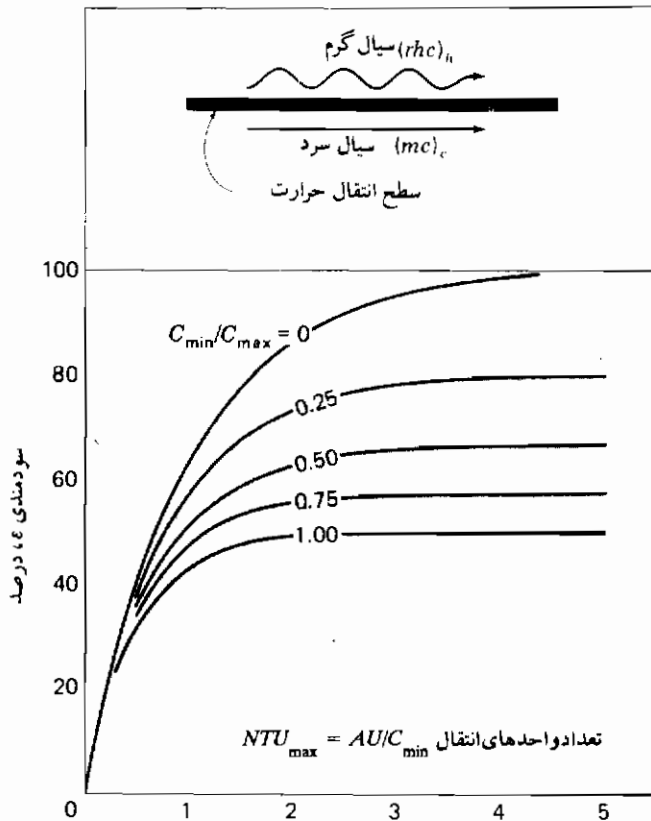
$$\varepsilon = fcn \left( NTU \text{ و } \frac{C_{\text{حداقل}}}{C_{\text{حداکثر}}} \right) \quad (۱۱-۴۰)$$

$$NTU = \frac{UA}{C_{\text{حداقل}}} \quad \text{که}$$

$NTU$  به شمار واحد انتقال موسوم است زیرا مربوط به اندازه یا سطح مبدل حرارتی می‌شود. منحنیهای ضریب سودمندی به صورت تابعی از این متغیرها در شکلهای ۱۱-۲۶ تا ۱۱-۲۸ برای مبدلهای حرارتی دو لوله با جریان موازی و مخالف و مبدل حرارتی لوله فین دار با جریان عمودی نشان داده شده است. مثالهای زیر کاربرد روابط بالا جهت محاسبه عملکرد مبدل حرارتی را نشان می‌دهد.

### مثال ۱۱-۱۴

آب به شدت  $68 \text{ kg/min}$  از  $35^\circ\text{C}$  تا  $75^\circ\text{C}$  به وسیله روغنی با گرمای مخصوص  $1.9 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$  حرارت می‌بیند. دو سیال در یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای با جریان ناهمسو به خدمت گرفته می‌شود و روغن با دمای  $110^\circ\text{C}$  وارد مبدل شده با  $75^\circ\text{C}$  از آن خارج می‌شود. ضریب انتقال حرارت کلی  $220 \text{ W/m}^2\text{.}^\circ\text{C}$  است. سطح مبدل حرارتی را محاسبه کنید.



شکل ۱۱-۲۶ ضریب سودمندی برای عملکرد مبدل حرارتی با جریان موازی

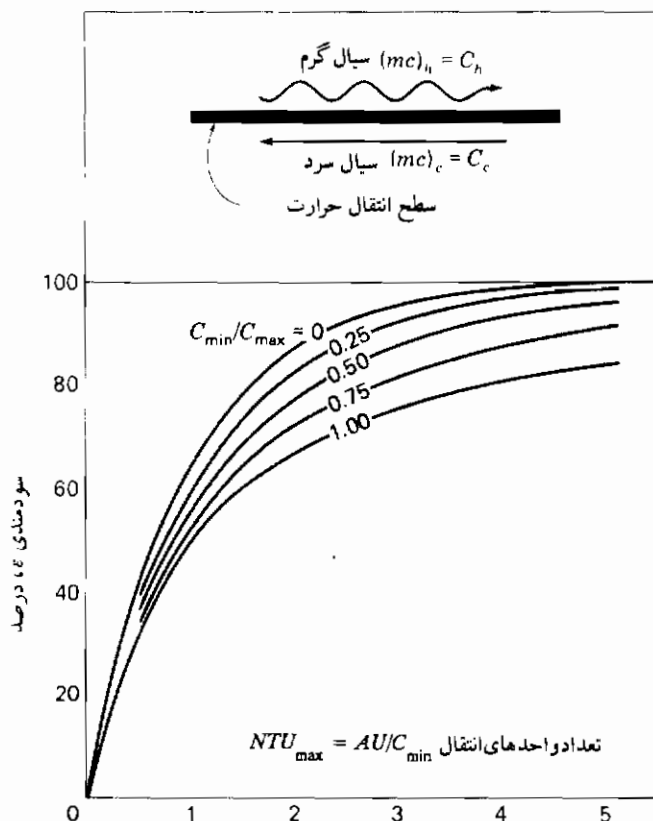
**حل:** انتقال حرارت کلی، از انرژی جذب شده به وسیله آب تعیین می‌شود:

$$q = \dot{m}_w c_w \Delta T_w = (68)(4180)(75 - 35) = 11.37 \text{ MJ/min} \quad (a)$$

$$= 189.5 \text{ kW} \quad (6.47 \times 10^5 \text{ Btu/h})$$

چون تمام دماهای سیال معلوم است، متوسط دمای لگاریتمی LMTD را می‌توان به کمک شکل ۱۱-۲۴ محاسبه نمود

$$\Delta T_m = \frac{(110 - 75) - (75 - 35)}{\ln[(110 - 75)/(75 - 35)]} = 37.44^\circ\text{C} \quad (b)$$



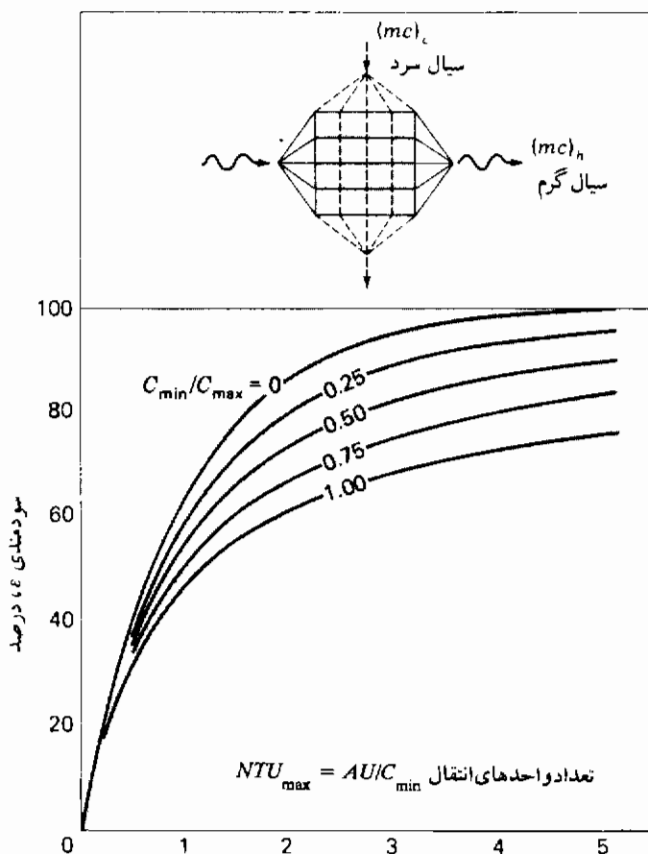
شکل ۲۲-۱۱ ضریب سودمندی عملکرد مبدل حرارتی با جریان ناهمسو

$$q = UA\Delta T_m \text{ و چون}$$

$$A = \frac{1.895 \times 10^5}{(320)(37.44)} = 15.82 \text{ m}^2 \quad (170 \text{ ft}^2)$$

### مثال ۱۵-۱۱

مبدل حرارتی مثال ۱۴-۱۱ همان طوری که در آن مثال توضیح داده شده است برای گرمایش آب به کار می‌رود. با استفاده از همان دماهای ورودی، هنگامی که با همان مقدار روغن تنها ۴۰ kg/min آب جریان یابد، درجه حرارت خروجی آب را محاسبه کنید. همچنین انتقال حرارت کلی



شکل ۲۸-۱۱ ضریب سودمندی برای مبدل با جریان عمودی با سیالاتی که مخلوط نمی‌شوند

تحت این شرایط جدید را محاسبه کنید.

**حل:** نرخ جریان روغن از موازنه انرژی را برای مسأله قبل می‌توان محاسبه نمود:

$$\dot{m}_h c_h \Delta T_h = \dot{m}_c c_c \Delta T_c \quad (a)$$

$$\dot{m}_h = \frac{(68)(4180)(75 - 35)}{(1900)(110 - 75)} = 170.97 \text{ kg/min}$$

ظرفیتهای حرارتی برای شرایط جدید، به صورت زیر محاسبه می‌شود.



در باره آن بحث کنید.

۱۱-۴۳ یک سیم پلاتین به طول ۱۰ cm و قطر ۰/۴ mm به طور افقی بر روی مخزنی از آب  $38^{\circ}\text{C}$  قرار داده می شود و به طور الکتریکی گرم می شود به طوری که دمای سطح در  $93^{\circ}\text{C}$  نگهداشته می شود. حرارت اتلافی از سیم را محاسبه کنید.

۱۱-۴۴ آب  $90^{\circ}\text{C}$  با نرخ  $0/8 \text{ kg/s}$  در لوله فولادی با قطر داخلی ۲/۵ cm و قطر خارجی ۳ cm جریان می یابد. دمای سطح خارجی لوله  $85^{\circ}\text{C}$  و دمای هوای محیط  $20^{\circ}\text{C}$  است. فشار اتاق ۱ atm است و لوله ۱۵ m طول دارد. حرارت اتلافی به صورت جابجایی آزاد به اتاق چقدر است؟

۱۱-۴۵ یک لوله افقی به قطر ۷/۵ cm در اتاقی قرار گرفته است که هوای آن در  $20^{\circ}\text{C}$  می باشد. دمای سطح لوله  $240^{\circ}\text{C}$  است. اتلاف حرارت به صورت جابجایی آزاد را به ازای هر متر لوله محاسبه کنید.

۱۱-۴۶ لوله ای افقی به قطر خارجی ۱/۲۵ cm حرارت داده می شود تا دمای سطح آن به  $250^{\circ}\text{C}$  برسد و سپس در معرض هوای اتاق در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  و ۱ atm قرار می گیرد. چقدر انتقال حرارت با جابجایی آزاد به ازای واحد طول لوله صورت می گیرد؟

۱۱-۴۷ با فرض این که انسان می تواند به صورت سیلندر قائمی به قطر ۱ ft و ارتفاع ۶ ft تقریب زده شود، اتلاف حرارتی جابجایی آزاد را برای دمای سطح  $75^{\circ}\text{F}$  در دمای هوای محیط  $68^{\circ}\text{F}$  تخمین بزنید.

۱۱-۴۸ کانال مدور بزرگی به قطر ۳ m، گازهای دائمی را در  $250^{\circ}\text{C}$  حمل می کند. خارج کانال در معرض هوای محیط در ۱ atm و  $20^{\circ}\text{C}$  قرار دارد. حرارت اتلافی را به ازای واحد طول کانال تخمین بزنید.

۱۱-۴۹ یک صفحه قائم مربعی شکل به ضلع ۱۵ cm در  $100^{\circ}\text{F}$  نگهداشته شده و در آب مایع  $60^{\circ}\text{F}$  فرو برده می شود. اتلاف حرارتی از صفحه را به صورت جابجایی آزاد محاسبه کنید.

۱۱-۵۰ مسأله ۱۱-۴۹ را برای سیلندر افقی به قطر ۷/۵ cm تکرار کنید.

۱۱-۵۱ یک سیم پلاتین به طول ۱۰ cm و قطر ۰/۴ mm به طور افقی بر روی مخزنی از آب در  $38^{\circ}\text{C}$  قرار می گیرد و به طور الکتریکی گرم می شود به طوری که دمای سطح در  $93^{\circ}\text{C}$

- نگهداشته می شود. حرارت اتلافی از سیم را محاسبه کنید.
- ۱۱-۵۲ یک صفحه قائم مربعی شکل به ضلع  $1\text{ m}$  در  $120^\circ\text{F}$  نگهداشته می شود و در معرض هوای اتاق در  $70^\circ\text{F}$  قرار می گیرد. حرارت اتلافی از صفحه را محاسبه کنید.
- ۱۱-۵۳ یک صفحه قائم مربع شکل به ضلع  $1\text{ m}$  تا  $400^\circ\text{C}$  حرارت می یابد و در هوای اتاق در  $25^\circ\text{C}$  قرار می گیرد. حرارت اتلافی از یک طرف صفحه را محاسبه کنید.
- ۱۱-۵۴ یک لوله افقی خارجی  $1/25\text{ cm}$  تا دمای سطح  $250^\circ\text{C}$  حرارت می یابد و سپس در معرض هوای اتاق در  $20^\circ\text{C}$  و  $1\text{ atm}$  قرار می گیرد. مقدار انتقال حرارت به صورت جابجایی آزاد به ازای واحد طول لوله چقدر است؟
- ۱۱-۵۵ دو صفحه سیاه نامحدود در  $500^\circ\text{C}$  و  $100^\circ\text{C}$  تبادل حرارت تابشی می کنند. نرخ انتقال حرارت به ازای واحد سطح را محاسبه کنید. اگر ورق نازک و کاملاً سیاه بین صفحات  $500^\circ\text{C}$  و  $100^\circ\text{C}$  قرار گیرد، چقدر از انتقال حرارت کاسته می شود؟ دمای صفحه وسطی چقدر است؟
- ۱۱-۵۶ دیواره یک سمت اتاقی به ابعاد  $3 \times 3 \times 3\text{ m}$  در  $260^\circ\text{C}$  و کف آن در  $90^\circ\text{C}$  نگهداشته می شود. چهار سطح دیگر کاملاً عایق می گردد. فرض کنید که تمام سطوح سیاه باشند. انتقال حرارت خالص بین دیواره گرم و کف سرد را محاسبه کنید.
- ۱۱-۵۷ یک اتاق  $3 \times 3\text{ m}$  را در نظر بگیرید. دمای کف آن  $25^\circ\text{C}$  و دمای سقف آن  $13^\circ\text{C}$  و دیواره های آن کاملاً عایق است. ارتفاع اتاق  $2/5\text{ m}$  است. ضریب صدور تشعشی تمام سطوح  $0/8$  است. با استفاده از روش شبکه ای، مقدار تبادل خالص بین کف و سقف و دمای دیوار را محاسبه کنید.
- ۱۱-۵۸ انتقال انرژی از یک سفینه فضایی به سفینه ای دیگر مطلوب است. یک صفحه مربع شکل به ضلع  $1/5\text{ m}$  در هر سفینه برای انجام این امر موجود است. سفینه ها طوری هدایت می شوند که صفحات موازی هم و به فاصله  $40\text{ cm}$  از یکدیگر قرار داشته باشند. یک صفحه در  $800^\circ\text{C}$  و صفحه دیگر در  $280^\circ\text{C}$  نگهداشته می شوند. ضریب صدور تشعشی بترتیب برابر  $0/5$  و  $0/8$  است. پیدا کنید (الف) حرارت خالص منتقل شده بین سفینه ها را بر حسب وات و (ب) اتلاف حرارتی کلی از صفحه گرم را بر حسب وات.

فرض کنید که فضای خارجی جسم سیاه در  $0\text{ K}$  باشد.

۱۱-۵۹ دو صفحه موازی کاملاً سیاه  $1/2 \times 1/2 \text{ m}$  به فاصله  $1/2 \text{ m}$  از یکدیگر قرار دارند. یک صفحه در  $550^\circ\text{C}$  و دیگری در  $250^\circ\text{C}$  نگهداشته می‌شود. صفحات در اتاق بزرگی که دمای دیواره‌هایش  $20^\circ\text{C}$  است قرار می‌گیرند. انتقال حرارت خالص بین صفحات چقدر است؟

۱۱-۶۰ دو صفحه موازی  $90 \times 60 \text{ cm}$  به فاصله  $60 \text{ cm}$  از یکدیگر قرار دارند. یک صفحه در دمای  $550^\circ\text{C}$  نگهداشته می‌شود و دارای ضریب صدور تشعشعی  $0/6$  است. صفحه دیگر کاملاً عایق است. صفحات در اتاق بزرگی که در  $10^\circ\text{C}$  نگهداشته می‌شود قرار می‌گیرند. دمای صفحه عایق و انرژی تلف شده از صفحه گرم را محاسبه کنید.

۱۱-۶۱ سه صفحه موازی نامحدود مطابق شکل، قرار می‌گیرند. صفحه ۱ در  $1200\text{ K}$  و صفحه ۳ در  $60\text{ K}$  نگهداشته می‌شود،  $\epsilon_1 = 0/2$ ،  $\epsilon_2 = 0/5$  و  $\epsilon_3 = 0/8$ . صفحه ۲ از هیچ منبع خارجی حرارت دریافت نمی‌کند. دمای صفحه ۲ چقدر است؟



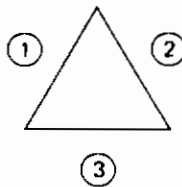
شکل مسأله ۱۱-۶۱

۱۱-۶۲ دو دیسک هم مرکز موازی به قطرهای  $d_1 = 10 \text{ cm}$  و  $d_2 = 5 \text{ cm}$  به فاصله  $10 \text{ cm}$  از یکدیگر قرار دارند.  $F_{12}$  و  $F_{21}$  را تعیین کنید.

۱۱-۶۳ دو دیسک موازی به قطر  $30 \text{ cm}$  که به فاصله  $5 \text{ cm}$  از یکدیگر قرار دارند در یک اتاق بزرگ در  $20^\circ\text{C}$  قرار می‌گیرد. یک دیسک دارای گرمکن الکتریکی می‌باشد که فلوی حرارتی ثابت  $100 \text{ kW/m}^2$  تولید می‌کند و  $\epsilon = 0/9$  برای سطح روبروی دیسک دیگر است. سطح پشتی کاملاً عایق است. دیسک دیگر دارای  $\epsilon = 0/5$  در هر دو طرف

می‌باشد و در توازن تابشی با دیسک دیگر و اتاق است. دمای هر یک از دو دیسک را محاسبه کنید.

۱۱-۶۴ یک کانال طویل به مقطع مثلث متساوی الاضلاع مطابق شکل است. ویژگی سطوح عبارت است از  $T_1 = 1100 \text{ K}$ ،  $\epsilon_1 = 0.6$ ،  $T_2 = 2100 \text{ K}$ ،  $\epsilon_2 = 0.8$ ،  $(q/A)_3 = 1000 \text{ W/m}^2$  و  $\epsilon_3 = 0.7$ . فلوهای حرارتی را برای سطوح ۱ و ۲ و دمای سطح ۳ محاسبه کنید.



شکل مسأله ۱۱-۶۴

۱۱-۶۵ یک لوله طویل به قطر ۵ cm از میان اتاقی می‌گذرد و در معرض هوا در فشار اتمسفر و دمای  $20^\circ\text{C}$  قرار می‌گیرد. دمای سطح لوله  $93^\circ\text{C}$  است. با فرض این که ضریب صدور تشعشی لوله  $0.6$  باشد، اتلاف حرارت تابشی را به ازای هر فوت طول لوله محاسبه کنید.

۱۱-۶۶ دو دیسک موازی به قطر ۶۰ cm به فاصله ۱۵ cm از یکدیگر در اتاق بزرگی در  $30^\circ\text{C}$  قرار دارند. خواص سطوح عبارت است از  $T_1 = 540^\circ\text{C}$ ،  $\epsilon_1 = 0.7$ ،  $T_2 = 300^\circ\text{C}$  و  $\epsilon_2 = 0.5$ . مقدار انتقال حرارت تابشی خالص از هر سطح چه مقدار است؟ (قسمتهای پشتی را در تبادل در نظر نگیرید و تنها سطوحی را که مقابل همدیگر می‌باشند در نظر بگیرید).

۱۱-۶۷ دو دیسک موازی به قطرهای ۵۰ cm، به فاصله ۱۰ cm از یکدیگر قرار دارند. یکی از دیسکها سوراخی به قطر ۲۰ cm در مرکز دارد. ضریب شکل را از این دیسک به دیسک بدون سوراخ حساب کنید.

۱۱-۶۸ فینی به شکل مستطیل مستقیم و به طول ۲ cm و به ضخامت ۱/۵ mm می‌باشد. ضریب

- ۱۱-۱۱ دیواری از فولاد ضد زنگ ( $k = ۱۶ \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ) به ضخامت  $۴ \text{ mm}$  با لایه‌هایی با ضخامت یکسان از گچ در دو طرف فولاد ساخته شده است. ضریب انتقال حرارت کلی با در نظر گرفتن جابجایی در دو طرف گچ  $۲۰۰ \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  است. اگر اختلاف دمای کلی در عرض این آرایش  $۱۰۰^\circ\text{C}$  باشد، اختلاف دما را در عرض فولاد را محاسبه کنید.
- ۱۱-۱۲ لوله بخار آب داغی با دمای سطح داخلی  $۳۰۰^\circ\text{C}$  و قطر داخلی  $۸ \text{ cm}$  و ضخامت دیواره  $۵/۵ \text{ mm}$  در نظر بگیرید. این لوله با لایه به ضخامت  $۹ \text{ cm}$  از عایق با  $k = ۵۰ \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  و به دنبال آن به وسیله لایه به ضخامت  $۴ \text{ cm}$  از عایق دیگری با  $k = ۰/۳۵ \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  پوشانده شده است. دما در خارج از عایق  $۳۰^\circ\text{C}$  می‌باشد. حرارت اتلافی به ازای هر متر طول لوله را محاسبه کنید. فرض کنید برای لوله  $k = ۴۷ \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  باشد.
- ۱۱-۱۳ یک لوله با دیواره سنگینی از مونل (Monel) به قطر داخلی  $۲/۵ \text{ cm}$  و قطر خارجی  $۵ \text{ cm}$  با لایه‌ای به ضخامت  $۲/۵ \text{ cm}$  از پشم شیشه پوشانده شده است. دمای داخلی لوله  $۲۶۰^\circ\text{C}$  است و دما در خارج از عایق  $۳۸^\circ\text{C}$  می‌باشد. چه مقدار حرارت به ازای هر فوت طول لوله تلف می‌شود؟ برای مونل  $k = ۱۱ \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}$  در نظر بگیرید.
- ۱۱-۱۴ دو سیلندر طویل به قطر  $۷/۵ \text{ cm}$  و به طور کامل به وسیله محیطی با  $k = ۱/۴ \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  احاطه شده است. فاصله بین مراکز آنها  $۱۰ \text{ cm}$  است و سیلندرها در  $۲۰۰^\circ\text{C}$  و  $۳۵^\circ\text{C}$  نگهداشته می‌شوند نرخ انتقال حرارت را به ازای واحد طول محاسبه کنید.
- ۱۱-۱۵ کره‌ای به قطر  $۱ \text{ m}$ ، که در  $۳۵^\circ\text{C}$  نگهداشته می‌شود، در زمین در جایی که  $k = ۱/۷ \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  دفن می‌گردد. عمق مرکز آن  $۲/۴ \text{ m}$  است و دمای سطح زمین  $۴^\circ\text{C}$  می‌باشد. حرارت اتلافی به وسیله کره را محاسبه کنید.
- ۱۱-۱۶ یک کره مسی به قطر  $۴ \text{ cm}$  در  $۷۰^\circ\text{C}$  نگهداشته می‌شود و در ناحیه بزرگی از زمین که  $k = ۱/۳ \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  غوطه‌ور می‌شود. دما در فاصله زیادی از کره  $۱۲^\circ\text{C}$  است. حرارت اتلافی از کره را محاسبه کنید.
- ۱۱-۱۷ دو سیلندر بلند و خارج از مرکز به ترتیب دارای قطرهای  $۱۵ \text{ cm}$  و  $۴ \text{ cm}$  در  $۲۰^\circ\text{C}$  و  $۱۰۰^\circ\text{C}$  نگهداشته می‌شوند و به وسیله ماده‌ای با  $k = ۳ \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  جدا می‌شوند. فاصله بین دو مرکز  $۴/۵ \text{ cm}$  است. انتقال حرارت به ازای واحد طول بین سیلندرها را محاسبه کنید.

- ۱۱-۱۸ ۲ لوله در زمین دفن و در دماهای  $300^\circ\text{C}$  و  $125^\circ\text{C}$  نگهداشته می‌شوند. قطر ها به ترتیب ۸ و ۱۶ cm و فاصله بین دو مرکز آنها ۴۰ cm است. نرخ انتقال حرارت را به ازای واحد طول محاسبه کنید. ضریب هدایت حرارتی زمین در این ناحیه  $0.7 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  است.
- ۱۱-۱۹ کره داغی به قطر  $1/5 \text{ m}$  در  $300^\circ\text{C}$  نگهداشته و در ماده‌ای با  $k = 1/2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  دفن می‌شود و دمای سطح خارجی  $30^\circ\text{C}$  می‌باشد. عمق مرکز کره  $3/75 \text{ m}$  است. حرارت اتلافی را محاسبه کنید.
- ۱۱-۲۰ یک قطعه آلومینیم به وزن  $5/5 \text{ kg}$  که در ابتدا در دمای  $290^\circ\text{C}$  می‌باشد ناگهان در سیالی در  $15^\circ\text{C}$  فرو برده می‌شود. ضریب انتقال حرارت جابجایی  $58 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$  است. اگر این قطعه آلومینیم کروی باشد زمان لازم را برای خنک شدن آن تا  $90^\circ\text{C}$  محاسبه کنید. از روش تحلیل ظرفیت یکپارچه استفاده کنید.
- ۱۱-۲۱ یک کره مسی با قطر  $3 \text{ cm}$  ابتدا در دمای یکنواخت  $50^\circ\text{C}$  قرار دارد. ناگهان در معرض جریان هوای در  $10^\circ\text{C}$  با  $h = 15 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$  قرار می‌گیرد. چه مدت طول می‌کشد که دمای کره به  $25^\circ\text{C}$  کاهش یابد؟
- ۱۱-۲۲ هوا در شرایط استاندارد  $1 \text{ atm}$  و  $20^\circ\text{C}$  از روی صفحه تختی با سرعت  $30 \text{ m/s}$  جریان می‌یابد. صفحه مربع شکل و به ضلع  $60 \text{ cm}$  است و در  $90^\circ\text{C}$  نگهداشته می‌شود. انتقال حرارت از صفحه را محاسبه کنید.
- ۱۱-۲۳ هوا در  $20^\circ\text{C}$  و  $14 \text{ kPa}$  با سرعت  $150 \text{ m/s}$  از روی صفحه تختی به طول  $1 \text{ m}$  که در دمای ثابت  $150^\circ\text{C}$  نگهداشته شده است، عبور می‌کند. نرخ متوسط انتقال حرارت را به ازای واحد سطح صفحه محاسبه کنید.
- ۱۱-۲۴ هوا در  $90^\circ\text{C}$  و فشار اتمسفر با سرعت  $60 \text{ m/s}$  از روی صفحه تخت افقی عبور می‌کند. صفحه مربع شکل به ضلع  $60 \text{ cm}$  است و در دمای یکنواخت  $10^\circ\text{C}$  نگهداشته می‌شود. انتقال حرارت کلی چقدر است؟
- ۱۱-۲۵ انتقال حرارت را از صفحه مربع شکلی به ضلع  $30 \text{ cm}$  که هوا در  $35^\circ\text{C}$  و  $14 \text{ kPa}$  از روی آن عبور می‌کند، محاسبه کنید. دمای صفحه  $250^\circ\text{C}$  است و سرعت جریان آزاد  $6 \text{ m/s}$  است.

- ۱۱-۲۶ هوا در  $27^{\circ}\text{C}$  و  $1\text{ atm}$  از روی صفحه تخت مربع شکلی به ضلع  $4\text{ m}$  با سرعت  $40\text{ m/s}$  عبور می‌کند. دمای صفحه  $70^{\circ}\text{C}$  است. انتقال حرارت کلی را محاسبه کنید.
- ۱۱-۲۷ هوا در  $1\text{ atm}$  و  $27^{\circ}\text{C}$  از میان سطح بتنی بزرگی به عرض  $15\text{ m}$  که در دمای  $55^{\circ}\text{C}$  نگهداشته شده است عبور می‌کند. سرعت جریان  $4/5\text{ m/s}$  است. اتلاف حرارتی جابجایی از سطح را محاسبه کنید.
- ۱۱-۲۸ آب در عرض صفحه مربع شکل به ضلع  $15\text{ cm}$  با سرعت  $10\text{ m/s}$  جریان می‌یابد. صفحه در دمای ثابت  $120^{\circ}\text{F}$  نگهداشته می‌شود و دمای جریان آزاد  $60^{\circ}\text{F}$  است. حرارت اتلافی از صفحه را محاسبه کنید.
- ۱۱-۲۹ سؤال ۱۱-۲۸ را برای جریان عبوری از روی سیلندری به قطر  $7/5\text{ cm}$  تکرار نمایید.
- ۱۱-۳۰ آب در  $70^{\circ}\text{F}$  از روی صفحه تخت مربع شکلی به ضلع  $1\text{ ft}$  با سرعت  $20\text{ ft/s}$  جریان می‌یابد. صفحه در دمای ثابت  $130^{\circ}\text{F}$  نگهداشته می‌شود. حرارت اتلافی از صفحه را محاسبه کنید.
- ۱۱-۳۱ آب به شدت  $1\text{ kg/s}$  از میان لوله‌ای با قطر داخلی  $2/5\text{ cm}$  عبور می‌کند. دمای آب ورودی  $15^{\circ}\text{C}$  و دمای آب خروجی  $50^{\circ}\text{C}$  است. دمای دیواره لوله  $14^{\circ}\text{C}$  بیشتر از دمای آب در تمام طول لوله می‌باشد. طول لوله چقدر است؟
- ۱۱-۳۲ آب با شدت  $3\text{ kg/s}$  از  $5^{\circ}\text{C}$  تا  $15^{\circ}\text{C}$  با عبور از میان لوله مسی به قطر داخلی  $5\text{ cm}$  حرارت می‌یابد. دمای دیواره لوله در  $90^{\circ}\text{C}$  نگهداشته می‌شود. طول لوله چقدر است؟
- ۱۱-۳۳ آب با شدت  $0/8\text{ kg/s}$  در  $93^{\circ}\text{C}$  از میان لوله مسی به قطر داخلی  $5\text{ cm}$  در سرعت مناسبی عبور می‌کند. ضخامت دیواره  $0/8\text{ mm}$  است. هوا در  $15^{\circ}\text{C}$  و فشار اتمسفر از روی خارجی لوله در سرعت  $15\text{ m/s}$  و در جهت عمود بر محور لوله عبور می‌کند. حرارت اتلافی به ازای هر متر طول لوله چقدر است؟
- ۱۱-۳۴ یک سیلندر به قطر  $2/5\text{ cm}$  که تا  $150^{\circ}\text{C}$  حرارت داده شده است، در معرض جریان هوای اتمسفر در  $1\text{ atm}$  و  $38^{\circ}\text{C}$  قرار می‌گیرد. سرعت هوا  $30\text{ m/s}$  است. حرارت اتلافی را به ازای هر متر طول سیلندر محاسبه کنید.
- ۱۱-۳۵ با فرض این که انسان را بتوان با سیلندری به قطر  $1\text{ ft}$  و ارتفاع  $6\text{ ft}$  با دمای سطح  $75^{\circ}\text{F}$

تقریب زد، محاسبه کنید حرارتی را که انسان در معرض بادی به سرعت  $30 \text{ mi/h}$  با دمای  $30^\circ\text{F}$ ، از دست می‌دهد.

۱۱-۳۶ آب بر روی کره‌ای به قطر  $3 \text{ mm}$  با سرعت  $6 \text{ m/s}$  جریان می‌یابد. دمای جریان آزاد  $38^\circ\text{C}$  است، و کره در  $93^\circ\text{C}$  نگهداشته می‌شود. نرخ انتقال حرارت را محاسبه کنید.

۱۱-۳۷ سیمی به قطر  $13 \text{ mm}$  / ۰ در معرض جریان هوا در  $30^\circ\text{C}$  و  $54 \text{ kPa}$  قرار می‌گیرد. سرعت جریان  $230 \text{ m/s}$  است. سیم به‌طور الکتریکی گرم می‌شود و طول آن  $12/5 \text{ mm}$  می‌باشد. قدرت الکتریکی لازم را برای نگهداشتن دمای سطح سیم در  $175^\circ\text{C}$  محاسبه کنید.<sup>۱</sup>

۱۱-۳۸ خط لوله‌ای در قطب شمال نفت داغ را در  $50^\circ\text{C}$  حمل می‌کند. یک باد قطبی شدید در دمای  $35^\circ\text{C}$  با سرعت  $13 \text{ m/s}$  از روی لوله‌ای به قطر  $50 \text{ cm}$  عبور می‌کند. حرارت اتلافی را به‌ازای هر متر طول لوله تخمین بزنید.

۱۱-۳۹ نرخ انتقال حرارت را به‌ازای واحد طول برای جریان عبوری از روی سیلندری به قطر  $25 \text{ mm}$  / ۰ که در  $65^\circ\text{C}$  نگهداشته می‌شود محاسبه کنید. محاسبات را برای (الف) هوا در  $20^\circ\text{C}$  و  $1 \text{ atm}$  و (ب) آب در  $20^\circ\text{C}$ ،  $6 \text{ m/s}$ ،  $u_\infty$  انجام دهید.

۱۱-۴۰ آب در  $21^\circ\text{C}$  وارد لوله‌ای به قطر  $3 \text{ mm}$  می‌شود و در  $32^\circ\text{C}$  آن را ترک می‌کند. نرخ جریان به‌اندازه‌ای است که عدد رینولدز  $600$  است. طول لوله  $10 \text{ cm}$  و دمای آن در  $60^\circ\text{C}$  ثابت نگهداشته می‌شود. نرخ جریان آب را محاسبه کنید.

۱۱-۴۱ آب در لوله‌ای با قطر  $2 \text{ cm}$  با سرعت متوسط  $8 \text{ m/s}$  جریان می‌یابد. اگر آب در  $20^\circ\text{C}$  وارد و در  $30^\circ\text{C}$  خارج شود و طول لوله  $10 \text{ m}$  باشد، دمای متوسط دیواره را تخمین بزنید تا انتقال حرارت لازم حاصل شود.

۱۱-۴۲ فرض کنید که نصف انتقال حرارت از یک سیلندر در جریان عرضی، در نیمه جلویی سیلندر اتفاق می‌افتد. با این فرض، انتقال حرارت از سیلندر در جریان عرضی را با انتقال حرارت از صفحه تختی با طولی معادل با فاصله از نقطه سکون بر روی سیلندر مقایسه و

۱- در این مسئله سرعت جریان آنقدر زیاد است که باید تراکم‌پذیری را در نظر گرفت که موضوع آن خارج از بحث

کتاب است. بهتر بود آقای هلمن آن را مطرح می‌کرد. (مترجم)



هدایت حرارتی  $55 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  است و در معرض جابجایی محیط در  $20^\circ\text{C}$  و  $h = 500 \text{ W/m}^2\text{.}^\circ\text{C}$  قرار می‌گیرد. حداکثر اتلاف حرارتی ممکن را برای دمای پایه  $200^\circ\text{C}$  محاسبه کنید. اتلاف حرارتی واقعی چقدر است؟

۱۱-۶۹ فین آلومینیمی به ضخامت  $1/6 \text{ mm}$  بر روی لوله مدوری با قطر خارجی  $2/5 \text{ cm}$  قرار می‌گیرد. فین  $6/4 \text{ mm}$  طول دارد. دیوار لوله در  $150^\circ\text{C}$  نگهداشته می‌شود. دمای محیط  $15^\circ\text{C}$  و ضریب انتقال حرارت جابجایی  $23 \text{ W/m}^2\text{.}^\circ\text{C}$  است. حرارت اتلافی از فین را محاسبه کنید.

۱۱-۷۰ لوله‌ای به قطر  $2/5 \text{ cm}$  دارای فینهایی است با پروفیل مستطیل شکل که به فاصله  $9/5 \text{ mm}$  از همدیگر در طول لوله قرار می‌گیرند. فینها از آلومینیم ساخته شده و ضخامت آنها  $0/8 \text{ mm}$  و طول آنها  $12/5 \text{ mm}$  است. دمای دیوار لوله  $200^\circ\text{C}$  و دمای محیط  $93^\circ\text{C}$  است. ضریب انتقال حرارت  $110 \text{ W/m}^2\text{.}^\circ\text{C}$  است. حرارت اتلافی از لوله را به ازای هر متر طول آن محاسبه کنید.

۱۱-۷۱ یک فین محیطی با مقطع مستطیل شکل، لوله‌ای به قطر  $2/5 \text{ cm}$  را دربر می‌گیرد. طول فین  $6/4 \text{ mm}$  و ضخامت آن  $3/2 \text{ mm}$  است. فین از فولاد نرم ساخته شده است. اگر هوا طوری بر فین بوزد که ضریب انتقال حرارت  $28 \text{ W/m}^2\text{.}^\circ\text{C}$  بشود و دمای پایه و هوا به ترتیب برابر  $260^\circ\text{C}$  و  $93^\circ\text{C}$  باشد، انتقال حرارت از فین را محاسبه کنید.

۱۱-۷۲ فین مستطیل شکل مستقیمی با ضخامت  $2/5 \text{ cm}$  و به طول  $15 \text{ cm}$  از جنس فولاد خارج از دیواری که در دمای  $200^\circ\text{C}$  نگهداشته شده قرار می‌گیرد. دمای محیط  $15^\circ\text{C}$  است و ضریب انتقال حرارت جابجایی آن  $17 \text{ W/m}^2\text{.}^\circ\text{C}$  است. اتلاف حرارتی از فین را به ازای واحد عمق محاسبه کنید.

۱۱-۷۳ یک فین آلومینیمی به ضخامت  $1/6 \text{ mm}$  لوله‌ای به قطر  $2/5 \text{ cm}$  را محصور می‌کند. طول فین  $12/5 \text{ mm}$  است. دمای دیواره لوله  $200^\circ\text{C}$  و دمای محیط  $20^\circ\text{C}$  می‌باشد. ضریب انتقال حرارت  $60 \text{ W/m}^2\text{.}^\circ\text{C}$  است. حرارت اتلافی از فین چقدر می‌باشد؟

۱۱-۷۴ موتور احتراق داخلی مخصوصی که با هوا خنک می‌شود دارای سیلندر چدنی  $(k = 35 \text{ Btu/h.ft.}^\circ\text{F})$  می‌باشد. فینهای روی سیلندر به طول  $5/8$  in و ضخامت  $1/8$  in

است. ضریب جابجایی  $12 \text{ Btu/h.ft}^2.\text{°F}$  و قطر سیلندر  $4 \text{ in}$  است. حرارت اتلافی از فین را برای دمای پایه  $450\text{°F}$  و دمای محیط  $100\text{°F}$  محاسبه کنید.

۱۱-۷۵ یک فین مستطیل شکل به طول  $2/5 \text{ cm}$  و ضخامت  $1/1 \text{ mm}$  است. ضریب هدایت حرارتی  $55 \text{ W/m}^2.\text{°C}$  است. فین در معرض محیط جابجایی در  $20\text{°C}$  و  $h = 500 \text{ W/m}^2.\text{°C}$  قرار می‌گیرد. حرارت اتلافی را برای دمای پایه  $125\text{°C}$  محاسبه کنید.

۱۱-۷۶ فینهای مسی با ضخامت  $1 \text{ mm}$  بر روی لوله‌ای به قطر  $2/5 \text{ cm}$  نصب شده است. طول هر فین  $12 \text{ mm}$  است. دمای لوله  $250\text{°C}$  است و فینها در معرض هوای  $30\text{°C}$  و ضریب انتقال حرارت جابجایی  $120 \text{ W/m}^2.\text{°C}$  قرار می‌گیرد. حرارت اتلافی را برای هر فین محاسبه کنید.

۱۱-۷۷ گازهای داغ خروجی در یک مبدل حرارتی جریان عمودی با لوله فین دار، برای گرم کردن  $2/5 \text{ kg/s}$  آب از  $35\text{°C}$  تا  $85\text{°C}$  به کار می‌رود. گازها ( $c_p = 1/09 \text{ kJ/kg}.\text{°C}$ ) در  $200\text{°C}$  وارد و در  $93\text{°C}$  خارج می‌گردند. ضریب انتقال حرارت کلی  $180 \text{ W/m}^2.\text{°C}$  است. سطح مبدل حرارتی را با استفاده از (الف) روش LMTD (ب) ضریب سودمندی  $NTU$  محاسبه کنید.

۱۱-۷۸ برای مبدل مسأله ۱۱-۷۷ جریان آب به نصف کاهش می‌یابد در حالی که نرخ جریان گاز همراه با دماهای ورودی سیال ثابت باقی می‌ماند. درصد کاهش انتقال حرارت را در نتیجه کاهش نرخ جریان، محاسبه کنید. فرض کنید که ضریب انتقال حرارت کلی ثابت باقی می‌ماند.

۱۱-۷۹ می‌خواهند  $230 \text{ kg/h}$  آب را از  $35\text{°C}$  تا  $93\text{°C}$  با روغن ( $c_p = 2/1 \text{ kJ/kg}.\text{°C}$ ) دارای دمای اولیه  $175\text{°C}$  حرارت دهند. جریان جرمی روغن  $230 \text{ kg/h}$  می‌باشد. دو مبدل حرارتی دو لوله در اختیار است.

$$\text{مبدل ۱: } A = 0/47 \text{ m}^2, U = 570 \text{ W/m}^2.\text{°C}$$

$$\text{مبدل ۲: } A = 0/94 \text{ m}^2, U = 370 \text{ W/m}^2.\text{°C}$$

کدام مبدل باید به کار رود؟

۱۱-۸۰ آب  $35\text{°C}$  با شدت  $230 \text{ kg/h}$  برای خنک کردن در مبدل حرارتی دو لوله‌ای با مساحت

سطح کلی  $1/4 \text{ m}^2$  در اختیار است. آب برای سرد کردن روغن ( $c_p = 2/1 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ) از دمای اولیه  $120^\circ\text{C}$  به کار می‌رود. به دلایلی دمای آب خروجی نباید بیشتر از  $99^\circ\text{C}$  باشد و دمای خروجی روغن نباید کمتر از  $60^\circ\text{C}$  بشود. ضریب انتقال حرارت کلی  $280 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  است. ماکزیم نرخ جریان روغن را که باید خنک شود، تخمین بزنید. جریان آب را در  $230 \text{ kg/h}$  ثابت فرض کنید.

۱۱-۸۱ آب داغ به مبدل حرارتی ناهمسو در  $99^\circ\text{C}$  وارد می‌شود. این مبدل برای گرم کردن جریان آب سرد از  $4^\circ\text{C}$  تا  $32^\circ\text{C}$  به کار می‌رود. نرخ جریان آب سرد  $1/3 \text{ kg/s}$  و نرخ جریان آب گرم  $2/6 \text{ kg/s}$  است. ضریب انتقال حرارت کلی  $830 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  است. سطح مبدل حرارتی چقدر است؟ ضریب سودمندی مبدل حرارتی را محاسبه کنید.

۱۱-۸۲ آب در  $80^\circ\text{C}$  وارد مبدل حرارتی ناهمسو شده و در  $35^\circ\text{C}$  آن را ترک می‌کند. آب برای گرم کردن روغن از  $25^\circ\text{C}$  تا  $48^\circ\text{C}$  به کار می‌رود. ضریب سودمندی مبدل حرارتی چقدر است؟

۱۱-۸۳ آب در  $90^\circ\text{C}$  وارد مبدل حرارتی دو لوله شده و در  $55^\circ\text{C}$  خارج می‌شود. از آن برای گرم کردن روغن خاصی از  $25^\circ\text{C}$  تا  $50^\circ\text{C}$  استفاده می‌شود. ضریب سودمندی مبدل حرارتی را محاسبه کنید.

۱۱-۸۴ مبدل حرارتی دو لوله ناهمسو برای گرم کردن  $0/6 \text{ kg/s}$  آب از  $35^\circ\text{C}$  تا  $90^\circ\text{C}$  به کار می‌رود. نرخ جریان روغن  $0/9 \text{ kg/s}$  است. روغن دارای گرمای مخصوص  $2/1 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$  است و در دمای  $175^\circ\text{C}$  وارد مبدل حرارتی می‌شود. ضریب انتقال حرارت کلی  $425 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  می‌باشد. سطح مبدل حرارتی و ضریب سودمندی آن را محاسبه کنید.

۱۱-۸۵ مبدل حرارتی لوله فین‌دار با جریان عمودی، از آب داغ برای گرم کردن مقدار لازمی از هوا از  $15^\circ\text{C}$  تا  $25^\circ\text{C}$  استفاده می‌کند. آب در  $70^\circ\text{C}$  وارد مبدل حرارتی می‌شود و در  $40^\circ\text{C}$  آن را ترک می‌کند و نرخ انتقال حرارت کلی  $29 \text{ kW}$  می‌باشد. ضریب انتقال حرارت کلی  $45 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  است. سطح مبدل حرارتی را محاسبه کنید.

۱۱-۸۶ نرخ انتقال حرارت را برای مبدل مسأله ۱۱-۸۵ هنگامی که نرخ جریان آب به نصف مقدار

طراحی آن کاهش یابد محاسبه کنید.

۱۱-۸۷ یک چگالنده کوچک بخار آب برای تقطیر  $0.76 \text{ kg/min}$  بخار آب در  $83 \text{ kN/m}^2$  با آب سردکننده در  $10^\circ\text{C}$  طراحی می‌شود. دمای آب خروجی نباید از  $57^\circ\text{C}$  تجاوز نماید. ضریب انتقال حرارت کلی  $3400 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  می‌باشد. سطح لازم را برای مبدل حرارتی دو لوله محاسبه کنید.

۱۱-۸۸ فرض کنید که دمای آب ورودی در مسئله ۱۱-۸۷ به  $30^\circ\text{C}$  افزایش یابد. چه درصد افزایش نرخ جریان لازم است که همان نرخ تقطیر حفظ شود؟

۱۱-۸۹ مبدل حرارتی دو لوله تاهمسو برای گرمایش آب از  $25^\circ\text{C}$  تا  $50^\circ\text{C}$  به وسیله سرمایش روغن از  $100^\circ\text{C}$  به  $65^\circ\text{C}$  مورد استفاده قرار می‌گیرد. مبدل برای انتقال حرارت کلی  $29 \text{ kW}$  با ضریب انتقال حرارت کلی  $340 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  طراحی شده است. سطح مبدل حرارتی را محاسبه کنید.

۱۱-۹۰ واحد بازیابی حرارتی هوا-به-هوا، از یک مبدل حرارتی با جریان عمودی و بدون مخلوط شدن گازها و جریان هوای  $0.5 \text{ kg/s}$  در هر دو طرف آن، استفاده می‌کند. هوای داغ در  $40^\circ\text{C}$  و هوای سرد در  $20^\circ\text{C}$  وارد می‌شود. دماهای خروجی را برای  $U = 40 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  و سطح مبدل حرارتی  $20 \text{ m}^2$  محاسبه کنید.

۱۱-۹۱ فرض کنید هر دو جریان در مسئله ۱۱-۹۰ به نصف کاهش یابد. دماهای خروجی در این حالت چقدر خواهد بود، با فرض این که  $U$  تغییری نکند؟ در صورتی که نرخهای جریان دوبرابر گردد چه می‌شود؟

۱۱-۹۲ آب داغ در  $90^\circ\text{C}$  در لوله‌های یک مبدل حرارتی با لوله فین‌دار به کار می‌رود. هوا در  $1 \text{ atm}$ ،  $30^\circ\text{C}$  با نرخ جریان  $65 \text{ kg/min}$  در عرض فینها جریان می‌یابد. ضریب انتقال حرارت کلی  $52 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  است و دمای خروجی هوا باید  $45^\circ\text{C}$  باشد. اگر سطح کلی  $8 \text{ m}^2$  باشد، دمای آب خروجی را محاسبه کنید.

## مراجع

- York, 1986.
- 2 Schneider, P. J.: "Conduction Heat Transfer," Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading Mass., 1955.
  - 3 Kern, D. Q., and A. D. Kraus: "Extended Surface Heat Transfer," McGraw-Hill Book Company, New York, 1972.
  - 4 Sparrow, E. M., and R. D. Cess: "Radiation Heat Transfer," Wadsworth Publishing Company, Belmont, Calif., 1966.
  - 5 Eckert, E. R. G., and R. M. Drake: "Heat and Mass Transfer," 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1959.
  - 6 Kays, W. M., and A. L. London: "Compact Heat Exchangers," 3d ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1982.
  - 7 Kraus, A. D.: "Heat Transfer Software," McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.
  - 8 Rudenberg, R.: Die Ausbreitung der Luft-und Erdfelder und Hochspannungsleitungen, besonders bei Erd-und Kurzschlüssen, *Electrotech. Z.*, vol. 46, p. 1342, 1925.
  - 9 Andrews, R. V.: Solving Conductive Heat Transfer problems with Electrical Analogue Shape Factors, *Chem. Eng. Prog.*, vol. 51, no. 2, p. 67, 1955.



# فصل ۱۲

## اصول ترمودینامیک آماری

### ۱۲-۱ مقدمه

تا این جا بیشتر بر ترمودینامیک میکروسکپی و اصل بقای انرژی تأکید شده است. در فصل مقدماتی پاره‌ای مسائل مربوط به ترمودینامیک میکروسکپی بررسی گردید، اما چگونگی ارتباط بررسیها با کل موضوع ترمودینامیک را تا به حال نشان نداده‌ایم. چند پیامد تجربی قانون دوم ترمودینامیک نیز مطرح شد، اما ارتباط آنها با رفتار میکروسکپی ماده هنوز روشن نشده است. هدف این فصل برقراری ارتباط بین مدلسازی ریاضی - فیزیکی با مفاهیم ترمودینامیک میکروسکپی است که کاربردهای بخصوصی از آن در فصل ۱۳ بررسی خواهد شد. تأکید می‌کنیم که نباید انتظار داشت در این فصل به نتایج مشخصی برسیم. همان طوری که نشان خواهیم داد، تحلیل میکروسکپی تنها زمانی می‌تواند نتایج ثمر بخشی داشته باشد که با قوانین طبیعی میکروسکپی ترمودینامیک تلفیق شود. به این دلیل ما به تحلیل میکروسکپی در فصلهای ۵ و ۶ مراجعه خواهیم کرد تا ارتباط مناسبی بین مدل‌های میکروسکپی این فصل و رفتار ماده، چنان که در سیستم‌های مهندسی محدود مشاهده می‌شود، ایجاد کنیم.

### ۱۲-۲ احتمال

در بحث ما، احتمال عبارت است از نسبت دفعاتی که یک پدیده مشخص در تعداد زیادی از

رویدادها مشاهده می‌شود. اگر یک سکه سالم را به دفعات زیاد بالا بیندازیم، به تعداد نصف آن دفعات بر روی شیر (یا خط) به زمین خواهد آمد و همچنین یک تاس سالم هنگامی که به دفعات زیاد انداخته شود، به تعداد  $\frac{1}{6}$  آن دفعات بر روی هر وجه خاص بر زمین می‌آید و احتمال کشیدن یک کارت بخصوص از یک دسته ورق  $\frac{1}{52}$  می‌باشد و غیره و غیره. به دنبال، شمارش تعداد راههایی که اشیاء مختلف و یا گروههایی از اشیاء را می‌توان با محدودیتهای خاصی منظم کرد، مورد علاقه می‌باشد. این فرآیند شمارش به احتمال مربوط می‌شود، زیرا احتمال رویداد یک حادثه مشخص عبارت است از تقسیم تعداد راههایی که آن حادثه می‌تواند اتفاق بیفتد بر تعداد کل حوادث ممکن. برای مثال، انداختن دو تاس را در نظر بگیرید. ممکن است بخواهیم بدانیم چقدر احتمال دارد که یک هفت به دست آید. شش راه متفاوت برای حصول هفت موجود است و ۳۶ آرایش ممکن وجود دارد. بنابراین، احتمال داشتن یک هفت،  $\frac{6}{36}$  یا  $\frac{1}{6}$  می‌باشد. اگر احتمال اتفاق افتادن حوادث مجزا را بدانیم، احتمال این که هر کدام از حوادث اتفاق بیفتد برابر است با مجموعه‌ای از احتمالات جداگانه برای آن حوادث. در انداختن دو تاس احتمال این که جفت شش اتفاق بیفتد برابر  $\frac{1}{36}$  است (برای این که فقط یک حالت می‌تواند اتفاق بیفتد)، بنابراین احتمال<sup>۱</sup> این که جفت شش و یا هفت اتفاق بیفتد برابر است با

$$\frac{6}{36} + \frac{1}{36} = \frac{7}{36}$$

اگر چندین حادثه مستقل در یک زمان اتفاق بیفتد، به طوری که هر حادثه دارای احتمال مستقل  $p_i$  باشد، احتمالی که شامل وقوع کلیه حوادث در یک زمان است، از حاصل ضرب احتمالات هر حادثه به تنهایی به دست می‌آید. بدین ترتیب

$$p = \prod_i p_i \quad (۱۲-۱)$$

در این جا  $\Pi$  علامت حاصل ضرب است. احتمالی برابر با واحد، مربوط به یک امر مسلم می‌شود. محاسبه تعداد راههای قرار دادن اشیاء در یک دنباله<sup>۲</sup> جالب خواهد بود. اجازه دهید فرض کنیم که  $N$  شیئی تمیزپذیر داریم و می‌خواهیم تعداد راههای مختلفی را که ممکن است این اشیاء را در یک

1- Probability

2- Sequence



دنباله مرتب کرد محاسبه کنیم. برای اولین شیئی در دنباله تعداد  $N$  انتخاب وجود دارد، برای دومین شیئی  $N-1$  انتخاب،  $N-2$  انتخاب برای سومین شیئی و غیره وجود دارد. بنابراین تعداد کل دنباله‌های ممکن برابر است با

$$N(N-1)(N-2) \dots (2)(1) = N! \quad (12-2)$$

لازم به تذکر است که تمام این دنباله‌های ممکن مشابه می‌شوند اگر اشیاء تمیز ناپذیر بودند. برای مثال، دنباله‌های متفاوت از یک سری سکه‌های مشابه همگی یکسان می‌شدند. از طرف دیگر یک دنباله از کارتهای بازی دارای احتمالات متفاوت می‌بود.

بحثهای بعدی مربوط است به تعداد راههایی که ذرات میکروسکوپی ممکن است در میان حالات انرژی مختلف شامل محدودیتهای مخصوصی نظیر بقای انرژی و جرم بشود. هنگامی که بتوانیم تعداد ذرات اشغال کننده هر حالت انرژی را تخمین بزنیم بدین ترتیب ممکن است کل انرژی تمام ذرات را با اجرای مجموعه زیر محاسبه کنیم.

$$E = \sum n_i \varepsilon_i$$

در اینجا  $\varepsilon_i$  تراز انرژی است و  $n_i$  تعداد ذرات اشغال کننده این تراز انرژی می‌باشد. حالات انرژی مجازی که یک ذره ممکن است داشته باشد از مکانیک کوانتومی محاسبه می‌شود.

### ۱۲-۳ فضای فازی<sup>۱</sup>

در فصل مقدمه شباهت بین مکانیک و ترمودینامیک ترسیم شد، تا حدی که جسم آزاد تشبیه به مفهوم سیستم شد و نشان داده شد که خواص ترمودینامیکی شبیه مختصات فضا و سرعت (یا ممتوم) در مکانیک است. بیش از یک باز تذکر داده شده است که خواص ترمودینامیکی قابل مشاهده یعنی خواصی ماکروسکوپی وابسته به حالت میکروسکوپی سیستم می‌باشند. اگر دقیقاً می‌توانستیم بگوییم که چه اتفاقی در سطح میکروسکوپی می‌افتد، به احتمال قوی می‌توانستیم خواص ترمودینامیکی ماکروسکوپی را

محاسبه کنیم.

فضای فازی یک فضای شش بعدی است که از سه مؤلفه کارترین در فضا،  $x$ ،  $y$  و  $z$  و سه مؤلفه منتوم  $p_x$ ،  $p_y$  و  $p_z$  تشکیل شده است، که  $p$  مشخص کننده بردار منتوم می باشد:

$$p_x = mv_x$$

$$p_y = mv_y$$

$$p_z = mv_z$$

در حقیقت فضای فازی چیز جدیدی نیست. فضای فازی مفهومی است که در مکانیک حتی برای حل مسائل منتوم ضربه‌ای<sup>۱</sup> ساده به کار می‌رود. صرفاً این واقعیت را بیان می‌نماید که به منظور مشخص کردن دقیق حالت دینامیکی یک ذره احتیاج به دانستن ۶ مؤلفه است. نام فضای فازی را برای ناحیه‌ای که به وسیله این مؤلفه‌ها تشکیل می‌شود انتخاب می‌کنیم. این حقیقت که فضای ۶ بعدی به آسانی قابل درک نیست، مفهوم اساسی را تغییر نمی‌دهد. اگر بتوانیم موقعیت هر ذره میکروسکوپی را در فضای فازی تعیین کنیم، دقیقاً می‌توانیم حالت ترمودینامیکی سیستم را مشخص نماییم.

## ۴-۱۲ ملاحظات کوانتومی

بخوبی مشخص است که مکانیک کلاسیک باید موقعی که در مقیاس میکروسکوپی عمل می‌کند با نظریه کوانتومی کامل و اصلاح گردد. مقصود از این بحث مختصر دربارهٔ نظریه کوانتومی عبارت است از برقراری اصولی برای یک مدل فیزیکی واقعی که خواص و رفتار ماده را در مقیاس میکروسکوپی شرح دهد و نشان دهد که چگونه استفاده از این مدل فیزیکی می‌تواند منجر به محاسبه خواص ترمودینامیکی ماکروسکوپی سازگار با نتیجه آزمایش شود. منظور ما استفاده از اصول نظریه کوانتومی برای برقراری یک مدل فیزیکی جهت تحلیلهای ترمودینامیکی است. بنابراین ما به تکامل تاریخی موضوع نخواهیم پرداخت، اما خواننده را به مرجع [1] برای اطلاعات بیشتری در این زمینه رجوع می‌دهیم.

قضیه اساسی نظریه کوانتومی عبارت است از این که انرژی تنها در کوانتاهای مجزا<sup>۱</sup> اتفاق می‌افتد و علاوه بر ماهیت موجی دارای ماهیت ذره‌ای نیز می‌باشد. نمو مشخصه انرژی برای تابش الکترومغناطیس برابر است با

$$E = h\nu \quad (۱۲-۳)$$

$\nu$  فرکانس تابش و  $h$  عبارت است از ثابت پلانک با مقدار  $۶.۶۲۵ \times ۱۰^{-۳۴}$  J.s. انتقال انرژی در سطح میکروسکوپی در نتیجه گذار از یک حالت کوانتومی به حالت دیگر صورت می‌گیرد. در این فرآیند گذار<sup>۲</sup> فوتون حاوی انرژی داده شده به وسیله معادله (۱۲-۳) غالباً بسته به جهت انتقال، انرژی منتشر و یا جذب می‌کند. بر اساس مشاهدات تجربی، مراحل گذرای انرژی به صورت نموهای مجزا صورت گرفته و بدین ترتیب مفاهیم کوانتومی به عنوان فرضهای مسلم فیزیک پذیرفته می‌شود. تابش الکترومغناطیس با سرعت نور ( $c$ ) حرکت کرده و طول موج آن  $\lambda$  به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$c = \lambda\nu \quad (۱۲-۴)$$

بر طبق نظریه ویژه نسبیت، انرژی با جرم بوسیله رابطه زیر مربوط می‌شود.

$$E = mc^2 \quad (۱۲-۵)$$

بنابراین "جرم" یک فوتون به صورت زیر تعریف می‌شود

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} \quad (۱۲-۶)$$

و ممنتوم یک فوتون به صورت زیر محاسبه می‌گردد

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (۱۲-۷)$$

---

1- Discrete quanta

2- Transition process

کلیه اصول فیزیکی مبتنی بر تجربه است. این در مورد نظریه کوانتمی نیز مانند اصول بقای انرژی ماکروسکوپی صادق است. اگرچه یک اصل اضافی، دقتی را که در آن اندازه گیریها در مقیاس میکروسکوپی می تواند انجام شود محدود می کند. اصل عدم قطعیت هایزنبرگ<sup>۱</sup> مشخصات متموم و جابه جایی نموی<sup>۲</sup> را بر طبق رابطه زیر محدود می کند.

$$\Delta p_x \Delta x \sim h \quad (۸-۱۲)$$

یعنی هرچه ما موقعیت یک ذره را دقیقتر اندازه بگیریم، اندازه گیری متموم دقت کمتری خواهد داشت. نتیجه کلی اصل عدم قطعیت یعنی بهترین کاری که می توانیم امیدوار به انجامش باشیم این است که ذرات را در حجمهای کوچکی از فضای فازی به ابعاد  $h^3$  قرار دهیم. این شبیه است به داشتن چندین جعبه هم اندازه با گلوله هایی که در داخل جعبه ها قرار داده شده است. در هر جعبه بسته است به طوری که نتوان موقعیت دقیق هر گلوله را در جعبه مشخص کرد. تنها مجاز هستیم که تعداد گلوله ها را در هر جعبه مشخص کنیم.

در اولین نگاه ممکن است بیان شود که اصل عدم قطعیت مسأله جدی را در اندازه گیری ایجاد نمی کند، زیرا عدم قطعیت های مجاز خیلی کوچکند. اصل عدم قطعیت در مورد سیستم های ماکروسکوپی محدودیتی ایجاد نمی کند اما در تحلیل سیستم های میکروسکوپی که دارای ابعاد و متموم های خیلی کوچک است محدودیت قابل ملاحظه ای را ایجاد می کند.

نظریه کوانتمی فرض می کند که ذرات مانند تشعشع الکترومغناطیس دارای انرژیها و متموم هایی است که پیمانه ای (کوانتیره) هستند و دارای خواص موجی می باشند. از معادله (۷-۱۲) طول موج مشخصه<sup>۳</sup> بر حسب مقدار متموم به صورت زیر بیان می شود

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (۹-۱۲)$$

به طور کلی، می توان انتظار داشت که ذرات فقط دارای سرعتها و متموم هایی باشند که منجر به اعداد

1- Heisenberg uncertainty principle

2- Incremental displacement

۳- این پارامتر غالباً بنام طول موج دو بروگلی (De Broglie) مشهور است.

صحیحی از طول موجهای مشخصه می‌شود. یعنی اگر طول موج مشخصه نسبت به بعد مشخصه ذره یا جابه‌جایی مشخصه مربوط به حرکت ذره خیلی کوچک باشد تأثیرات کوانتومی خیلی مهم نخواهد بود چون تعداد زیادی از طول موجها برای حرکت ذره قابل دسترس است به طوری که یک طیف جابه‌جایی پیوسته<sup>۱</sup> مشاهده می‌شود. می‌توان ماهیت این بحث را با بررسی دو نمونه ساده ببینیم.

ابتدا حرکت  $1 \text{ kg}$  جرم در سرعت  $1 \text{ m/s}$  را در نظر می‌گیریم. طول موج مشخصه برای این حرکت برابر است با

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.625 \times 10^{-34}}{(1)(1)} = 6.625 \times 10^{-34} \text{ m}$$

مطمئناً هیچ‌گونه محدودیت بزرگی در بیان این‌که حرکت این جرم ممکن است تنها در نمو  $10^{-24} \times 6 \text{ m}$  اتفاق بیفتد موجود نیست. بنابراین، همچنان که از ابتدا مشخص بود می‌توان نتیجه گرفت که ملاحظات کوانتومی در این حرکت مهم نیست.

حالا حرکت یک الکترون با جرم  $10^{-31} \times 9/106 \text{ kg}$  در سرعت  $10^6 \text{ m/s}$  را در نظر بگیریم. طول موج مشخصه در این حالت برابر است با (صرف نظر از اثر نسبیت)

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.625 \times 10^{-34}}{(9.106 \times 10^{-31})10^6} = 7.28 \times 10^{-10} \text{ m}$$

اگرچه مقدار  $10^{-10} \times 7/28 \text{ m}$  به نظر فاصله خیلی کمی می‌رسد، اما برای حرکت ذرات میکروسکوپی مقدار کاملاً بزرگی است. به منظور مقایسه، می‌توان توجه کرد که شعاع یک ملکول اکسیژن حدود  $10^{-10} \times 2 \text{ m}$  می‌باشد. بنابراین طول موج مذکور در مقایسه با حرکت الکترون نسبتاً بزرگ است و می‌توان انتظار داشت که اثرات کوانتومی، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی حرکت الکترون اعمال کند.

هدف از این بحث مختصر، تنها این بوده است که نشان دهد اثرات کوانتومی می‌تواند هنگام در نظر گرفتن حرکت، انرژی و توزیع منتوم ذرات میکروسکوپی قابل ملاحظه باشد. بسط روشهای محاسبه دقیق برای توزیع انرژی مکانیک کوانتم از حیطه بحث ما خارج است.

۵-۱۲ تبهگنی (چندگانگی)<sup>۱</sup>

قبلاً دریافته‌ایم که انرژی در سطح میکروسکوپی پیمانه‌ای می‌باشد. علاوه بر نظر ترازهای انرژی مجزا، همچنین باید قبول نمود که تراز انرژی ویژه‌ای می‌تواند در بیش از یک حالت اتفاق بیفتد و اصول مکانیک کوانتم نیز همچنان صادق باشد. برای یک تراز انرژی کوانتم داده شده  $\epsilon_i$  تعداد حالات کوانتمی دارای انرژی  $\epsilon_i$  را با سمبل  $g_i$  مشخص خواهیم کرد. اگر بیش از یک حالت کوانتمی با انرژی  $\epsilon_i$  ممکن باشد، سیستم ذرات تبهگن نامیده می‌شود. در حال حاضر هیچ علامت مشخصه‌ای به عنوان مقادیر ممکن  $g_i$  برای ترازهای انرژی مختلف نداریم، اما می‌توان یک فهم فیزیکی از ایده تبهگنی، با در نظر گرفتن یک ذره تنها که دارای سه درجه آزادی انتقال باشد، به دست آوریم. اجازه دهید واحد انرژی را انتخاب کنیم که حداقل نمو مجاز بر طبق ملاحظات کوانتمی است و سپس تعداد راههای ممکن را که به وسیله آنها چهار تراز انرژی می‌تواند حاصل شود بررسی کنیم. حالات مورد نظر در شکل ۱-۱۲ شرح داده شده است. این جدول بندی ساده نشان می‌دهد که تعداد حالات کوانتمی ممکن با افزایش ترازهای انرژی خیلی سریع ازدیاد می‌یابد. ممکن است اظهار کنیم که حداقل نمو

۱ واحد انرژی (eu) = حداقل نمو کوانتمی											
$\epsilon_i = 0$			$\epsilon_i = 1 \text{ eu}$			$\epsilon_i = 2 \text{ eu}$			$\epsilon_i = 3 \text{ eu}$		
$KE_x$	$KE_y$	$KE_z$	$KE_x$	$KE_y$	$KE_z$	$KE_x$	$KE_y$	$KE_z$	$KE_x$	$KE_y$	$KE_z$
0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
			0	1	0	0	1	1	1	2	0
			0	0	1	1	0	1	1	0	2
						2	0	0	2	1	0
						0	2	0	0	1	2
						0	0	2	2	0	1
									0	2	1
									3	0	0
									0	3	0
									0	0	3
$g_i = 1$			$g_i = 3$			$g_i = 6$			$g_i = 10$		

شکل ۱-۱۲ نمایش مفهوم تبهگنی برای مدل انرژی جنبشی انتقالی ساده

انرژی کوانتومی نمی تواند برای تمام انواع انرژی همیشه یکسان باشد. برای مثال یک ملکول گاز دو اتمی می تواند شامل انواع انرژی، انتقالی، چرخشی و ارتعاشی مطابق شکل ۲-۱۲ باشد. نمو انرژی کوانتومی مشخص برای انرژی چرخشی نمی تواند مانند انرژی انتقالی باشد و لذا در محاسبات بعدی لزوم در نظر گرفتن آن را درخواستیم یافت. از این رو اصطلاح **تیهگنی** ممکن است برای چندین نوع انرژی به کار رود.

جالب است که در این جا توجه شود که برای گازهای ایده آل در دماهای نسبتاً بالا (دمای اطاق نسبتاً بالاست) تعداد حالات انرژی موجود نسبت به تعداد ذراتی که این حالات را اشغال می کنند خیلی زیاد است. چنین گازی خیلی **تیهگن** است زیرا حالات زیادی است که دارای تراز انرژی یکسانی می باشد.

سیستم **ناتیهگن** سیستمی است که  $g_i = 1$  باشد یعنی هر تراز انرژی می تواند تنها به یک طریق حاصل شود.

## ۱۲-۶ حالات میکروسکپی<sup>۱</sup>، حالات ماکروسکپی<sup>۲</sup> و احتمال ترمودینامیکی<sup>۳</sup>

اکنون اجازه دهید ملکولهای یک گاز تک اتمی که مانند گویهای بیلیارد عمل می کنند را در نظر بگیریم. احتمالاً می توانستیم انرژی داخلی گاز را با گرفتن مجموعه انرژیهای جنبشی تمام ملکولها محاسبه کنیم. فشار گاز را می توانستیم بر حسب سباده منتوم ملکولهای گاز با دیواره ظرف بیان کنیم. برای مشخص کردن حالت میکروسکپی چنین سیستمی باید مکان دقیق و سرعت هر ذره را در فضای فازی مشخص کرد. یعنی باید موقعیت و سرعت هر ذره را در سیستم مشخص کرد. اگرچه چنین مشخصات کاملی برای محاسبه خواص ترمودینامیک قابل مشاهده ماکروسکپی لازم نیست. یعنی برای محاسبه انرژی نیاز داریم که فقط تعداد ذراتی را که دارای انرژی جنبشی (یا سرعت) معینی می باشند بدانیم. به عبارت بهتر، احتیاج داریم که تعداد ذرات هر المان حجم (یک المان ۶ بعد) از فضای فازی را

---

1- Microstates

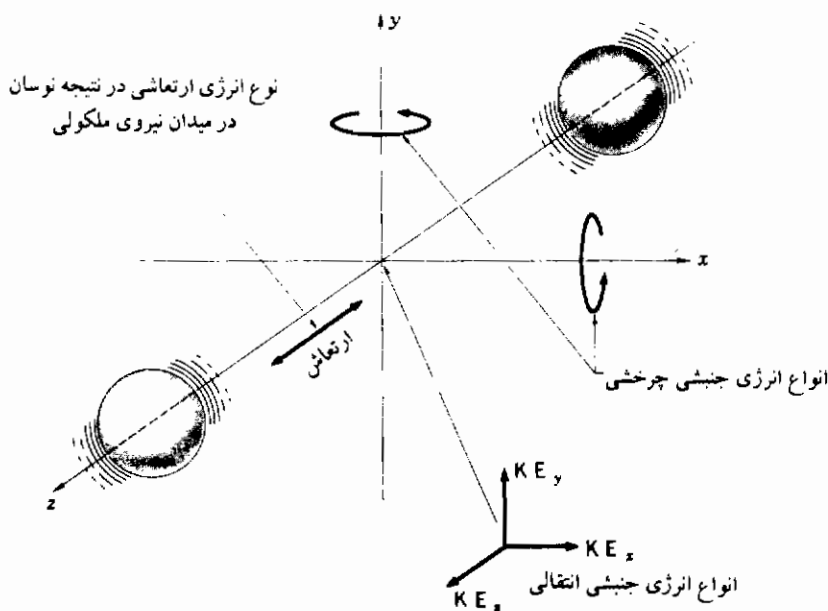
2- Macrostates

3- Thermodynamic probability

بدانیم و لازم نیست که مشخص کنیم کدام ذره در هر المان حجم می باشد. هنگامی که تعداد ذرات در هر المان فضای فازی مشخص گردید، بدون توجه به این که کدام ذرات درگیر می باشند می گوئیم که یک حالت ماکروسکوپی تعیین شده است. بعداً چیزهای بیشتری در مورد این مفاهیم خواهیم گفت، اما خواننده باید تشخیص دهد که تعیین حالت ماکروسکوپی سیستم چون به خواص ترمودینامیکی قابل مشاهده مربوط می شود مورد توجه اصلی خواهد بود.

قبل از اینکه بتوانیم مدلهای فیزیکی فوق را تحلیل کنیم، چندین مقدمه ریاضی مورد نیاز است. این مقدمه ها در جهت محاسبه تعداد تبدیلات<sup>۱</sup> و ترکیباتی<sup>۲</sup> که ممکن است از طریق آرایش گویها در جعبه ها حاصل شود، می باشد. بعداً گویها معرف ذرات و جعبه ها معرف ترازهای انرژی و حالات کوانتمی خواهند بود که ذرات ممکن است اشغال کنند.

منظور نهایی ما تعیین حالت ماکروسکوپی که بیشترین احتمال را دارد و سپس محاسبه انرژی



شکل ۱۲-۲ انواع انرژی برای یک ملکول دو اتمی



مربوط به این حالت می باشد. محتملترین حالت ماکروسکپی حالتی خواهد بود که بیشترین تعداد حالات میکروسکپی ممکن را دارد، یعنی آن حالتی که می تواند در بیشترین تعداد اتفاق بیفتد. در محاسبات بعدی کمیت  $\Omega$  را به نام احتمال ترمودینامیکی تعیین خواهیم کرد که معرف تعداد حالات میکروسکپی مربوط به حالت ماکروسکپی می باشد که مجموع هفت را از انداختن (تاس) می دهد. با ریختن تاس شش راه مختلف رسیدن به هفت وجود دارد، بنابراین شش حالت میکروسکپی برای حالت ماکروسکپی مشخص شده وجود دارد. در این حالت می گفتیم که مقدار  $\Omega$  برابر ۶ می باشد. مقدار  $\Omega$  برای انداختن یازده برابر دو می بود و غیره. این نکته مهم را باید به خاطر سپرد که تعداد آرایشها متناسب با احتمال است به طوری که مطالعه احتمال مشاهده آرایشهای مشخصی می تواند به وسیله بررسی رفتار  $\Omega$  حاصل شود.

سه حالت ریاضی مربوط به مدلهای فیزیکی بعدی بدین قرار است.

حالت ۱ تعداد راههایی که مجموع  $N$  گوی تمیزپذیر ممکن است در یک سری از جعبه های بزرگ به صورت  $N_1$  گوی در جعبه اول،  $N_2$  گوی در جعبه دوم،  $N_i$  گوی در جعبه  $i$ ام و غیره، بدون هیچ گونه محدودیتی در تعداد گویها در هر جعبه (واضح است تعداد گویها نمی تواند از  $N$ ، تعداد مجموع گویها بیشتر باشد) قرار داده شوند. در داخل هر جعبه بزرگ  $i$ ام تعداد  $g_i$  جعبه کوچکتر تمیز پذیر می باشند و  $N_i$  گوی ممکن است در داخل آنها توزیع شده باشد.  $g_i$  تعداد جعبه های کوچک می تواند از  $N_i$  تعداد گویهایی که در داخل آنها توزیع خواهد شد بزرگتر و یا کوچکتر باشد و تعداد جعبه های کوچک در هر جعبه بزرگ الزاماً به یک اندازه نیست. این حالت در شکل ۳-۱۲ نشان داده می شود.

حالت ۲ مانند حالت ۱ می باشد با این تفاوت که گویها تمیزناپذیر هستند.

حالت ۳ مانند حالت ۲ می باشد با این تفاوت که یک محدودیت بر سیستم اعمال می شود، به طوری که بیش از یک گوی نمی تواند در هر جعبه کوچک گذاشته شود.

در این مدلها جعبه های بزرگ مربوط به ترازهای انرژی، جعبه های کوچک مربوط به تعداد حالات کوانتومی در هر تراز انرژی یا تبهگنی خواهند بود و گویها ذرات می باشند.

حالت ۱ را می توان به طریق زیر محاسبه کرد. کل تعداد راههای  $N$  گوی تمیز پذیر که می توان به ترتیب قرار داد برابر با  $N!$  می باشد. تعداد راههایی که گویها در داخل جعبه های بزرگ قرار می گیرند

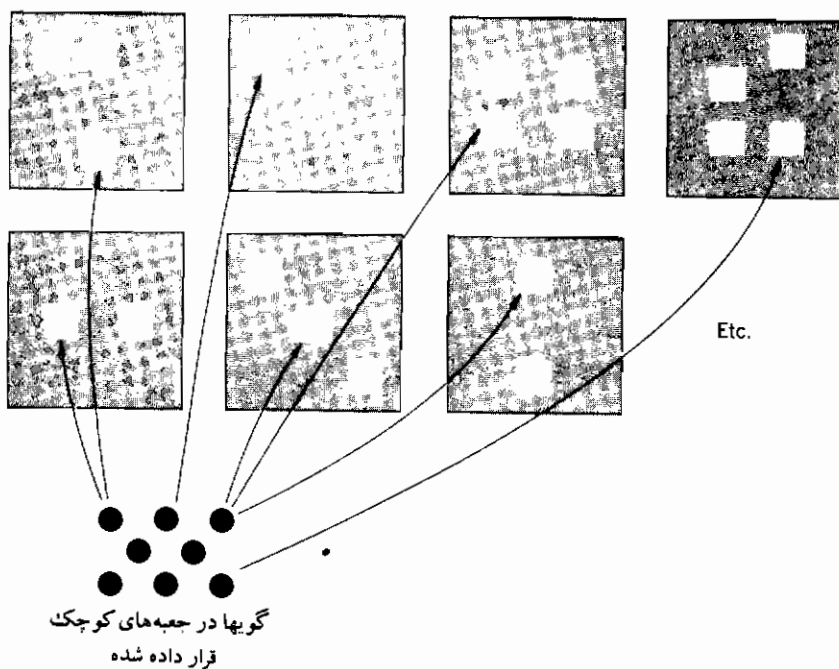
برابر با  $N_1!$  در داخل جعبه اول،  $N_2!$  در داخل جعبه دوم و غیره می‌باشد. بدین ترتیب اگر بخواهیم تعداد راههایی را که گویها در جعبه‌های بزرگ متفاوت قرار می‌گیرند تعیین کنیم باید بر تعداد آرایشها در هر جعبه بخش کنیم به فرم خارج قسمت زیر

$$\frac{N!}{N_1! N_2! N_3! \dots N_i!}$$

یا

$$\Omega = \frac{N!}{\prod_i N_i!} \quad (۱۲-۱۰)$$

که  $N_i$  تعداد گویها در جعبه بزرگ  $i$ ام را مشخص می‌کند. همچنین باید تعداد راههای ممکني را در نظر بگیریم که  $N_i$  گوی ممکن است در  $g_i$  جعبه کوچک گذاشته شده در هر جعبه بزرگ قرار داده شوند. برای هر گوی،  $g_i$  انتخاب داریم به طوری که برای تمام گویها در جعبه بزرگ  $i$ ام تعداد امکانات



شکل ۱۲-۳ گویها و جعبه‌ها برای محاسبه تعداد آرایشها

زیر را داریم:

$$g_i \cdot g_i \cdot g_i \dots = g_i^{N_i} \quad (12-11)$$

بنابراین نتیجه می‌گیریم که  $g_i^{N_i}$  راه ممکن برای قرار دادن  $N_i$  گوی در  $g_i$  جعبه کوچک داخل جعبه بزرگ  $i$  ام وجود دارد. این بدین معنی است که معادله (۱۰-۱۲) برای در نظر گرفتن تمام آرایشهای ممکن باید به صورت زیر اصلاح گردد.

$$\Omega = \frac{N!}{\prod_i N_i!} g_1^{N_1} g_2^{N_2} g_3^{N_3} \dots g_i^{N_i}$$

یا

$$\Omega = N! \prod_i \frac{g_i^{N_i}}{N_i!} \quad (12-12)$$

حالت ۲ تا اندازه‌ای پیچیده‌تر می‌باشد. در این مورد فرض می‌شود که گویها تمیزناپذیر باشند به طوری که تبدیلات تعداد گویهای داخل یک جعبه آرایش اصلی را تغییر ندهد. تعداد  $g_i$  جعبه کوچک از نوع  $i$  ام وجود دارد و کل  $N_i$  گوی تمیزناپذیر میان جعبه‌ها توزیع می‌شود. اجازه دهید ابتدا تعداد راههای قرار دادن  $N_i$  گوی تمیزناپذیر را در  $g_i$  جعبه تمیزپذیر در نظر بگیریم. فرض کنید که با قرار دادن یکی یکی  $N_i$  گوی در  $g_i$  جعبه کوچک شروع می‌کنیم و فرض می‌کنیم که فعلاً گویها تمیزپذیر باشند. برای نشان دادن ماهیت فرآیند شمارش، جعبه‌های کوچک را با شماره‌های ۱، ۲، ۳، و غیره و گویها را با حروف  $A, B, C$  و غیره مشخص خواهیم کرد. برای دو جعبه و دو گوی تعداد آرایشهای ممکن بدین قرار است:

1 A,	2 B	2 B,	1 A
1 AB,	2 0	2 0,	1 AB
1 BA,	2 0	2 0,	1 BA
1 B,	2 A	2 A,	1 B
1 0,	2 AB	2 AB,	1 0
1 0,	2 BA	2 BA,	1 0

صفر مشخص می‌کند که گویی در جعبه نمی‌باشد. اگر لیست را با تعداد بیشتری از گویها و جعبه‌ها بسط دهیم، به دست می‌آوریم که هر آرایش ممکن می‌تواند به وسیله یک دنباله که با یک عدد (یک جعبه) شروع شده و شامل تمام حروف (گویها) و اعداد دیگر می‌باشد مشخص شود. کل تعداد دنباله‌هایی از  $g_i$  و  $N_i$  شیئی تمیزپذیر برابر است با

$$(g_i + N_i)! = (g_i + N_i)(g_i + N_i - 1)!$$

و تعداد که همیشه با  $g_i$  (یک جعبه) شروع می‌شود برابر است با

$$g_i(g_i + N_i - 1) \quad (۱۲-۱۳)$$

برحسب گویها و جعبه‌هایمان، این تعداد راههای قرار دادن  $N_i$  گوی تمیزپذیر در  $g_i$  جعبه تمیزپذیر می‌باشد. چون گویها واقعاً تمیزناپذیرند، یک چنین جفت دنباله‌هایی مانند

$$\begin{array}{ll} 1 A, & 2 B \\ 1 AB, & 2 0 \end{array} \quad \begin{array}{ll} 1 B, & 2 A \\ 1 BA, & 2 0 \end{array}$$

واقعاً یکسان هستند. حالا دو جفت زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{array}{ll} 1 AB, & 2 0 \\ 1 B, & 2 A \end{array} \quad \begin{array}{ll} 2 0, & 1 AB \\ 2 A, & 1 B \end{array}$$

بر حسب حالت میکروسکوپی سیستم، آرایشها در هر جفت یکسان می‌باشند. تفاوتی نمی‌کند که جعبه‌های کوچک (حالات انرژی) چگونه قرار داده شوند و موضوع مهم تعداد ذرات در هر کدام است. می‌توانیم تمیزناپذیر بودن گویها و مهم نبودن ترتیب جعبه‌های کوچک را با تقسیم رابطه (۱۲-۱۳) به ترتیب توسط  $N_i!$  و  $g_i!$  در نظر بگیریم به طوری که

$$\Omega_i = \frac{g_i(g_i + N_i - 1)!}{g_i! N_i!} = \frac{g_i(g_i + N_i - 1)!}{g_i!(g_i - 1)! N_i!}$$

یا

$$\Omega_i = \frac{(g_i + N_i - 1)!}{(g_i - 1)! N_i!} \quad (۱۲-۱۴)$$

کل احتمال ترمودینامیکی با گرفتن حاصل ضرب کلیه چنین توابعی برای تمام جعبه‌های "بزرگ" محاسبه می‌شود.

$$\Omega = \prod_i \Omega_i = \prod_i \frac{(g_i + N_i - 1)!}{(g_i - 1)! N_i!} \quad (12-15)$$

در این معادله از رابطه حاصل ضرب در معادله (۱۲-۱) استفاده کرده‌ایم که کل احتمال را به احتمال حوادث مستقل مربوط می‌کند.

لازم به تذکر است که معادله (۱۲-۱۵) هنگامی که  $g_i \gg 1$  باشد به صورت رابطه زیر خلاصه می‌شود.

$$\Omega = \prod_i \frac{(g_i + N_i)!}{g_i! N_i!} \quad (12-16)$$

لازم است در این جا توجه شود که اگرچه هر یک از حالات کوانتم ( $g_i$ ) بتنهایی تمیزپذیر است اما برای تعیین احتمال ترمودینامیکی آنها طوری رفتار می‌کنند که گویی تمیزناپذیرند. به طور خلاصه می‌توانیم ببینیم که این استدلال با دنباله ۱، ۲، ۳، ۴، B که در بالا مورد بحث قرار گرفت ( $N_i = 2$  و  $g_i = 2$ ) چگونه عمل می‌کند. برای چهار شیئ تمیزپذیر، کل تعداد دنباله‌ها برابر با  $4! = 24$  می‌باشد و تعداد دنباله‌هایی که با عدد شروع می‌شود برابر است با  $12 = (2)(2+2-1)!$   $g(g+N-1) = (2)(2+2-1)!$  اگر گویها تمیزناپذیر باشند بر  $2!$  تقسیم می‌کنیم و تنها شش آرایش به دست می‌آوریم و اگر آرایش جعبه‌ها مهم نباشد بر یک  $2!$  دیگر تقسیم می‌کنیم و فقط سه آرایش مختلف برای محاسبه حالت ماکروسکوپی به دست می‌آوریم. این سه آرایش عبارت از یک گوی در هر جعبه و هر دو گوی در هر جعبه می‌باشد.

حالت ۳ به طور آشکار شامل محدودیتی که  $g_i \leq N_i$  می‌باشد، در غیر این صورت باید در هر جعبه کوچک بیش از یک گوی باشد. فرض کنید با قرار دادن یکی یکی  $N_i$  گوی در  $g_i$  جعبه کوچک شروع کنیم. برای اولین گوی  $g_i$  جعبه آزاد موجود می‌باشد،  $1 - g_i$  برای دومین گوی،  $2 - g_i$  برای سومین گوی و غیره موجود می‌باشد به طوری که تعداد آرایشهای ممکن در جعبه بزرگ  $i$  ام اگر گویها تمیزپذیر بودند، برابر می‌شد با

$$g_i(g_i - 1)(g_i - 2) \dots [g_i - (N_i - 1)] = \frac{g_i!}{(g_i - N_i)!}$$

چون گویها تمیزناپذیرند، باید بر  $N_i!$  تقسیم کنیم تا تعداد آرایشهای لازم را به دست آوریم بدین ترتیب:

$$\Omega_i = \frac{g_i!}{N_i!(g_i - N_i)!} \quad (۱۲-۱۷)$$

بنابراین، تعداد آرایشهای ممکن برای تمام جعبه‌های  $i$  ام برابر است با

$$\Omega = \prod_i \Omega_i = \prod_i \frac{g_i!}{N_i!(g_i - N_i)!} \quad (۱۲-۱۸)$$

مثالهای زیر کاربرد این فرمولها را برای مقاصد محاسبه نشان می‌دهد. قسمتهای بعدی نشان خواهند داد که چگونه آنها به مدل فیزیکی حالت میکروسکوپی مربوط می‌شوند.

### مثال ۱۲-۱

تعداد آرایش شش گوی تمیزپذیر را در چهار جعبه به‌طوری که  $N_2 = ۱$ ،  $N_1 = ۱$  و  $N_3 = ۳$  و  $N_4 = ۱$  باشد، محاسبه کنید.

**حل:** معادله (۱۲-۱۰) برای این حالت به کار می‌رود به‌طوری که

$$\Omega = \frac{N!}{\prod_i N_i!} = \frac{6!}{1!1!3!1!} = 120$$

### مثال ۱۲-۲

تعداد آرایش شش گوی تمیزناپذیر را در چهار جعبه تمیزپذیر محاسبه کنید.

**حل:** برای این مسأله معادله (۱۲-۱۳) را به کار می‌بریم و تمیزپذیری گویها را با تقسیم کردن بر  $N_i!$  حذف می‌کنیم به‌طوری که

$$\Omega = \frac{g(g + N - 1)!}{N!} = \frac{4(4 + 6 - 1)!}{6!} = 2016$$

اگر جعبه‌ها تمیزناپذیر بودند، یعنی آرایش آنها مهم نبود از معادله (۱۴ - ۱۲) باید استفاده شود و داشتیم

$$\Omega = \frac{(g + N - 1)!}{(g - 1)! N!} = \frac{(4 + 6 - 1)!}{(4 - 1)! 6!} = 84$$

### مثال ۱۲-۳

تعداد آرایش شش‌گویی تمیزناپذیر را در هشت جعبه تمیزپذیر با توجه به این‌که بیش از یک گوی در هر جعبه نباشد محاسبه کنید.

**حل:** معادله (۱۷ - ۱۲) به کار می‌رود. به طوری‌که

$$\Omega = \frac{g!}{N!(g - N)!} = \frac{8!}{6!(8 - 6)!} = 28$$

### ۱۲-۷ مدل‌های فیزیکی

اجازه دهید که حالا چندین مدل فیزیکی ممکن را برای رفتار میکروسکوپی ماده به صورت فرمول درآوریم. فعلاً ماده‌ای را که تنها متشکل از ذرات ریز<sup>۱</sup> می‌باشد (بدون تابش الکترومغناطیسی) در نظر خواهیم گرفت و توجه خود را به سیستم‌های منزوی معطوف خواهیم کرد. چهار فرض اصلی برای تمام مدل‌ها در نظر گرفته می‌شود.

۱ - کل انرژی سیستم ثابت باقی می‌ماند.

۲ - کل تعداد ذرات ثابت باقی می‌ماند.

۳ - تعداد ذرات زیادی مشارکت دارند به طوری‌که رفتار آنها می‌تواند از تحلیل آماری بررسی شود. به عبارت دیگر، با فرض این‌که تعداد نمونه به اندازه کافی زیاد است اصول آماری قابل اجرا خواهند بود.

۴ - تمام حالات میکروسکوپی هم احتمال می‌باشند. به عبارت دیگر، یک ذره درست به همان

اندازه احتمال دارد که در یک المان حجم از فضای فازی باشد که در هر المان حجمی دیگری می تواند باشد.

دو فرض اولیه لازم است زیرا انرژی و جرم یک سیستم منزوی ثابت باقی می ماند، حال آن که دو فرض بعدی طریق برخورد ما با مسأله را از نظر آماری تعیین می کند. سه مدل فیزیکی ممکن پیشنهاد می شود.

۱- مدل ماکسول - بولتزمن<sup>۱</sup> (MB). ذرات تمیز پذیرند و در بین ترازهای کوانتم متفاوت مشخص شده به وسیله زیرنویس  $i$  توزیع می شوند. بدین ترتیب،  $N_i$  ذره دارای انرژی  $\epsilon_i$  در تراز انرژی  $i$  ام موجود می باشد. مقادیر انرژیهای  $\epsilon_i$  پیمانه ای است و چندین راه وجود دارد که یک ذره می تواند به انرژی  $\epsilon_i$  برسد. برای مثال ذره ای که فقط دارای انرژی جنبشی انتقالی باشد می تواند دارای انرژی توزیع شده به چندین طریق مختلف در بین هر حالت انتقالی باشد. سه حالت برای ذره ای که دارای کل انرژی جنبشی برابرش واحد است می تواند به صورت زیر وجود داشته باشد.

$$\left\{ \begin{array}{c} KE_x \\ KE_y \\ KE_z \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} \right\} \text{ یا } \left\{ \begin{array}{c} 3 \\ 0 \\ 3 \end{array} \right\} \text{ یا } \left\{ \begin{array}{c} 2 \\ 1 \\ 3 \end{array} \right\}$$

بدین ترتیب جهت تعمیم، باید فرض کنیم که هر گروه از ذرات (در تراز انرژی  $i$  ام) می تواند از چندین حالت کوانتم  $g_i$  که همگی دارای انرژی یکسان  $\epsilon_i$  باشند تشکیل شود. هیچ گونه محدودیتی در تعداد ذرات اشغال کننده هر تراز انرژی  $\epsilon_i$  یا در تعداد حالات کوانتمی موجود در هر تراز انرژی وجود ندارد.

۲- مدل بوز - اینشتین<sup>۲</sup> (BE). در این جا وضعیت فیزیکی مانند مدل MB می باشد با این تفاوت که ذرات تمیزنا پذیرند. هنوز هیچ گونه محدودیتی در تعداد ذرات اشغال کننده هر تراز انرژی یا در تعداد حالات مختلف کوانتمی  $g_i$  وجود ندارد.

۳- مدل فرمی - دیراک<sup>۳</sup> (FD). این مدل مانند مدل BE می باشد با این تفاوت که بیش از

1- Maxwell-Boltzmann model

2- Bose-Einstein model

3- Fermi-Dirac model



یک ذره نمی‌تواند هر حالت کوانتومی را اشغال کند. این محدودیت ایجاب می‌کند که  $g_i \geq N_i$  باشد.

این سه مدل فیزیکی برای تحلیل تعداد زیادی از پدیده‌های میکروسکوپی به کار می‌روند. در هر سه مدل فرض بر این است که تراز انرژی کوانتومی مشخصی می‌تواند از چندین طریق متفاوت حاصل شود. مدل  $MB$  فرض می‌کند که هر ذره به طریقی متفاوت است یعنی تمیزپذیر می‌باشد، در صورتی که مدل‌های  $BE$  و  $FD$  فرض می‌کنند که ذرات تمیز ناپذیرند. مشخصات سه مدل در جدول ۱-۱۲ به اختصار آورده شده است.

جدول ۱-۱۲ خلاصه مشخصات مدل‌های آماری

مدل‌های آماری	نوع ذرات	انرژی پیمانه‌ای	تعداد ذرات به ازای هر حالت کوانتومی
ماکسول - بولترمن ( $MB$ )	تمیزپذیر	آری	هر تعدادی
بوز - اینشتین ( $BE$ )	تمیز ناپذیر	آری	هر تعدادی
فرمی - دیراک ( $FD$ )	تمیز ناپذیر	آری	یک

## ۱۲-۸ هدف تحلیل آماری

در این جا نوع سیستم (گاز - مایع یا جامد) که برای هر کدام یکی از مدل‌های فیزیکی پیش گفته به کار می‌رود مورد نظر نخواهد بود. منظور ما به دست آوردن توزیع انرژی تعادلی<sup>۱</sup> برای هر مدل فیزیکی شامل قیده‌های ثابت بودن انرژی کل و تعداد ذرات می‌باشد. به عبارت دیگر می‌خواهیم تعداد ذراتی که هر حالت انرژی (تراز) را اشغال می‌کند تعیین کنیم، که در نتیجه تعداد ذرات را در هر تراز انرژی که تحت محتملترین شرایط باشند به دست خواهد داد، یعنی ما در جستجوی  $N_i$  به عنوان تابعی از  $\epsilon_i$  می‌باشیم. توزیع بیشترین احتمال، توزیع تعادلی نامیده می‌شود.

توزیع تعادلی مورد علاقه ماست زیرا این توزیع، خواص ماکروسکوپی سیستم‌ها را که معمولاً به طور تجربی مشاهده می‌شود کنترل می‌کند. بدین ترتیب تحلیل ما متوجه یک رابطه احتمالی با

ترمودینامیک ماکروسکوپی است، همان‌طور که در ابتدای ملاحظات این فصل وعده‌اش داده شده بود. اصطلاح محتملترین را برای مشخص کردن حالتی که از طریق بیشترین تعداد تبدیلات حاصل می‌شود به کار خواهیم برد. در حقیقت ما در جستجوی مشخصات محتملترین حالت ماکروسکوپی سیستم می‌باشیم چون هدف از تحلیل، تعیین توزیع تعدادی ذرات در حالات انرژی متفاوت می‌باشد. این حالت ماکروسکوپی سپس می‌تواند با خواص ترمودینامیکی قابل مشاهده ماکروسکوپی سیستم رابطه داشته باشد. همین که توزیعهای انرژی به دست آمد، قادر خواهیم بود که اطلاعات را برای سیستمهای فیزیکی مشخص به کار ببریم، اکثر کاربردهای مباحث آماری در فصل ۱۳ ارائه خواهد شد.

کاملاً روشن است که سه مدل فیزیکی مورد بحث در بخش قبلی دقیقاً مربوط به مدل‌های آمار ریاضی مربوط به گویها و جعبه‌های مورد بحث در قسمت ۶-۱۲ می‌شود. احتمال ترمودینامیکی یا تعداد آزمایشها  $\Omega$  کمیتی است که می‌خواهیم با توجه به قیدهای انرژی ثابت و تعداد ذرات ثابت آن را به مقدار بیشینه برسانیم.

## ۹-۱۲ تقریب استرلینگ<sup>۱</sup>

در قسمتهای بعدی با فاکتوریل‌های اعداد بزرگ سر و کار خواهیم داشت. بخصوص محاسبه زیر مورد توجه خواهد بود.

$$\ln x! \quad x \gg 1 \text{ برای}$$

می‌توان نوشت

$$\ln x! = \ln 2 + \ln 3 + \dots + \ln x = \sum_{i=1}^n \ln x_i \quad (12-19)$$

این مجموعه به وسیله سطح زیر منحنی شکل ۴-۱۲ تقریب زده می‌شود. مجموعه در معادله (۱۲-۱۹)، جمع سطوح مربع مستطیل‌های شکل ۴-۱۲ می‌باشد. هنگامی که  $x$  خیلی بزرگ شود

مجموع این سطوح مربع مستطیل به سمت سطح زیر منحنی  $y = \ln x$  میل می‌کند. بدین ترتیب می‌توان نوشت:

$$\ln x! \approx \int_1^x \ln x dx \quad \text{برای } x \gg 1$$

$$\ln x! \approx x \ln x - x - 1 \quad \text{با محاسبه انتگرال بالا}$$

در ادامه، برای مقادیر بزرگ  $x$  می‌توانیم از یک صرف نظر کنیم، لذا

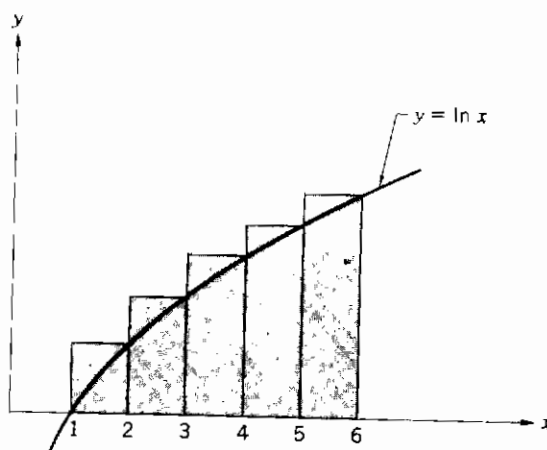
$$\ln x! \approx x \ln x - x - 1 \quad \text{برای} \quad (12-20)$$

معادله (۱۲-۲۰) تقریب استرلینگ برای فاکتوریل نامیده می‌شود.

### ۱۰-۱۲ آمار بوز - اینشتین

حالا توزیع تعادلی برای مدل فیزیکی  $BE$  را به دست خواهیم آورد. داریم.

$$\Omega = \prod_i \frac{(N_i + g_i - 1)!}{N_i! (g_i - 1)!} \quad (12-21)$$



شکل ۱۲-۴ تقریب استرلینگ

و می‌خواهیم  $\Omega$  را با توجه به قیدهای زیر به مقدار بیشینه برسانیم.

$$N = \sum_i N_i \quad \text{تعداد ذرات ثابت} \quad (۱۲-۲۲)$$

$$U = \sum_i \varepsilon_i N_i \quad \text{کل انرژی داخلی ثابت} \quad (۱۲-۲۳)$$

در این جا سیمبل  $\varepsilon_i$  انرژی اشغال کننده هر ذره در تراز انرژی  $i$  ام را مشخص می‌کند.

حالا می‌خواهیم  $\Omega$  را با توجه به تعداد ذرات  $N_i$  که هر کدام حاوی انرژی  $\varepsilon_i$  می‌باشند به مقدار بیشینه برسانیم. بدین ترتیب ما در جستجوی توزیع انرژیهای ذره که محتمل ترین است می‌باشیم و بنابراین آن را می‌توانیم توزیع انرژی تعادلی بنامیم. اگر  $\Omega$  به مقدار بیشینه رسانده شود،  $\ln \Omega$  نیز به مقدار بیشینه می‌رسد. در نتیجه راحت تر خواهد بود که با لگاریتم کار شود. بنابراین می‌نویسیم:

$$\ln \Omega = \sum_i [\ln(N_i + g_i - 1)! - \ln N_i! - \ln(g_i - 1)!]$$

اگر  $N_i$  و  $g_i$  هر دو نسبت به واحد بزرگ باشند، از مقادیر یک می‌توان صرف نظر کرد و تقریب استرلینگ را می‌توان برای به دست آوردن رابطه زیر به کار برد.

$$\ln \Omega = \sum_i [(N_i + g_i) \ln(N_i + g_i) - (N_i + g_i) - N_i \ln N_i + N_i - g_i \ln g_i + g_i] \quad (۱۲-۲۴)$$

فرآیند به مقدار بیشینه رسانیدن با برقراری رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$\frac{\partial(\ln \Omega)}{\partial N_i} = 0 \quad (۱۲-۲۵)$$

این شرط به این معنی است که تغییر در  $\ln \Omega$  با تغییر کوچکی در  $N_i$  از توزیع تعادلی برابر صفر است یا

$$\delta(\ln \Omega) = 0 = \frac{\partial(\ln \Omega)}{\partial N_i} \delta N_i$$

با به کار بردن معادله (۱۲-۲۴) این شرط به صورت زیر در می‌آید.

$$\sum_i \ln \frac{N_i + g_i}{N_i} \delta N_i = 0 \quad (۱۲-۲۶)$$

شرط انرژی ثابت برابر است با

$$\delta U = 0 = \frac{\partial U}{\partial N_i} \delta N_i$$

یا

$$\sum_i \epsilon_i \delta N_i = 0 \quad (۱۲-۲۷)$$

در خاتمه، شرط بقای ذره عبارت است از

$$\delta N = 0 = \frac{\partial N}{\partial N_i} \delta N_i$$

یا

$$\sum_i \delta N_i = 0 \quad (۱۲-۲۸)$$

بدین ترتیب، برای برقراری احتمال بیشینه سه شرط فوق باید برآورده شود. اگر مقید به قیدهای انرژی ثابت و تعداد ذرات ثابت نبودیم، تعداد ذرات در هر حالت انرژی  $N_i$  می توانستند همگی به صورت متغیرهای مستقل عمل کنند. در این حالت ما تنها نیاز به کاربرد معادله (۱۲-۲۶) داریم تا معادله زیر را به عنوان شرط به مقدار بیشینه رساندن به دست آوریم:

$$\ln \frac{N_i + g_i}{N_i} = 0$$

به محض این که کل تعداد ذرات مشخص شود، معلوم می شود که تمام ذرات مربوط به  $N_i$  مستقل نیستند. به همین ترتیب شرط بقای انرژی، قید اضافی را علاوه بر قید مستقل بودن ذرات مربوط به  $N_i$  اعمال می کند. قیدهای مشخص به وسیله انرژی کل سیستم مشخص و تعداد کل ذرات مشخص کنترل می شوند. فرض کنید که معادله (۱۲-۲۷) در یک ثابت  $-\beta$  که تابعی از انرژی کل سیستم است ضرب شود و معادله (۱۲-۲۸) در ثابت دیگر  $-\alpha$  که تابعی از کل تعداد ذرات است ضرب گردد. اگر معادلات حاصل شده را با معادله (۱۲-۲۶) جمع کنیم، به دست می آوریم:

$$\sum_i [\ln(1 + \frac{g_i}{N_i}) - \beta \varepsilon_i - \alpha] \delta N_i = 0 \quad (۱۲-۲۹)$$

در نتیجه، ثابت‌های  $\beta$  و  $\alpha$  قیده‌های انرژی و تعداد ذرات را با معادله (۱۲-۲۹) ترکیب کرده‌اند به‌طوری‌که با ذرات مربوط به  $N_i$  می‌توان به‌صورت متغیرهای مستقل رفتار کرد. بدین ترتیب شرط زیر را به‌دست می‌آوریم.

$$\ln(1 + \frac{g_i}{N_i}) - \beta \varepsilon_i - \alpha = 0 \quad \text{یا}$$

$$\frac{N_i}{g_i} = \frac{1}{A e^{\beta \varepsilon_i} - 1} \quad (۱۲-۳۰)$$

در این جا  $A$  بجای  $e^\alpha$  جایگزین شده است. ثابتهای  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب نامعین<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند و روش به مقدار بیشینه رساندن  $\Omega$  به‌روش ضریب لاگرانژ<sup>۲</sup> موسوم است. ثابتهای  $\alpha$  و  $\beta$  نقش مشابه ثابتهای انتگرال را در حل معادلات دیفرانسیل بازی می‌کنند که مقادیر آنها باید به‌وسیله شرایط سرحدی فیزیکی مربوطه تعیین شود. مقادیر این ثابتها را در قسمتهای بعدی تعیین خواهیم کرد.

## ۱۱-۱۲ آمار فرمی - دیراک

توزیع  $FD$  مشابه‌طریق مدل  $BE$  معین می‌شود. توزیع احتمال ترمودینامیکی به‌وسیله معادله (۱۲-۱۸) داده می‌شود و می‌خواهیم که  $\ln \Omega$  را در رابطه با قیده‌های انرژی کل ثابت و تعداد کل ذرات ثابت به‌حداکثر برسانیم. بعد از به‌کار بردن تقریب استرلینگ برای  $\ln \Omega$ ، داریم

$$\delta(\ln \Omega) = \frac{\partial(\ln \Omega)}{\partial N_i} \delta N_i = \sum_i \ln \frac{g_i - N_i}{N_i} \delta N_i = 0 \quad (۱۲-۳۱)$$

$$\delta U = \frac{\partial U}{\partial N_i} \delta N_i = \sum_i \varepsilon_i \delta N_i = 0 \quad (۱۲-۳۲)$$

$$\delta N = \sum_i \delta N_i = 0 \quad (۱۲-۳۳)$$

1- Undetermined multipliers

2- Lagrange multiplier method

مانند قبل، با استفاده از روش ضرایب نامعین به دست می آوریم:

$$\sum_i [\ln(\frac{g_i}{N_i} - 1) - \alpha - \beta \varepsilon_i] \delta N_i = 0 \quad (12-34)$$

نتیجه می گیریم

$$\frac{N_i}{g_i} = \frac{1}{Ae^{\beta \varepsilon_i} + 1} \quad (12-35)$$

برای مدل  $MB$  به دست می آوریم

$$\frac{N_i}{g_i} = \frac{1}{Ae^{\beta \varepsilon_i}} \quad (12-36)$$

معادلات (۱۲-۳۰)، (۱۲-۳۵) و (۱۲-۳۶) خیلی شبیه به همدند، تنها فرشتان در نوع ظاهر شدن عامل ۱ در مخرج می باشد. شرایط فیزیکی را که  $N_i < g_i$  باشد در نظر بگیرید، یعنی وقتی تعداد ذرات خیلی کوچکتر از تعداد حالات کوانتمی موجود برای هر تراز انرژی باشد. در این حالت عامل ۱ در مخرج معادلات (۱۲-۳۰) و (۱۲-۳۵) در مقایسه با جمله  $Ae^{\beta \varepsilon_i}$  خیلی کوچک است و هر دو توزیعهای  $BE$  و  $FD$  به معادلات (۱۲-۳۶) مربوط به مدل  $MB$  نزدیک می شوند. این حالت حدی مهم است زیرا ما را قادر می کند که ذرات تمیز ناپذیر را با توزیع ساده تر  $MB$  برای حالاتی که  $N_i < g_i$  تحلیل نمایم.

## ۱۲-۱۲ مدل کلاسیک ماکسول - بولتزمن

ماهیت کوانتمی مدل آماری را می توان به طریق زیر حذف کرد. مدل  $MB$  برای حالتی که  $g_i = 1$  برای تمام ترازهای انرژی می باشد، مورد بررسی قرار می گیرد و فرض می شود که انرژی دارای یک توزیع پیوسته باشد به طوری که هیچ محدودیت کوانتمی بر ترازهای انرژی قرار داده نمی شود. در این هنگام هر تراز انرژی می تواند کمی با دیگری متفاوت باشد و احتیاجی نیست که به صورت "انواع" متفاوت از حالات انرژی در نظر گرفته شود، بنابراین  $g_i = 1$  را برای هر تراز انرژی انتخاب می کنیم. در حقیقت یک تعداد نامحدود از حالات انرژی ممکن برای چنین توزیع پیوسته ای موجود است. چنین مدلی به مدل آمار کلاسیک مشهور است زیرا از احتمال انواع متفاوت حالات کوانتمی حاوی انرژی

یکسان صرف نظر می‌کند. در این حالت تعداد ذرات  $N_i$  حاوی انرژی  $\epsilon_i$  به‌سادگی برابر است با

$$N_i = \frac{1}{A e^{\beta \epsilon_i}} \quad (۱۲-۳۷)$$

مشکلی برای مدل  $MB$  وجود دارد. بعضی از انواع ذرات میکروسکوپی درست تمیزپذیر نیستند. برای مثال، نمی‌توان گفت که یک ملکول اکسیژن از ملکول دیگر یا یک الکترون از الکترون دیگر تمیز داده می‌شود. بعداً دیده خواهد شد که این حقیقت، مدل  $MB$  را برای تحلیل بعضی از موارد نامناسب می‌کند مگر در موقعی که به‌عنوان حالت حدی مدل‌های آماری  $BE$  یا  $FD$  به‌کار رود.

### ۱۲-۱۳ توزیع تعادلی

تحلیل گفته‌شده در جهت برقراری محتملترین توزیع ذرات در میان حالات انرژی متفاوت، مشمول قیدهای انرژی ثابت و تعداد ذرات ثابت به‌کار رفته است. هنوز باید مقدار ثابت‌های  $A$  و  $\beta$  را تعیین نماییم، اما نوع تابع توزیع به‌دست آمده است. در حقیقت این توزیع معرف محتملترین حالت ما میکروسکوپی می‌باشد و توزیع انرژی را که باید در اکثر مواقع مشاهده شود تعریف می‌کند. جالب است بدانیم که آیا توزیع، درست کمی محتملتر از چند توزیع دیگر می‌باشد یا به‌طور خیلی زیاد محتملترین رویداد می‌باشد. این محتملترین توزیع را حالت ما میکروسکوپی تعادلی سیستم می‌نامیم چون این همان حالتی است که ما انتظار داریم پس از این که سیستم چند لحظه به‌حال خود گذاشته شود، مشاهده کنیم. اگر محتملترین رویداد باشد پس باید مستقیماً مربوط به خواص ترمودینامیکی حالت ما میکروسکوپی باشد که معمولاً مشاهده می‌شوند. برای سهولت کار توزیع  $MB$  را در نظر می‌گیریم. داریم

$$\Omega = N! \prod_i \frac{g_i^N}{N_i!}$$

با گرفتن لگاریتم و استفاده کردن از تقریب استرلینگ، داریم.

$$\ln \Omega = N \ln N + \sum_i N_i \ln g_i - \sum_i N_i \ln N_i \quad (۱۲-۳۸)$$

محتملترین توزیع، از جایگزینی معادله (۱۲-۳۶) در معادله (۱۲-۳۸) حاصل می‌شود، بدین ترتیب



$$\ln \Omega_{max} = N \ln N + \sum_i N_i (\ln A + \beta \varepsilon_i) \quad (12-39)$$

می‌خواهیم تأثیر تغییر در  $N_i$  را بر روی  $\Omega$  بررسی کنیم. مخصوصاً می‌خواهیم  $\delta \Omega$  را با  $\Omega_{max}$  مقایسه نماییم، در جایی که  $\delta \Omega$  برابر انحراف<sup>۱</sup> از  $\Omega_{max}$  است که از انحراف  $\delta N_i$  از محتملترین توزیع حاصل می‌شود. می‌توانیم بنویسیم:

$$\begin{aligned} \ln(\Omega + \delta \Omega) &= N \ln N + \sum_i (N_i + \delta N_i) \ln g_i \\ &\quad - \sum_i (N_i + \delta N_i) \ln(N_i + \delta N_i) \end{aligned} \quad (12-40)$$

با تفریق معادله (۱۲-۳۸) از معادله (۱۲-۴۰)، داریم:

$$\begin{aligned} \ln \frac{\Omega + \delta \Omega}{\Omega} &= \sum_i \ln g_i \delta N_i - \sum_i N_i \ln \left(1 + \frac{\delta N_i}{N_i}\right) \\ &\quad - \sum_i \ln(N_i + \delta N_i) \delta N_i \end{aligned} \quad (12-41)$$

یکی از شرایط برای  $\Omega_{max}$  این است که  $\delta(\ln \Omega) = 0$  باشد یا

$$\sum_i (\ln g_i - \ln N_i) \delta N_i = 0 \quad (12-42)$$

با تفریق معادله (۱۲-۴۲) از معادله (۱۲-۴۱)

$$\ln \frac{\Omega_{max} + \delta \Omega}{\Omega_{max}} = - \sum_i N_i \ln \left(1 + \frac{\delta N_i}{N_i}\right) - \sum_i \ln \left(1 + \frac{\delta N_i}{N_i}\right) \delta N_i \quad (12-43)$$

با چندین عملیات جبری معادله (۱۲-۴۳) را می‌توان به صورت رابطه زیر، اگر  $\delta N_i$  در مقایسه با  $N_i$  کوچک باشد، خلاصه کرد.

$$\ln \frac{\Omega_{max} + \delta \Omega}{\Omega_{max}} \approx - \frac{1}{2} \sum_i \frac{(\delta N_i)^2}{N_i} \quad (12-44)$$

این رابطه ابزاری برای مقایسه احتمال توزیعی با انحراف به مقدار  $\delta \Omega$  از توزیع تعادلی در نتیجه تغییر  $\delta N_i$  در اشغال تراز انرژی نام می‌باشد. برای مثال اجازه دهید که ۲ سلول انرژی هر دو دارای

انرژی یکسان و هر دو شامل  $10^{20}$  ذره را در نظر بگیریم. چون انرژی هر سلول یکسان است، محتملترین توزیع ذرات برابر است با تعداد مساوی از ذرات در هر سلول، که برابر  $5 \times 10^{19}$  در نظر می‌گیریم. اجازه دهید که در احتمال انحراف از این محتملترین توزیع تحقیق نماییم. فرض کنید که فقط  $0/01$  درصد از ذرات سلول‌هایشان را عوض می‌کنند، داریم

$$N_1 = N_2 = 5 \times 10^{19}$$

$$\delta N_1 = -\delta N_2 = (0.0001)(5 \times 10^{19}) = 5 \times 10^{15}$$

تشکیل مجموعه در معادله (۳۴-۱۲) می‌دهد:

$$\ln \frac{\Omega_{max} + \delta\Omega}{\Omega_{max}} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \frac{(\delta N_i)^2}{N_i}$$

$$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{(5 \times 10^{15})^2}{5 \times 10^{19}} + \frac{(-5 \times 10^{15})^2}{5 \times 10^{19}} \right]$$

$$= -5 \times 10^{11}$$

یا

$$\frac{\Omega_{max} + \delta\Omega}{\Omega_{max}} \approx e^{-5 \times 10^{11}}$$

بدین ترتیب، در می‌یابیم که احتمال حتی چنین انحراف مختصری از محتملترین حالت در حقیقت خیلی کم است.

می‌توانستیم به این بحث همچنان ادامه بدهیم، اما تا بحال خواننده باید دریافته باشد که توزیعهای تعادلی داده شده در معادلات (۳۵-۱۲) و (۳۶-۱۲) نه دقیقاً بلکه به احتمال زیاد محتملترین مواردند. بعلاوه، توزیعهای تعادلی آنقدر غالبند که نباید مشاهده آن دسته از خواص ماکروسکپی را که از مقادیر محاسبه شده با این توزیعها متفاوت است، جز در موارد خیلی خاص، انتظار داشته باشیم. همچنان که قبلاً اشاره شد، کوششهای تحلیلی ما مستقیماً متوجه محاسبه خواص ترمودینامیکی ماکروسکپی از ملاحظات میکروسکپی می‌باشد. اگرچه باید اشاره کنیم که نواحی مهمی از تئوری نوسان و پدیده‌های انتقال وجود دارد که انحراف از محتملترین توزیع تعادلی خیلی قابل ملاحظه است، اما این موضوع از حیطه بحث ما خارج است.

## ۱۲-۱۴ تعبیر میکروسکوپی حرارت و کار

دیدیم که قانون اول ترمودینامیک را برای یک سیستم بسته می توان به صورت زیر نوشت.

$$dU = d'Q + d'W \quad (12-45)$$

از معادله (۱۲-۲۳) تغییر انرژی داخلی را می توان به صورت زیر نوشت.

$$dU = \sum_i \varepsilon_i dN_i + \sum_i N_i d\varepsilon_i \quad (12-46)$$

حالا یک سیستم ساده از ذرات بدون تأثیر متقابل را که تنها تأثیر متقابل کار به صورت کار تراکمی (تغییر حجم) اتفاق می افتد در نظر بگیرید. از راه مکانیک کوانتمی می توان نشان داد که حالات انرژی انتقالی مجاز چنین سیستمی متناسب با  $V^{-2/3}$  می باشد که  $V$  حجم سیستم است. هنگامی که  $V$  ثابت باشد، حالات انرژی مجاز ثابت است. بنابراین می توان  $\varepsilon_i = f(V)$  گرفت و معادله (۱۲-۴۶) را به صورت زیر نوشت.

$$dU = \sum_i \varepsilon_i dN_i + \sum_i N_i \left( \frac{d\varepsilon_i}{dV} \right) dV \quad (12-47)$$

اگر این معادله را در یک فرآیند شبه ایستا برای یک ماده ساده تراکم پذیر به کار ببریم می بینیم که برای تغییر حجم صفر، کار برابر با صفر می باشد و انرژی داخلی به علت تأثیرهای متقابل حرارت باید ازدیاد یابد، بنابراین مشخص می کنیم:

$$d'Q = \sum_i \varepsilon_i dN_i$$

اما با افزایش کار در مرز برای انتقال حرارت صفر، تعبیر می کنیم.

$$d'W = \sum_i N_i \left( \frac{d\varepsilon_i}{dV} \right) dV = \sum_i N_i d\varepsilon_i \quad (12-49)$$

از طریق این بحث می توانیم فرآیند شبه ایستا را به صورت زیر ارزیابی میکروسکوپی کنیم. افزودن حرارت در حجم ثابت با یک تغییر در تجمع<sup>۱</sup> حالات انرژی ( $N_i$ ) معلوم می شود اما ترازهای انرژی

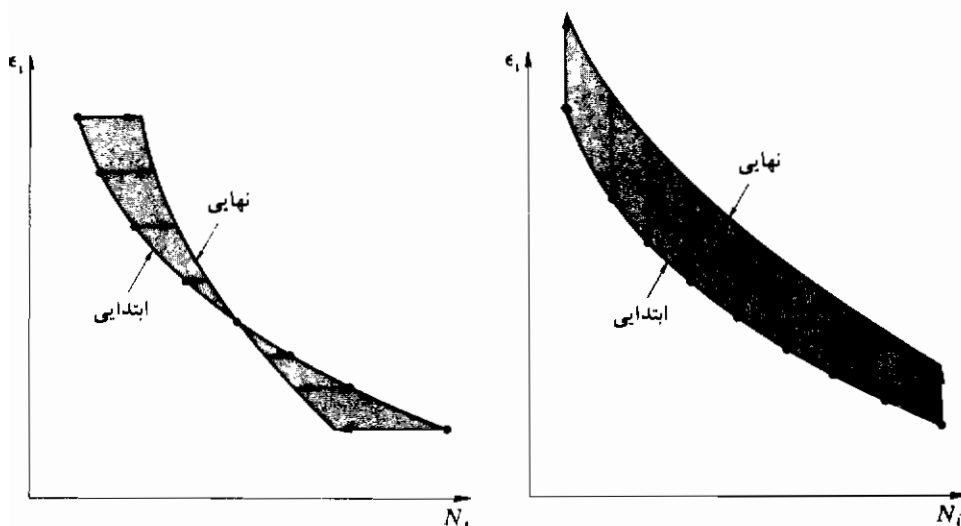
مجاز تغییر نمی‌کنند. افزایش حرارت منجر به ازدیاد تجمع حالات انرژی بالاتر و کاهش مشابه در تجمع حالات انرژی پایین‌تر می‌شود. برعکس یک فرآیند تراکم آدیاباتیکی به انتقال روبه‌بالا در ترازهای انرژی  $\epsilon_i$  هنگامی که تجمع در هر تراز ثابت باقی بماند منجر می‌شود. این دو نوع فرآیند در شکل ۱۲-۵ نشان داده شده است.

### ۱۲-۱۵ آنتروپی

چون محتمل‌ترین توزیع خیلی غالب است، ما  $\Omega_{max}$  را به عنوان یک خاصیت ماکروسکوپی سیستم مشخص خواهیم کرد. برای راحتی  $\ln \Omega_{max}$  را برای کار کردن انتخاب می‌کنیم و می‌نویسیم:

$$S = k \ln \Omega_{max} \quad (۱۲-۵۰)$$

$k$  عدد ثابتی است که بعداً تعیین می‌شود و خاصیت  $S$  یک خاصیت تعادلی ماکروسکوپی موسوم به آنتروپی می‌باشد.



شکل ۱۲-۵ (سمت چپ) افزایش حرارت در حجم ثابت منجر به انتقال در مجتمه‌ها می‌شود (سمت راست) تراکم آدیاباتیکی منجر به انتقال در ترازهای انرژی می‌شود.

برای تعداد زیادی از ذرات، حالات معرفی شده به وسیله مقادیر  $\Omega$  غیر از  $\Omega_{max}$  خیلی کمتر شبیه به  $\Omega_{max}$  می‌باشند، اما هنوز معرف حالات فیزیکی ممکن سیستم می‌باشند. از این رو می‌توانستیم آنروپی را برای این حالات ممکن به صورت زیر تعریف کنیم.

$$S = k \ln \Omega \quad (۱۲-۵۱)$$

مقایسه معادلات (۱۲-۵۰) و (۱۲-۵۱) مشخص می‌کند که همچنان که یک سیستم منزوی (انرژی ثابت و تعداد ذرات ثابت) به محتملترین حالت خود نزدیک می‌گردد، آنروپی به بیشترین مقدارش نزدیک می‌شود، بعلاوه، خیلی غیر محتمل است که آنروپی به خاطر ماهیت خیلی زیاد  $\Omega_{max}$  از بیشترین مقدارش کاهش پیدا کند. باید توجه کرد که چنین کاهشی غیر ممکن نیست، تنها خیلی غیر محتمل است. بدین ترتیب، برای یک سیستم منزوی، رفتار خاصیت آنروپی کاملاً متفاوت از خاصیت انرژی داخلی می‌باشد. ما این قضیه را که تغییر انرژی داخلی در چنین سیستمی محال است می‌پذیریم. البته، این قضیه از قانون اول ترمودینامیک حاصل می‌شود.

راه دیگر بیان ملاحظات قبلی این است که بگوییم در هر تغییر شامل یک سیستم منزوی، آنروپی به احتمال خیلی زیادی از دیاد پیدا خواهد کرد. به صورت تحلیلی چنین می‌نویسیم:

$$\Delta S_{\text{منزوی}} \geq 0 \quad \text{بیشترین احتمال}$$

## ۱۲-۱۶ قانون دوم ترمودینامیک

در بخش ۵-۸ تعریف ماکروسکوپی برای آنروپی به دست آوردیم که براساس عدم امکان ساخت یک ماشین حرکت دائم از نوع دوم قرار داشت. در واقع، تعریف آنروپی برای ترمودینامیک میکروسکوپی پذیرفته شده در بالا طوری انتخاب شده است که با مفاهیم ماکروسکوپی مطابقت داشته باشد. همان طور که دیده‌ایم یک سیستم منزوی همیشه متمایل به سمت شرط آنروپی بیشینه می‌باشد که در آن نقطه تعادل برقرار خواهد شد. معادله (۱۲-۵۲) همان اطلاعات مربوط به اساس "محتملترین" را ارائه می‌کند. اما چون برای عملی‌ترین مسائل، توزیع تعادلی بیش از اندازه مختل است، می‌توان انتظار داشت که قانون دوم "مبرهن" باشد. در حالی که بعضی از نکته‌گیران ممکن است بحث کنند که امکان

اتفاقات خاصی وجود دارد که در آن قانون دوم تنها "محتملترین" است، چنین حوادثی به ندرت در تجربیات مهندسی مشاهده می‌شوند و قانون دوم می‌تواند به صورت مطلق در نظر گرفته شود.

## ۱۲-۱۷ تابع افراز (تقسیم)<sup>۱</sup>

بر طبق معادله (۱۲-۳۶) ممکن است رابطه زیر را برای مدل  $MB$  بنویسیم.

$$N_i = \frac{1}{A} g_i e^{-\beta \epsilon_i} \quad (12-53)$$

کمیت  $g_i$  برابر تعداد حالات کوانتم حاوی انرژی  $\epsilon_i$  می‌باشد. اگر یک مدل کلاسیک فرض کنیم به طوری که توزیع پیوسته انرژی موجود باشد، تعداد ذرات دارای انرژی  $\epsilon_i$  بوسیله رابطه (۱۲-۳۷) داده می‌شود.

$$N_i = \frac{1}{A} e^{-\beta \epsilon_i} \quad g_i = 1 \quad \text{برای مدل کلاسیک}$$

حالا

$$N = \sum_i N_i = \frac{1}{A} \sum_i e^{-\beta \epsilon_i} \quad (12-54)$$

مجموعه طرف راست این معادله به عنوان تابع افراز یا مجموعه حالت<sup>۲</sup>  $Z$  نامیده می‌شود.

$$Z = \sum_i e^{-\beta \epsilon_i} \quad (12-55)$$

می‌توانیم معادله را به صورت زیر بنویسیم.

$$\frac{N_i}{N} = \frac{1}{Z} e^{-\beta \epsilon_i} \quad (12-56)$$

تابع افراز همان گونه که از اسمش پیداست دقیقاً تابعی است مربوط به راه مخصوصی که ذرات میان

1- Partition function

2- Sum of state

حالات انرژی متفاوت دسترس پذیر "افراز" می شوند.

بحث پیش گفته محدود به این می شود که ما یک مدل ساده در نظر بگیریم، یعنی برای حالتی که  $g_i = 1$  می باشد. اجازه دهید که یک تعریف کلی از تابع افراز را بر طبق معادله (۱۲-۵۵) بپذیریم، اما لازم است که مجموعه برای تمام حالات انرژی دسترس پذیر به ذرات گرفته شود. سپس با به کار بردن زیرنویس  $j$  برای مشخص کردن حالت انرژی و ابقای زیرنویس  $i$  جهت نشان دادن ترازهای انرژی، به دست می آوریم.

$$Z = \sum_i e^{-\beta \epsilon_i} = \sum_i g_i e^{-\beta \epsilon_i} \quad (12-57)$$

این رابطه نتیجه می شود زیرا  $g_i$  حالت انرژی دارای مقدار  $\epsilon_i$  موجود است. تا کنون  $g_i$  را تبهگنی یا چندگانگی تراز انرژی مخصوص ناسیده ایم. بعضی از نویسندگان دیگر ممکن است ترجیح دهند که  $g_i$  را وزن آماری<sup>۱</sup> بنامند. بدین ترتیب می توان گفت ترازهای انرژی مشخصی ممکن است خیلی از بقیه "وزین تر" باشند.

با پذیرش تعریف تابع افراز داده شده به وسیله معادله (۱۲-۵۷)، سپس می توانیم توزیع  $MB$  را بدون محدودیت  $g_i = 1$  مورد بررسی قرار دهیم. بدین ترتیب

$$N = \sum_i N_i = \sum_i \frac{g_i e^{-\beta \epsilon_i}}{A} = \frac{Z}{A}$$

یا

$$\frac{N_i}{N} = \frac{1}{Z} g_i e^{-\beta \epsilon_i} \quad (12-58)$$

## مثال ۱۲-۴

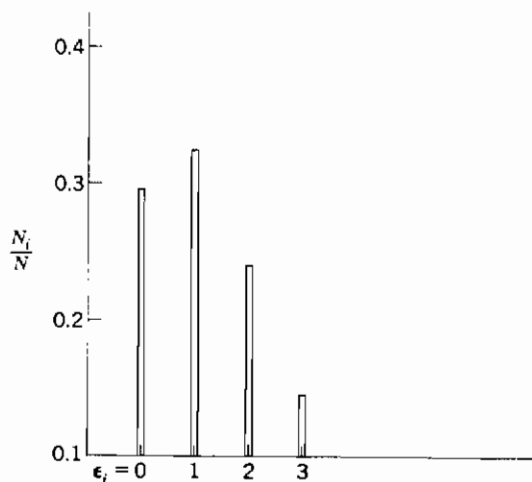
برای چهار تراز انرژی نشان داده شده در شکل ۱-۱۲، مقدار تابع افراز را محاسبه کنید با فرض اینکه ذرات از مدل آماری  $MB$  تبعیت کنند و  $\beta = 1$  به ازای هر واحد انرژی باشد. بعداً تجمعهای جزئی هر چهار تراز انرژی را محاسبه کنید.

**حل:** برای محاسبه تابع افراز از معادله (۱۲-۵۷) و اطلاعات شکل ۱۲-۱ استفاده می‌کنیم.

$$\begin{aligned} Z &= \sum_i g_i e^{-\beta \epsilon_i} = g_0 e^{-\beta \epsilon_0} + g_1 e^{-\beta \epsilon_1} + g_2 e^{-\beta \epsilon_2} + g_3 e^{-\beta \epsilon_3} = \\ &= (1) e^0 + (3) e^{-1} + (6) e^{-2} + (10) e^{-3} \\ &= 1.0 + 1.104 + 0.813 + 0.498 \\ Z &= 3.415 \end{aligned}$$

تجمعه‌های جزئی چهار تراز انرژی از معادله (۱۲-۵۸) محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned} \frac{N_0}{N} &= \frac{1}{Z} g_0 e^{-\beta \epsilon_0} \\ \frac{N_0}{N} &= \frac{1.0}{3.415} = 0.293 \\ \frac{N_1}{N} &= \frac{1.104}{3.415} = 0.323 \\ \frac{N_2}{N} &= \frac{0.813}{3.415} = 0.238 \end{aligned}$$



شکل مثال ۱۲-۲



$$\frac{N_3}{N} = \frac{0.498}{3.415} = 0.146$$

برای این مثال به نظر می آید که تراز انرژی دوم (واحد انرژی  $\epsilon_i = 1$ ) از همه بیشتر مجتمع باشد. چنین تجمعهایی در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است.

### ۱۲-۱۸ ثابت های $A$ و $\beta$

در بالا نشان داده ایم که چگونه ثابت  $A$  از توزیع  $MB$  [معادله (۵۸-۱۲)] محاسبه می شود. ارزیابی مقدار  $A$  برای توزیع های  $BE$  و  $FD$  خیلی ساده نیست و بستگی دارد به سیستم فیزیکی (گاز - مایع یا جامد) که این مدل های آماری به کار می روند. محاسبه مان را برای این حالات تا فصل سیزدهم که توزیع های آماری را در چند حالت خاص به کار می بریم، به تعویق خواهیم انداخت. برای محاسبه مقدار ثابت  $\beta$ ، احتیاج است که وارد یک بحث کاملتر از قانون دوم ترمودینامیک و روابط کلی خواص ترمودینامیک بشویم، اگرچه می توانیم حداقل نتایج را در این مرحله بیان کنیم. نشان داده خواهد شد که

$$\beta = \frac{1}{kT} \quad (۵۹-۱۲)$$

که  $k$  ثابت گاز به ازای هر ملکول یا ثابت بولتزمن می باشد.

$$k = 1.3803 \times 10^{-23} \text{ J/molecule.K} \quad (۶۰-۱۲)$$

و  $T$  دمای مطلق می باشد. همچنین نشان داده خواهد شد که ثابت بولتزمن مقداری است که در معادله (۵۰-۱۲) برای تعریف کردن آنتروپی به کار رفته است. مقدار  $\beta$  به وسیله معادله (۵۹-۱۲) برای هر سه توزیع آماری که قبلاً درباره آن بحث شد داده می شود. ثابت بولتزمن بر حسب ثابت عمومی گازها به قرار زیر داده می شود.

$$k = \frac{\Re}{N_0} \quad (۶۱-۱۲)$$

مانند قبل  $N_0$  عدد آووگادرو می باشد.

## خود آزمایی (سؤالات مروری)

- ۱ - فضای فازی چیست؟
- ۲ - طول موج دو بروگلی چیست؟
- ۳ - چرا ملاحظات کوانتمی برای تحلیل سیستمهای ماکروسکپی بی اهمیت می باشد؟
- ۴ - منظور از اصطلاح تبهگنی چیست؟
- ۵ - تمایز بین حالت کوانتمی و تراز انرژی را مشخص کنید.
- ۶ - تمایز بین اصطلاحات حالت میکروسکپی و حالت ماکروسکپی را مشخص نمایید.
- ۷ - مفهوم احتمال ترمودینامیکی مورد استفاده برای تخمین رفتار ماکروسکپی یک سیستم چگونه می باشد؟
- ۸ - مفروضات مربوط به مدل های آماری  $MB$ ،  $BE$  و  $FD$  چه می باشند؟
- ۹ - حرارت و کار اضافه شده به یک ماده ساده تراکم پذیر را براساس پدیده های میکروسکپی تشریح کنید.
- ۱۰ - آنتروپی را تعریف کنید.
- ۱۱ - تابع افراز را تعریف کنید.
- ۱۲ - منظور از توزیع تعادلی چیست؟
- ۱۳ - چگونه آنتروپی به احتمال ترمودینامیکی مربوط می شود؟
- ۱۴ - خاصیت چیست؟
- ۱۵ - چگونه قانون دوم به تحلیل میکروسکپی ترمودینامیک مربوط می شود؟
- ۱۶ - چگونه ثابت بولتزمن به ثابت عمومی گازها مربوط می شود؟

## مسائل

- ۱۲-۱ تعداد راههای قرار دادن ۳ گوی تمیزپذیر را در ۲ جعبه به طوری که  $N_1 = 1$  و  $N_2 = 2$  باشد محاسبه کنید.
- ۱۲-۲ تعداد راههای قرار دادن ۸ گوی تمیزناپذیر را در چهار جعبه تمیزناپذیر محاسبه کنید.

۱۲-۳ تعداد راههای قرار دادن ۱۰ گوی تمیزناپذیر را در ۱۲ جعبه با تنها یک توپ در هر جعبه محاسبه کنید.

۱۲-۴ احتمال ترمودینامیکی برای قرار دادن ۵ ذره را در میان ترازها و حالات انرژی نشان داده شده در شکل ۱۲-۱ با  $N_0 = 1$ ،  $N_1 = 2$  و  $N_3 = 1$  محاسبه کنید. محاسبات را برای هر سه مدل فیزیکی انجام دهید.

۱۲-۵ مسأله ۱۲-۴ را با  $N_0 = 1$ ،  $N_1 = 1$ ،  $N_2 = 2$  و  $N_3 = 1$  تکرار نمایید.

۱۲-۶ تبهگنی را برای یک تراز انرژی انتقالی با چهار واحد انرژی هنگامی که حداقل نمو کوانتمی برابر دو واحد انرژی می باشد تعیین کنید. تعیین تبهگنی را برای یک تراز انرژی شش واحدی تکرار نمایید.

۱۲-۷ تبهگنی برای یک تراز انرژی انتقالی چهار واحدی هنگامی که حداقل نمو کوانتمی برابر یک واحد باشد را تعیین کنید.

۱۲-۸ یک سیستم ذرات را که ترازهای انرژی آن بر طبق رابطه زیر پیمانه ای می باشند در نظر بگیرید.

$$\varepsilon_i = (i + 1) \text{eu} \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

$$g_i = 2i + 1 \quad \text{و تبهگنی هر تراز برابر است با}$$

با فرض این که ذرات از مدل آماری MB تبعیت کنند و  $\beta = 1 \text{ (eu)}^{-1}$  باشد، تابع افراز را برای یک گروه از ذرات اشغال کننده (الف) چهار تراز انرژی اولیه (ب) پنج تراز انرژی اولیه را محاسبه کنید. سپس نسبت تجمع ترازهای انرژی را محاسبه کنید.

۱۲-۹ یک سیستم ذرات را برای ترازهای انرژی که بر طبق رابطه زیر برای  $\beta = 1 \text{ (eu)}^{-1}$  پیمانه ای می باشد، در نظر بگیرید.

$$\varepsilon_i = \left(i + \frac{1}{2}\right) \text{eu} \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

و ترازهای انرژی تبهگن نیستند. تجمعی جزئی ۱۰ تراز انرژی اولیه را با فرض این که ذرات از مدل آماری MB تبعیت کنند محاسبه کرده و رسم نمایید.

۱۲-۱۰ چهار ذره تمیزناپذیر باید در دو تراز انرژی که هر کدام دارای تبهگنی برابر سه می باشند قرار داده شوند. احتمال ترمودینامیکی برای تمام آرایشهای ممکن را محاسبه کنید.

محتملترین آرایش چیست؟

۱۲-۱۱ احتمال ترمودینامیکی برای قرار دادن شش گوی تمیزناپذیر را در سه جعبه برای حالات زیر محاسبه کنید.

$$(الف) \quad N_1 = ۱ \text{ و } N_2 = ۴, N_3 = ۱$$

$$(ب) \quad N_1 = N_2 = N_3 = ۲$$

$$(ج) \quad N_1 = ۱ \text{ و } N_2 = ۳, N_3 = ۲$$

۱۲-۱۲ حداکثر احتمال ترمودینامیکی را برای ۱۰۰ ذره تمیزپذیر توزیع شده در بین چهار تراز انرژی نشان داده شده در شکل ۱۲-۱ محاسبه کنید. تعداد ذرات را در هر تراز برای این توزیع تعادلی به دست آورید. کاهش نسبی را در احتمال ترمودینامیکی منتج از تغییر یک ذره از توزیع تعادلی تخمین بزنید.  $[\beta = 1 \text{ (eu)}^{-1}]$

۱۲-۱۳ دوباره حداکثر احتمال را جهت مسأله ۱۲-۱۲ با فرض این که ذرات تمیزناپذیر باشند محاسبه کنید.

۱۲-۱۴ مسأله ۱۲-۱۲ را برای چهار تراز اولیه همانطوری که در مسأله ۸-۱۲ شرح داده شده، تکرار کنید. با فرض این که ذرات تمیزناپذیر باشند حل مسأله را تکرار نمایید.

## مراجع

- 1 Kaplan, I.: "Nuclear physics," 2d ed., Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1963.
- 2 Allis, W.P., and M. A. Herlin: "Thermodynamics and Statistical Mechanics," McGraw-Hill Book Company, New York, 1952.
- 3 Callen, H. B.: "Thermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1960.
- 4 Crawford, F. H.: "Heat, Thermodynamics, and Statistical Physics," Harcourt, Brace & World, New York, 1963.
- 5 Lee, J. F., F. W. Sears, and D. L. Turcotte: "Statistical Thermodynamics," Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1963.
- 6 Lewis, G. N., and M. Randall: "Thermodynamics," 2d ed. (revised by K. S. Pitzer and L. Brewer), McGraw-Hill Book Company, New York, 1961.
- 7 Mayer, J. E., and M. G. Mayer: "Statistical Mechanics," John Wiley & Sons, Inc.,

- New York, 1940.
- 8 Reynolds, W. C.: "Thermodynamics," 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.
  - 9 Schrödinger, E.: "Statistical Thermodynamics," Cambridge University Press, Cambridge, 1952.
  - 10 Sears, F. W.: "An Introduction to Thermodynamics, The Kinetic Theory of Gases, and Statistical Mechanics," Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1950.
  - 11 Sommerfeld, A. : "Thermodynamics and Statistical Mechanics," Academic Press, Inc., New York, 1956.
  - 12 Tolman, C.: "The Principles of Statistical Mechanics," Oxford University Press, London, 1938.
  - 13 Hatsopoulos, G. N., and J. H. Keenan: "Principles of General Thermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.



## فصل ۱۳

### کاربردهای ترمودینامیک آماری

#### ۱۳-۱ مقدمه

ارائه بنیادین روش آماری فصل ۱۲ همراه با بحثهای میکروسکوپی قانون دوم ترمودینامیک ارتباطهای ممکنه بین پدیده‌های ترمودینامیکی قابل مشاهده به‌طور میکروسکوپی و رفتار ملکولی ماده را نشان داد. مفاهیم آماری این ارتباط قبلاً تذکر داده شده است. مقصود ما در تحلیل این فصل عبارت از برداشت شیوه‌های محاسباتی برای خواص ترمودینامیکی بر اساس یک مدل میکروسکوپی است. برای وارد نمودن مفهوم دما در یک تحلیل میکروسکوپی، تعریف میکروسکوپی آنتروپی مورد لزوم است. این یک حقیقت است زیرا دما (که به‌صورت میکروسکوپی اندازه‌گیری شده) یک مفهوم اشتراکی می‌باشد یعنی این که نشان دهنده اثر کل یک مجموعه ذرات میکروسکوپی بر روی یک وسیله اندازه‌گیری است. بنابراین احتمان خواهد بود که از دمای یک ملکول منفرد صحبت کنیم، باید که یک نمونه بزرگ از ذرات را به‌طور آماری در نظر بگیریم. این بدان معنی است که برای ارتباط بین تحلیل ترمودینامیک میکروسکوپی و محاسبات خواص ترمودینامیکی در حالت تعادل احتیاج به یک مفهوم میکروسکوپی از دما داریم.

با استفاده معقول از مفهوم دما، تشریح انواع سیستمهای ترمودینامیکی (گازها، جامدات، تابش حرارتی) به‌طریقه آماری و محاسبه خواص آنها امکان پذیر خواهد بود. در این جا لازم به تذکر است که روش برخورد آماری با مسأله تنها روش موجود نیست و در بسیاری از جهات نیز کاملاً محدود کننده

است. در یکی از بخشهای بعدی این فصل به بعضی از مشخصات روش مجموعه<sup>۱</sup> اشاره خواهیم کرد که شیوه‌های مؤثری برای تحلیل سیستمهای ترمودینامیکی خیلی پیچیده فراهم می‌کند.

## ۲-۱۳ ثابتهای $\beta$ و $k$

گسترش روابط عمومی خاصیت در فصل ۶ یک پایه تحلیلی برای تعیین ثابت انرژی  $\beta$  فراهم می‌سازد که در تمام توزیعهای آماری فصل ۱۲ ظاهر می‌گردد. حال رابطه بین  $\beta$  و  $k$  ( $k$  ثابت آنتروپی) از معادله زیر را تشکیل خواهیم داد.

$$S = k \ln \Omega \quad (۱۳-۱)$$

در یکی از بخشهای بعدی نشان خواهیم داد که  $k$  ثابت بولتزمن می‌باشد.  
توزیع انرژی بوز-اینشتین ( $BE$ ) را در نظر بگیرید:

$$\frac{N_i}{g_i} = \frac{1}{Ae^{\beta \epsilon_i} - 1} \quad (۱۳-۲)$$

لگاریتم احتمال ترمودینامیکی برای این توزیع توسط رابطه زیر داده شده بود.

$$\ln \Omega = \sum [(N_i + g_i) \ln (N_i + g_i) - g_i \ln g_i - N_i \ln N_i] \quad (۱۳-۳)$$

با استفاده از روش تقریب استرلینگ و با تغییر آرایش جمله‌ها و استفاده از معادله (۱۳-۱)، آنتروپی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$S = k \sum \left( g_i \ln \frac{N_i + g_i}{g_i} + N_i \ln \frac{N_i + g_i}{N_i} \right) \quad (۱۳-۴)$$

یکی از قدمهای سیانی در به دست آوردن روابط ماکسول [معادله (۶-۱۶d)] نتیجه می‌دهد:

$$\frac{1}{T} = \left( \frac{\partial S}{\partial U} \right)_V \quad (۱۳-۵)$$



معادله (۱۳-۴) بیان کننده آنتروپی برای یک حجم ثابت (سیستم متروی) است، بنابراین به آسانی مشتق گرفته و به دست می آوریم:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial U}\right)_V = k \sum g_i \frac{g_i}{N_i + g_i} \frac{1}{g_i} \left(\frac{\partial N_i}{\partial U}\right)_V + N_i \frac{N_i}{N_i + g_i} \frac{g_i}{N_i^2} \left(\frac{\partial N_i}{\partial U}\right)_V + \ln \frac{N_i + g_i}{N_i} \left(\frac{\partial N_i}{\partial U}\right)_V \quad (13-6)$$

در این مشتق گیری  $g_i$  ثابت فرض شده است زیرا با انرژی کل سیستم تغییر نمی کند. پس از حذف جمله ها در معادله (۱۳-۶) حاصل می شود:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial U}\right)_V = k \sum \ln \frac{N_i + g_i}{N_i} \left(\frac{\partial N_i}{\partial U}\right)_V \quad (13-7)$$

از توزیع تعادلی معادله (۱۳-۲)

$$\ln \frac{N_i + g_i}{N_i} = \ln A + \beta \varepsilon_i \quad (13-8)$$

بنابراین

$$\left(\frac{\partial S}{\partial U}\right)_V = k \ln A \sum \left(\frac{\partial N_i}{\partial U}\right)_V + k\beta \sum \varepsilon_i \left(\frac{\partial N_i}{\partial U}\right)_V \quad (13-9)$$

از محدودیتهای انرژی کل ثابت و تعداد ذرات ثابت ممکن است مشتق گرفته شود تا نتیجه بگیریم:

$$U = \sum \varepsilon_i N_i$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial U}\right)_V = 1 = \sum \varepsilon_i \left(\frac{\partial N_i}{\partial U}\right)_V \quad (13-10)$$

$$N = \sum N_i$$

$$\left(\frac{\partial N}{\partial U}\right)_V = 0 = \sum \left(\frac{\partial N_i}{\partial U}\right)_V \quad (13-11)$$

از جایگزین کردن معادلات (۱۳-۵)، (۱۳-۱۰) و (۱۳-۱۱) در معادله (۱۳-۹) نتیجه می گیریم:

$$\frac{1}{T} = k\beta$$

یا

$$\beta = \frac{1}{kT} \quad (۱۲-۱۳)$$

می‌توان نشان داد که این رابطه برای توزیعهای فرمی-دیراک (FD) و ماکسول - بولتزمن (MB) هم به کار می‌رود. همان‌طور که قبلاً اشاره گردید باید نشان بدهیم که  $k$  ثابت بولتزمن می‌باشد.

### ۳-۱۳ توابع خواص و افراز<sup>۱</sup>

فرض کنیم که مجموعه‌ای از ذرات میکروسکوپی در دست هستند که از آمار MB یا BE در نهایی که  $N_i \gg g_i$  است پیروی کنند. در این مورد می‌توانیم یک تابع افراز (تقسیم) توسط رابطه زیر تعریف کنیم

$$Z = \sum g_i e^{-\beta \epsilon_i} \quad (۱۳-۱۳)$$

و توزیع تعادلی به صورت زیر در می‌آید.

$$N_i = \frac{N}{Z} g_i e^{-\beta \epsilon_i} \quad (۱۳-۱۴)$$

آنترپی برای  $N_i \gg g_i$  با استفاده از معادله (۱۳-۴) ممکن است به صورت زیر نوشته شود:

$$S = k \ln \Omega_{\max} = k \sum g_i \frac{N_i}{g_i} + N_i \ln \frac{g_i}{N_i} = Nk + k \sum N_i \ln \frac{g_i}{N_i}$$

با استفاده از توزیع تعادلی، معادله (۱۳-۱۴)،

$$S = Nk + k \sum N_i \left( \ln \frac{Z}{N} + \beta \epsilon_i \right)$$

انرژی کل برابر است با  $U = \sum \epsilon_i N_i$  و  $\beta = 1/kT$ ، به طوری که

$$S = Nk + kN \ln \frac{Z}{N} + \frac{U}{T} \quad (۱۳-۱۵)$$

بدین ترتیب آنتروپی را بر حسب تابع افراز و انرژی داخلی سیستم بیان کرده‌ایم. برای یک سیستم منزوی (انرژی کل ثابت و تعداد ذرات ثابت)، تابع افراز فقط به دما بستگی دارد چون  $g_i$  و  $\varepsilon_i$  با توجه به نقطه نظرهای مکانیک کوانتومی تعریف شده‌اند. متغیر دیگر در تابع افراز  $\beta = 1/kT$  می‌باشد و شدت تغییر تابع افراز نسبت به دما عبارت است از

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_V = \sum -g_i \varepsilon_i e^{-\beta \varepsilon_i} \left(\frac{\partial \beta}{\partial T}\right)_V = \frac{1}{kT^2} \sum g_i \varepsilon_i e^{-\beta \varepsilon_i} \quad (13-16)$$

حال انرژی داخلی کل ممکن است به صورت زیر بیان شود:

$$U = \sum \varepsilon_i N_i = \frac{N}{Z} \sum g_i \varepsilon_i e^{-\beta \varepsilon_i} \quad (13-17)$$

از مقایسه معادله (۱۳-۱۶) با معادله (۱۳-۱۷) به دست می‌آوریم که

$$U = \frac{NkT^2}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_V = NkT^2 \left(\frac{\partial \ln Z}{\partial T}\right)_V \quad (13-18)$$

حال معادله (۱۳-۱۵) برای آنتروپی را می‌توان مجدداً به صورت زیر نوشت:

$$S = Nk \left[ 1 + \ln \frac{Z}{N} + T \left(\frac{\partial \ln Z}{\partial T}\right)_V \right] \quad (13-19)$$

عمل مشتق‌گیری در حجم ثابت انجام شده است زیرا یک سیستم منزوی را با تعداد ذرات ثابتی بررسی می‌کنیم.

حال این نتیجه مهم را داریم که آنتروپی و انرژی داخل سیستم برای  $N_i \gg g_i$  را می‌توان بر حسب یک خاصیت منفرد  $Z$  بیان نمود که مقدار آن را می‌توان با توجه به نقطه نظرهای میکروسکوپی محاسبه کرد. سایر خواص ترمودینامیکی نیز ممکن است بر حسب تابع افراز بیان گردد، برای مثال تابع هلمهولتز

$$A = U - TS = -NkT \left(1 + \ln \frac{Z}{N}\right) \quad (13-20)$$

بر طبق معادله (۱۳-۱۹) فشار را می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

$$p = - \left(\frac{\partial A}{\partial V}\right)_T$$

با انجام مشتق‌گیری مذکور در مورد معادله (۱۳-۲۰) نتیجه می‌گیریم:

$$P = NkT \left( \frac{\partial \ln Z}{\partial V} \right)_T \quad (13-21)$$

حال توابع انتالپی گیبس را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$H = U + pV = NkT \left[ T \left( \frac{\partial \ln Z}{\partial T} \right)_V + V \left( \frac{\partial \ln Z}{\partial V} \right)_T \right] \quad (13-22)$$

$$G = A + pV = -NkT \left[ 1 + \ln \frac{Z}{N} - V \left( \frac{\partial \ln Z}{\partial V} \right)_T \right] \quad (13-23)$$

حال تابع افراز را به کلیه خواص ترمودینامیکی ماکروسکوپی مورد نظر برای مواد ساده ارتباط داده‌ایم. ممکن است تفکر در مورد پیشرفتهایی که تابع افراز را به خواص ترمودینامیکی ماکروسکوپی ربط می‌دهند مورد توجه خواننده قرار گیرد. تابع افراز و محاسبات آن به عنوان ارتباط دهنده بین این خواص و تحلیل میکروسکوپی، بخش مهمی از کلیه تحلیل‌های ترمودینامیک آماری را تشکیل می‌دهند. برای کمک به این اندیشه چند نکته جالب را تذکر می‌دهیم:

۱- برای ارتباط دادن تحلیل میکروسکوپی با دنیای ماکروسکوپی باید دما را تعریف کنیم. این کار به وسیله معادله (۱۳-۵) انجام شده که صرفاً از بررسی‌های ماکروسکوپی به دست آمده است.

۲- لازم است که رفتار احتمال ترمودینامیکی را با رفتار کمیتی که آنتروپی نامیده می‌شود تمیز بدهیم. در غیر این صورت تعریف دما را نمی‌توان به کار برد.

۳- برای تعریف دما فقط سیستم‌های در حال تعادل را می‌توان در نظر گرفت. در غیر این صورت نسبت دادن یک معنی فیزیکی به دمای به دست آمده از رابطه  $\beta = 1/kT$  مشکل است.

## ۴-۱۳ گاز تک اتمی ایده‌آل

به عنوان اولین مثال در کاربرد تحلیل ترمودینامیک آماری، یک گاز تک‌اتمی ساده را در نظر بگیرید که ملکولهایش به فاصله زیادی از یکدیگر قرار گرفته است به طوری که میدانهای نیروی ملکولی

تأثیر مهمی بر روی فرآیندهای برخورد یا توزیع انرژی نمی‌گذارند. برای این سیستم فرض می‌کنیم که ملکولها نشان دهنده نقاط مادی هستند به طوری که انرژی آنها ممکن است به صورت انرژی جنبشی انتقالی بیان گردد. فرض می‌گردد که ملکولها تمیزناپذیر و انرژیهای جنبشی انتقالی پیمانه‌ای باشند. بنابراین مدل آماری  $BE$  را انتخاب می‌کنیم،

$$\frac{N_i}{g_i} = \frac{1}{Ae^{\beta \epsilon_i} - 1} \quad (13-24)$$

اگر گاز در دمای بالایی باشد (دمای اتاق به قدر کافی بالاست)، حالت‌های کوانتم در دسترس خیلی بیشتر از ذرات موجود برای پر کردن آنها خواهد بود<sup>۱</sup>، و توزیع تعادلی به وسیله رابطه زیر داده شده است.

$$\frac{N_i}{N} = \frac{1}{Z} g_i e^{-\beta \epsilon_i} \quad (13-25)$$

بنابراین مسئله ما عبارت از تعیین مقادیر  $g_i$  و  $\epsilon_i$  است لذا تابع افراز را می‌توان محاسبه نمود. پس از به دست آوردن تابع افراز، سایر خواص ترمودینامیکی را می‌توان تعیین نمود. انرژیهای  $\epsilon_i$  را می‌توان بوسیله رابطه زیر بیان کرد.

$$\epsilon_i = \frac{1}{2} m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \quad (13-26)$$

که  $v_x$ ،  $v_y$  و  $v_z$  مؤلفه‌های سرعت برداری ذرات هستند. حال یک المان حجم در فضای فازی را در نظر بگیرید،  $dp_x dp_y dp_z dx dy dz$ ، که  $p = mv$  منتوم ذره است. بر طبق اصل عدم قطعیت، دقت تعیین منتوم و جابه‌جایی بوسیله رابطه زیر محدود شده است.

$$\Delta_x \Delta p_x \sim h$$

این بدان معنی است که کوچکترین حجم تمیزپذیر در فضای فازی  $h^3$  می‌باشد. تعداد این حجمهای کوچک در یک المان حجم بزرگتر نمایانگر تبهگنی یا تعداد طرقي است که سطح انرژی مشخصی ممکن است بوجود آید. بنابراین در نظر می‌گیریم.

$$g_i = \frac{dx \, dy \, dz \, dp_x \, dp_y \, dp_z}{h^3} \quad (۱۳-۲۷)$$

در این تحلیل فرض می‌کنیم که المان حجم در فضای فازی به قدر کافی بزرگ است که حاوی تعداد زیادی از ذرات باشد به طوری که آمار در مورد آن به کار خواهد رفت. با استفاده از معادلات (۱۳-۲۵) و (۱۳-۲۷) عبارتی برای تابع افراز به صورت زیر به دست آمده است.

$$Z = \sum \frac{m^3}{h^3} \exp \left[ -\frac{m\beta}{2} (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \right] dx \, dy \, dz \, dv_x \, dv_y \, dv_z \quad (۱۳-۲۸)$$

$p_x = mv_x$  و غیره برای منتوماها جایگزین شده‌اند. جمع نشان داده شده در معادله (۱۳-۲۸) باید در شش بعد ادامه یابد. علامت جمع مذکور ممکن است با یک انتگرال تعویض گردد در صورتی که حالت‌های انرژی به قدر کافی نزدیک به یکدیگر بوده و فرض کنیم که این حالتها برای گازهایی در دماهای بالا هستند. بدین ترتیب

$$Z = \iiint \frac{m^3}{h^3} \exp \left[ -\frac{m\beta}{2} (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \right] dx \, dy \, dz \, dv_x \, dv_y \, dv_z$$

انتگرال سه گانه بر روی سه محور مختصات فضایی برابر با حجم سیستم  $V$  بوده، و تمام انتگرالهای نمایی شامل مؤلفه‌های سرعت برداری، یکسان هستند به طوری که عبارت تابع افراز به صورت زیر در می‌آید.

$$\begin{aligned} Z &= \frac{m^3 V}{h^3} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left( -\frac{\beta m v_x^2}{2} \right) dv_x \right]^3 \\ &= \frac{m^3 V}{h^3} \left[ 2 \int_0^{\infty} \exp \left( -\frac{\beta m v_x^2}{2} \right) dv_x \right]^3 \end{aligned} \quad (۱۳-۲۹)$$

واضح است که حد بالایی این انتگرال هیچ گونه مفهوم فیزیکی ندارد، اما ذرات بسیار معدودی دارای سرعت‌های برداری خیلی بالا هستند که در نتیجه خطای قابل ملاحظه‌ای را شامل نمی‌گردند. به عبارت دیگر تابع نمایی برای مقادیر بزرگ  $v_x$  خیلی سریع به سمت صفر میل می‌کند لذا انتگرال مذکور بازتاب مناسبی از وضعیت فیزیکی واقعی می‌باشد.

تعیین انتگرال معادله (۱۳-۲۹) نتیجه زیر را حاصل می‌کند.

$$Z = \frac{m^3 V}{h^3} \left( \frac{2\pi}{m\beta} \right)^{3/2}$$

با قرار دادن  $\beta = 1/kT$

$$Z = V \left( \frac{2\pi mkT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (۱۳-۳۰)$$

جایگزین کردن معادلات (۱۳-۳۰) و (۱۳-۲۷) در معادله (۱۳-۲۴) منجر به توزیع انرژی یا سرعت برداری می‌گردد.

$$\frac{d^6 N}{N} = \frac{m^3}{V} \left( \frac{1}{2\pi mkT} \right)^{3/2} e^{-mv^2/2kT} dx dy dz dv_x dv_y dv_z \quad (۱۳-۳۱)$$

علامت  $d^6 N$  همان‌طور که در معادله مشخص شده نشان دهنده تعداد ذرات در یک المان بسیار جزئی شش بعدی است. از علامت  $d^6 N$  برای مشخص کردن تعداد ذرات در یک المان بسیار جزئی سه بعدی استفاده خواهد شد.

در این مدل گاز تک اتمی فرض می‌شود که گاز به‌طور یکنواخت حجم سیستم را پر می‌کند و تراکم ملکولی (ملکولها بر واحد حجم) ثابت است. بنابراین می‌توان از معادله (۱۳-۳۱) بر روی حجم سیستم انتگرال گرفت تا رابطه زیر به دست آید.

$$\frac{d^3 N}{N} = \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-mv^2/2kT} dv_x dv_y dv_z \quad (۱۳-۳۲)$$

معادله (۱۳-۳۲) معمولاً توزیع سرعت برداری ماکسول-بولتزمن نامیده می‌شود چون شرط حدی مدل آماری  $(g_i > N_i) BE$  بامورد به دست آمده از مدل آماری  $MB$  مطابقت دارد.

حال انرژی داخلی گاز تک اتمی را می‌توان به وسیله معادله (۱۳-۱۸) تعیین کرد. از معادله (۱۳-۳۰) داریم

$$\ln Z = \ln \left[ V \left( \frac{2\pi mk}{h^2} \right)^{3/2} \right] + \frac{3}{2} \ln T$$

$$\left( \frac{\partial \ln Z}{\partial T} \right)_V = \frac{3}{2} \frac{1}{T}$$

و

$$U = \frac{3}{2} NkT \quad (۱۳-۳۳)$$

معادله (۱۳-۳۳) نتیجه بسیار مهمی است زیرا نشان دهنده این مطلب است که انرژی داخلی گاز تک اتمی ایده آل فقط تابع دما می باشد.

با مراجعه به معادله (۱۳-۲۱) می توانیم معادله حالت برای گاز تک اتمی ایده آل را خیلی سریع به دست آوریم:

$$p = NkT \left( \frac{\partial \ln Z}{\partial V} \right)_T$$

$$p = NkT \frac{1}{V} \quad \text{یا}$$

بنابراین

$$pV = NkT \quad (۱۳-۳۴)$$

این رابطه با رابطه گاز کامل فصل اول [معادله (۱-۳۰)] یکسان است در صورتی که رابطه زیر برقرار باشد

$$Nk = \eta \mathfrak{R} \quad (۱۳-۳۵)$$

$\eta$  تعداد مولها و  $\mathfrak{R}$  ثابت همگانی گازهاست. تعداد کل ملکولها  $N$  عبارت است از

$$N = \eta N_0$$

که  $N_0$  تعداد ملکولها به ازای یک مول یا عدد آووگادرو است. سپس از معادله (۱۳-۳۵) این نتیجه را داریم که

$$k = \frac{\mathfrak{R}}{N_0} \quad (۱۳-۳۶)$$

$k$  ثابت گاز بر ملکول یا ثابت بولتزمن نامیده می شود و دارای مقدار عددی  $۱/۳۸۰۷ \times ۱۰^{-۲۳} \text{ J/K.molecule}$  است.

جانشین کردن روابطی برای انرژی داخلی و تابع افراز در معادله (۱۳-۱۵) منجر به عبارتی برای آنتروپی گاز تک اتمی ایده آل می گردد:



$$S = Nk \left( \frac{5}{2} + \frac{3}{2} \ln 2 \pi m k - \ln h^3 + \ln V + \frac{3}{2} \ln T - \ln N \right) \quad (۱۳-۳۷)$$

گرمای ویژه برای گاز تک اتمی ایده آل فوراً به دست می آید.

$$C_v = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = \frac{3}{2} Nk = \frac{3}{2} \eta \mathcal{R}$$

یا در مبنای مولی

$$\bar{c}_v = \frac{3}{2} \mathcal{R} \quad (۱۳-۳۸)$$

لذا

$$\bar{c}_p = \bar{c}_v + \mathcal{R} = \frac{5}{2} \mathcal{R} \quad (۱۳-۳۹)$$

این گونه روابط گرمای ویژه با تجارب مربوطه برای گازهای تک اتمی در شرایط فشار و دمایی که مفروضات اولیه تحلیل را برآورده می سازند، در تطابق کامل می باشد. مفروضات اولیه عبارتند از جرم مخصوص کم به نحوی که ملکولها دور از یکدیگر قرار گرفته و میدان نیروی ملکولی تأثیر قابل توجهی بر روی توزیع انرژی ملکولی نمی گذارد.

### ۵-۱۳ گازهای دو و چند اتمی

تفاوت عمده بین گازهای تک اتمی و چند اتمی در این است که گازهای چند اتمی علاوه بر انرژیهای انتقالی، دارای حالت های انرژی چرخشی و ارتعاشی براساس حرکت مرکز جرم ملکول نیز می باشند. هنوز هم اگر ملکولها به قدر کافی از یکدیگر دور باشند، یعنی جرم مخصوص گاز به قدر کافی پایین باشد، میدانهای نیروی عکس العمل داخلی بین ملکولها تأثیر قابل ملاحظه ای بر روی توزیع انرژی کل سیستم نخواهند گذاشت. مثل گذشته فرض می کنیم  $N_i > g_i$  و شرط حدی آمار  $BE$  را برای محاسبه خواص ترمودینامیکی به کار می گیریم. حال مسأله به صورت تعیین انواع ترازهای (سطوح) انرژی و تبهگنیها برای ارزیابی تابع افراز سیستم در می آید. فرض می کنیم که کل انرژی ملکول را می توان به وسیله جمع زیر بیان نمود.

$$\varepsilon_{\text{کل}} = \varepsilon_{\text{trans}} + \varepsilon_{\text{rot}} + \varepsilon_{\text{vib}}$$

لذا در صورتی که بتوان فرض نمود هر نوع انرژی مستقل از سایر انواع آنست، تابع افراز به صورت زیر نوشته می شود

$$Z = \sum (g_{\text{trans}} e^{-\beta \varepsilon_{\text{trans}}}) (g_{\text{rot}} e^{-\beta \varepsilon_{\text{rot}}}) (g_{\text{vib}} e^{-\beta \varepsilon_{\text{vib}}})$$

سپس جمعها ممکن است به طور جداگانه گرفته شوند و

$$Z = Z_{\text{trans}} Z_{\text{rot}} Z_{\text{vib}}$$

$$Z_{\text{Trans}} = \sum g_{\text{trans}} e^{-\beta \varepsilon_{\text{trans}}} \quad \text{که}$$

$$Z_{\text{rot}} = \sum g_{\text{rot}} e^{-\beta \varepsilon_{\text{rot}}}$$

$$Z_{\text{vib}} = \sum g_{\text{vib}} e^{-\beta \varepsilon_{\text{vib}}}$$

فرض مستقل بودن انواع مختلف انرژی کاملاً صحیح نیست. یک ملکول دواتمی دمبلی شکل را نظیر شکل ۱-۱۳ در نظر بگیرید. این ملکول دارای یک انرژی انتقالی بیان شده بر حسب حرکت مرکز جرم و یک انرژی چرخشی قابل بیان بر حسب ممان اینرسی ملکول حول مرکز جرم می باشد. انرژی ارتعاشی از ارتعاش آنها در میدان نیروی عمل کننده بین مراکز آنها حاصل می شود. به هر حال وقتی که این آنها ارتعاش دارند ممکن است تغییر متقابلی در ممان اینرسی ملکول و در نتیجه تغییری در انرژی چرخشی وجود داشته باشد. معمولاً این مسأله بجز در دماهای بالا مطلب مهمی نیست و در دماهای بالا احتیاج به تحلیلی فوق العاده پیچیده تر از مطالعه ما دارد. در دماهای به قدر کافی بالا باید تغییر در ترازهای انرژی الکترون داخل آنها را نیز در نظر بگیریم.

برای یک ملکول دواتمی دمبلی شکل نظیر آنچه در شکل ۱-۱۳ نشان داده شده، تحلیل مکانیک کوانتمی نشان می دهد که ترازهای انرژی چرخشی مجاز به وسیله رابطه زیر داده شده است:

$$\varepsilon_j = j(j+1) \frac{h^2}{8\pi^2 I} \quad j = 0, 1, 2, \dots \quad (۱۳-۴۰)$$

$I$  عبارت از ممان اینرسی ملکولی حول مرکز جرم است. می توان نشان داد که تبهگنی ترازهای انرژی چرخشی به صورت زیر است

$$g_{rot} = 2j + 1 \quad (۱۳-۴۱)$$

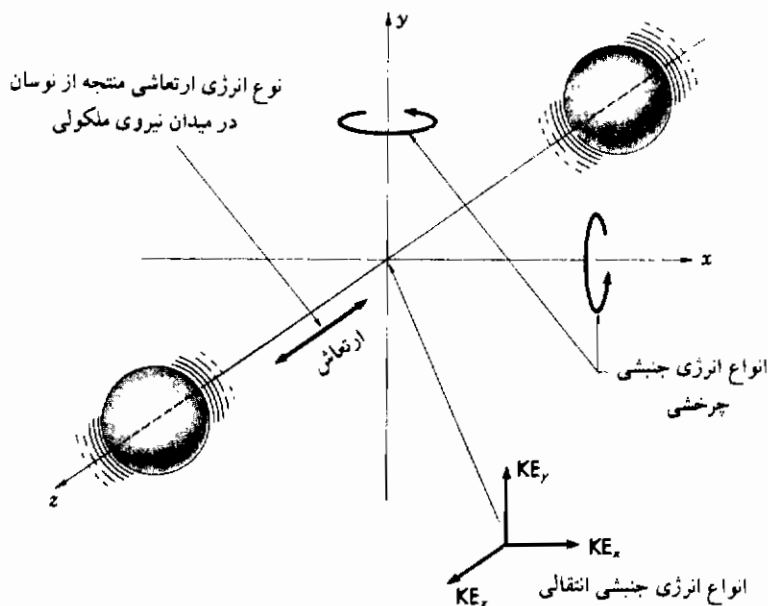
در این جا از شاخص  $j$  استفاده کرده ایم تا از اشتباه با شاخص  $i$  در تابع افراز جلوگیری شود. حال تابع افراز چرخشی به صورت زیر نوشته می شود

$$Z_{rot} = \sum_{j=0,1,2,\dots} (2j + 1) \exp \left[ -j(j + 1) \frac{h^2}{8\pi^2 I k T} \right] \quad (۱۳-۴۲)$$

حال دمای مشخصه برای چرخش،  $\theta_{rot}$  را به صورت زیر تعریف می کنیم.

$$\theta_{rot} = \frac{h^2}{8\pi^2 I k} \quad (۱۳-۴۳)$$

لذا عبارت تابع افراز تبدیل می شود به



شکل ۱۳-۱ انواع انرژی یک ملکول دو اتمی دمیلی شکل

$$Z_{rot} = \sum_{j=0,1,2,\dots} (2j+1) \exp \left[ -j(j+1) \frac{\theta_{rot}}{T} \right] \quad (۱۳-۴۴)$$

حال رفتار معادله (۱۳-۴۴) را به صورت تابعی از نسبت  $\theta_{rot}/T$  بررسی می‌کنیم. برای دمای خیلی پایین در مقایسه با  $\theta_{rot}$  یعنی  $T \ll \theta_{rot}$ ، تابع نمایی خیلی کوچک بوده و بنابراین مقدار  $Z_{rot}$  خیلی کوچک است. وقتی که  $T$  و  $\theta_{rot}$  به یک میزان باشند، تابع افراز تغییرات سریعی با  $T$  پیدا می‌کند. معادله (۱۳-۴۴) را می‌توان برای  $T/\theta_{rot} > 1$  بسط داده تا منجر به رابطه زیر گردد.

$$Z_{rot} = \frac{T}{\theta_{rot}} \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{\theta_{rot}}{T} \right) + \frac{1}{15} \left( \frac{\theta_{rot}}{T} \right)^2 + \dots \right] \quad (۱۳-۴۵)$$

همین‌طور که دما در مقایسه با  $\theta_{rot}$  خیلی بزرگ می‌گردد، از جمله‌های با درجه بالاتر می‌توان صرف نظر کرد و

$$Z_{rot} = \frac{T}{\theta_{rot}} \quad \text{برای } \frac{T}{\theta_{rot}} \gg 1 \quad (۱۳-۴۶)$$

حال ممکن است که در دماهای بالا در مقایسه با  $\theta_{rot}$ ، معادله (۱۳-۴۶) را برای تعیین مشارکت حرکت چرخشی در انرژی داخلی به کار گیریم. در نتیجه

$$U_{rot} = NkT \quad \text{برای } \frac{T}{\theta_{rot}} \gg 1 \quad (۱۳-۴۷)$$

سپس گرمای ویژه مولی برای چرخش به صورت زیر در می‌آید.

$$\bar{c}_{v,rot} = \mathfrak{R} \quad \text{برای } \frac{T}{\theta_{rot}} \gg 1 \quad (۱۳-۴۸)$$

برای محاسبه گرمای ویژه در شرایطی بجز شرط حدی داده شده به وسیله معادله (۱۳-۴۸)، لازم است که تابع افراز را از معادله (۱۳-۴۴) تعیین کنیم. نتایج چنان محاسبه‌ای در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت مشارکتهای چرخشی در گرمای ویژه برای شرایط  $T/\theta_{rot} \ll 1$  کوچک بوده و در دماهای بالا در مقایسه با دمای مشخصه به مقدار ثابت  $\mathfrak{R}$  نزدیک می‌شود.

تحلیلی مشابه بررسی قبلی برای محاسبه تابع افراز ارتعاشی انجام شده است. با توجه به مکانیک کوانتومی مشخص گردیده است که ترازهای انرژی ارتعاشی مجاز برای یک ملکول دواتمی بوسیله رابطه زیر داده شده است.

$$\varepsilon_{vib} = \left(n + \frac{1}{2}\right) h\nu \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (13-49)$$

۷ فرکانس مشخصه ارتعاش است. می‌توان نشان داد که هر تراز انرژی ارتعاشی فقط به یک طریق ممکن است واقع شود به طوری که تبهگنی برابر واحد می‌باشد (یا حالت‌های انرژی ارتعاشی تابهگن می‌باشند). معادله (۱۳-۴۹) با این فرض به دست آمده است که ملکول دو اتمی مرتعش به صورت یک نوسان ساز هارمونیک ساده یک بعدی عمل می‌نماید. بهتر است تذکر دهیم که این فرضیه در دماهای خیلی بالا معتبر نیست.

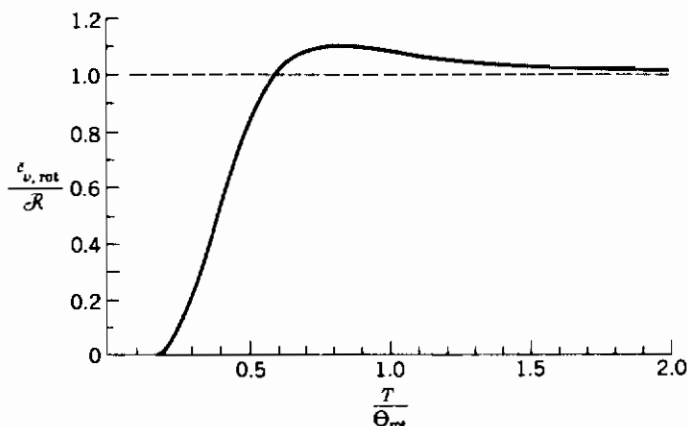
حال تابع افراز ارتعاشی با  $g_{vib} = 1$  محاسبه می‌شود:

$$Z_{vib} = \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[ - \frac{(n + 1/2) h\nu}{kT} \right] \quad (13-50)$$

خوشبختانه این جمع ممکن است به صورت معین و مشخص به طور تحلیلی بیان گردد. با تعریف دمای مشخصه برای ارتعاش،  $\theta_{vib}$  به صورت

$$\theta_{vib} = \frac{h\nu}{k} \quad (13-51)$$

رابطه نهایی برای تابع افراز عبارت است از



شکل ۱۳-۲ گرمای ویژه چرخشی برای یک گاز دو اتمی

$$Z_{vib} = \frac{e^{-\theta_{vib}/2T}}{1 - e^{-\theta_{vib}/T}} \quad (۱۳-۵۲)$$

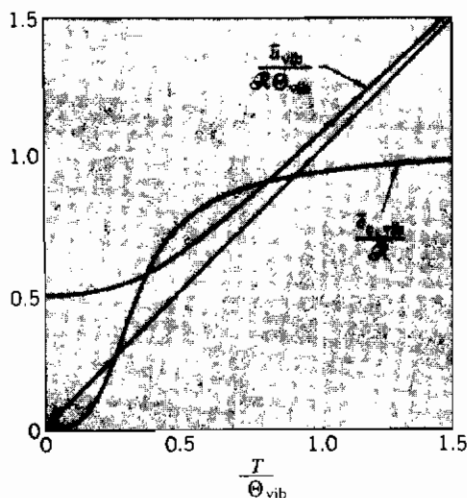
با استفاده از معادله (۱۳-۱۸) مشارکت ارتعاشی در انرژی داخلی رامی توان به صورت زیر به دست آورد.

$$U_{vib} = Nk\theta_{vib} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{e^{\theta_{vib}/T} - 1} \right) \quad (۱۳-۵۳)$$

سپس مشارکت ارتعاشی در گرمای ویژه مولی به صورت زیر در می آید.

$$\bar{c}_{v,vib} = \left( \frac{\partial \bar{u}_{vib}}{\partial T} \right)_V = \mathcal{R} \left( \frac{\theta_{vib}}{T} \right)^2 \frac{e^{\theta_{vib}/T}}{(e^{\theta_{vib}/T} - 1)^2} \quad (۱۳-۵۴)$$

شکل ۱۳-۳ نمایانگر رفتار  $\bar{u}_{vib}$  و  $\bar{c}_{v,vib}$  به صورت تابعی از نسبت  $T/\theta_{vib}$  می باشد. رفتار گرمای ویژه مشابه با منحنی بدست آمده برای گرمای ویژه چرخشی است. در دماهای خیلی پایین در مقایسه با  $\theta_{vib}$ ، مشارکت ارتعاش در گرمای ویژه قابل صرف نظر است و در دماهای بالا به مقدار ثابت  $\mathcal{R}$



شکل ۱۳-۳ گرمای ویژه ارتعاشی و انرژی داخلی ارتعاشی برای یک گاز دواتمی

نزدیک می گردد. ولی رفتار انرژی داخلی ارتعاشی از انرژی داخلی چرخشی کاملاً متفاوت می باشد. یک بررسی معادله (۱۳-۴۰) نشان می دهد که پایین ترین تراز انرژی چرخشی صفر است ولی همان طور

که از معادله (۴۹-۱۳) مشاهده می‌گردد برای ارتعاش چنین موردی نیست. بنابراین همان طور که دما کاهش داده می‌شود تعجب‌آور نیست که بینیم انرژی داخلی ارتعاشی به سمت صفر میل نمی‌کند. خلاصه‌ای از مقادیر  $\theta_{rot}$  و  $\theta_{vib}$  برای گازهای مختلف در جدول ۱-۱۳ داده شده است. می‌توان اشاره کرد که دماهای مشخصه برای چرخش به مقدار زیادی از دماهای مشخصه برای ارتعاش پایین‌تر است. این بدان معنی است که اساساً تمام حالات انرژی چرخشی برای یک ملکول دو اتمی قبل از وجود هرگونه تغییر قابل ملاحظه‌ای در انرژی ارتعاشی، تحریک شده خواهند بود. حال در موقعیت پیش‌بینی رفتار گرمای ویژه کل یک گاز دو اتمی هستیم. چون انرژیها جمع‌پذیر هستند، می‌توانیم بنویسیم

$$\bar{c}_v = \bar{c}_{v,trans} + \bar{c}_{v,rot} + \bar{c}_{v,vib} \quad (۵۵-۱۳)$$

در دماهای پایین در مقایسه با  $\theta_{rot}$ ، مشارکت اساسی در گرمای ویژه از حالات انرژی انتقالی حاصل

جدول ۱-۱۳ دماهای مشخصه برای چرخش و ارتعاش برای گازهای مختلف

ماده	$\theta_{vib}$ , K	$\theta_{rot}$ , K
H <sub>۲</sub>	۸۵ / ۵	۶۱۴۰
OH	۲۷ / ۵	۵۳۶۰
HCl	۱۵ / ۳	۴۳۰۰
CH	۲۰ / ۷	۴۱۰۰
N <sub>۲</sub>	۲ / ۸۶	۳۳۴۰
HBr	۱۲ / ۱	۳۷۰۰
HI	۹	۳۲۰۰
CO	۲ / ۷۷	۳۱۲۰
NO	۲ / ۴۷	۲۷۴۰
O <sub>۲</sub>	۲ / ۰.۹	۲۲۶۰
Cl <sub>۲</sub>	۰ / ۳۴۷	۸۱۰
Br <sub>۲</sub>	۰ / ۱۱۷	۴۷۰
Na <sub>۲</sub>	۰ / ۲۲۴	۲۳۰
K <sub>۲</sub>	۰ / ۰.۸۱	۱۴۰

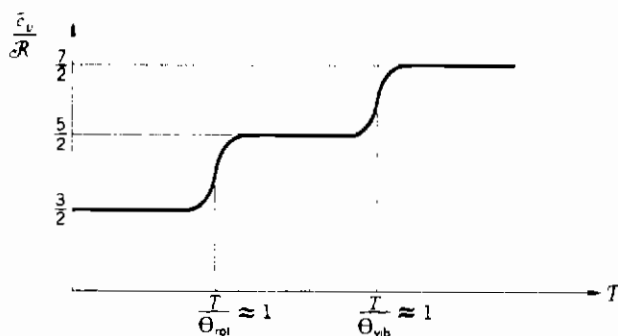
می‌شود، به‌طوری که انتظار داریم

$$\bar{c}_v = \frac{3}{2} R \quad T \ll \theta_{rot}$$

همان‌طور که دما افزایش داده می‌شود، حالات انرژی چرخشی تحریک شده و گرمای ویژه مطابق با رفتار نشان داده شده در شکل ۴-۱۳ افزایش می‌یابد. به‌محض این که دما به‌مقدار قابل ملاحظه‌ای بالاتر از  $\theta_{rot}$  افزایش داده شود ولی هنوز خیلی پایین‌تر از  $\theta_{vib}$  باشد، گرمای ویژه به‌مقدار زیر نزدیک می‌گردد.

$$\bar{c}_v = \frac{3}{2} R + R = \frac{5}{2} R \quad \theta_{rot} \ll T \ll \theta_{vib}$$

بالاخره در دماهای خیلی بالاتر، حالات انرژی ارتعاشی تحریک شده و گرمای ویژه بیشتر افزایش یافته تا وقتی که به‌مقدار زیر نزدیک می‌گردد (شکل ۴-۱۳ را نیز ببینید)



شکل ۴-۱۳ رفتار تقریبی گرمای ویژه کل یک گاز دواتمی

$$\bar{c}_v = \frac{3}{2} R + R + R = \frac{7}{2} R \quad \theta_{vib} \ll T$$

گرماهای ویژه در فشار ثابت تا وقتی که رفتار گاز ایده‌آل مشاهده می‌گردد ممکن است از رابطه زیر محاسبه شود.



$$\bar{c}_p = \bar{c}_v + \Re \quad (۱۳-۵۶)$$

این تحلیل نسبتاً پیچیده ممکن است با بررسی رفتار گرمای ویژه یک گاز آشنا نظیر  $N_2$  در دمای اتاق ( $\sim 300\text{ K}$ ) در معرض تجسم قرار گیرد. بر طبق جدول ۱-۱۳ ترازهای انرژی چرخشی کاملاً تحریک شده هستند در حالی که اساساً هیچ گونه تحریکی در حالات انرژی ارتعاشی وجود ندارد. بدین ترتیب

$$\bar{c}_v = \frac{5}{2} \Re$$

$$\bar{c}_p = \frac{7}{2} \Re$$

نسبت گرمای ویژه عبارت است از

$$\gamma = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v} = \frac{7}{5} = 1.4$$

جدول ۲-۱۳ یک مقایسه ساده بین مقادیر گرمای ویژه محاسبه شده با روابط گفته شده و مقادیر به دست آمده از طریق آزمایش را ارائه می دهد. مطابقت بین آنها بسیار خوب است.

جدول ۲-۱۳ مقایسه گرمای ویژه محاسبه شده گازها با مقدار به دست آمده

از طریق آزمایش برای  $\theta_{rot} < T < \theta_{vib}$

گاز	$\gamma$		$\bar{c}_p/\Re$		$\bar{c}_v/\Re$		$(\bar{c}_p - \bar{c}_v)/\Re$	
	محاسبه	آزمایش	محاسبه	آزمایش	محاسبه	آزمایش	محاسبه	آزمایش
A	۱/۶۶۷	۱/۶۷	۲/۵۰۰	۲/۵۲	۱/۵۰۰	۱/۵۰۹	۱/۰۰۰	۱/۰۰۸
He		۱/۶۵۹		۲/۵۲		۱/۵۱۹		۱/۰۰۱
CO	۱/۴۰۰	۱/۴۰۴	۳/۵۰۰	۳/۵۰	۲/۵۰۰	۲/۴۴۸	۱/۰۰۰	۱/۰۰۵
H <sub>۲</sub>		۱/۴۱		۳/۴۲		۲/۴۳۸		۰/۹۹۹
N <sub>۲</sub>		۱/۴۰۴		۳/۵۰		۲/۴۴۸		۱/۰۰۵
O <sub>۲</sub>		۱/۴۰۱		۳/۵۲		۲/۵۰۴		۱/۰۰۴

برای دماهای در محدوده  $T \approx \theta_{rot}$  هیدروژن از تحلیل بالا مستثنی است زیرا اسپین<sup>۱</sup> هسته‌ای (حرکت فرضی الکترونها در اتم) در گرمای ویژه آن مشارکت دارد. تحلیل مفصل آن از محدوده بحث ما خارج است، اما شایسته است تذکر دهیم که در این محدوده دما دو نوع هیدروژن موجود است: پاراهیدروژن با حالات اسپین هسته‌ای نامتقارن و ارتوهیدروژن با حالات اسپین هسته‌ای متقارن. تجربه نشان می‌دهد که برای  $T \approx \theta_{rot}$  هیدروژن واقعی مخلوطی از ۳ قسمت ارتوهیدروژن و یک قسمت پاراهیدروژن است و گرماهای ویژه چرخشی بر مبنای شکل ۲-۱۳ خیلی بالا خواهند بود. برای اطلاعات بیشتر خواننده باید به مأخذ [4] رجوع کند.

### مثال ۱-۱۳ ترازهای انرژی چرخشی

مقادیر سه تراز انرژی چرخشی اولیه برای نیتروژن را محاسبه کنید.

**حل:** ترازهای انرژی چرخشی بوسیله معادله (۴۰-۱۳) داده شده است.

$$\epsilon_j = j(j+1) \frac{h^2}{8\pi^2 I} \quad (a)$$

با استفاده از جدول ۱-۱۳ دمای مشخصه برای چرخش برابر است با

$$\theta_{rot} = 2.86 \text{ K} = \frac{h^2}{8\pi^2 I k} \quad (b)$$

به طوری که

$$\frac{h^2}{8\pi^2 I} = (2.86)(1.38 \times 10^{-23}) = 3.95 \times 10^{-23} \text{ J/molecules}$$

لذا سه تراز انرژی اولیه که صفر نمی‌باشند از رابطه (a) به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$\epsilon_1 = (1)(1+1)(3.95 \times 10^{-23}) = 7.9 \times 10^{-23} \text{ J/molecules}$$

$$\varepsilon_2 = (2)(2 + 1)(3.95 \times 10^{-23}) = 2.37 \times 10^{-23} \text{ J/molecules}$$

$$\varepsilon_3 = (3)(3 + 1)(3.95 \times 10^{-23}) = 4.74 \times 10^{-23} \text{ J/molecules}$$

## مثال ۱۳-۲

گرمای ویژه نیتروژن ( $N_2$ ) را در  $2000 \text{ K}$  محاسبه کنید.

حل: با مراجعه به جدول ۱۳-۱ مشاهده می‌کنیم که  $T \gg \theta_{rot}$  به طوری که حالات انرژی چرخشی کاملاً تحریک شده هستند. حالات ارتعاشی فقط به طور جزئی تحریک شده، لذا محاسبه می‌کنیم:

$$\frac{T}{\theta_{vib}} = \frac{2000}{3340} = 0.599$$

از شکل ۱۳-۳ داریم

$$\bar{c}_{v,vib} = 0.85 \text{ R}$$

و گرمای ویژه کل به صورت زیر در می‌آید.

$$\bar{c}_{v, \text{کل}} = \frac{3}{2} \text{ R} + \text{R} + 0.85 \text{ R} = 3.35 \text{ R}$$

ملکولهای چند اتمی از مدل ساده دو اتمی بررسی شده در قبل خیلی پیچیده ترند، اگر چه نکته اساسی برای تعیین توابع افراز و گرماهای ویژه یکسان است. بویژه به حالات انرژی چرخشی و ارتعاشی خیلی پیچیده برخورد داریم و احتیاج به یک روش ارزیابی مفصلتر برای حصول به تابع افراز است.

۱۳-۶ هم‌افراز انرژی<sup>۱</sup>

بررسی گازهای تک اتمی و دو اتمی به اطلاعات نسبتاً جالبی درباره رفتار گرمای ویژه گازهای ایده آل رسیده است. در این تحلیل چندین حالت انرژی مجاز بوده و می‌توان گفت که به ازای هر حالت

انرژی یک درجه آزادی وجود دارد. سه حالت انرژی انتقالی وجود دارد لذا سه درجه آزادی انتقالی موجود می‌باشد. در گاز دو اتمی ملکول در سه جهت می‌تواند چرخش کند، اگرچه معان اینرسی حول محوری که از مراکز دواتم می‌گذرد در مقایسه با معان اینرسی حول دو محور کارترین دیگر که از مرکز جرم عبور می‌کنند خیلی کوچک (قابل صرف نظر) است. بنابراین می‌گوییم که ملکول دارای دو حالت انرژی چرخشی مهم است. حالات انرژی ارتعاشی یک ملکول دو اتمی از نوسان در طول محوری که دو اتم را به یکدیگر متصل می‌کند حاصل می‌شود. برای مشخص کردن این انرژی ارتعاشی احتیاج به تعیین انرژی جنبشی اتمهای نوسان کننده و انرژی پتانسیل آنها منتج از موقعیتشان در میدان نیرو، می‌باشد. نتیجتاً می‌گوییم که دو درجه آزادی ارتعاشی وجود دارد.

یک بررسی سریع تحلیل پیش گفته نشان می‌دهد که برای هر درجه آزادی کاملاً تحریک شده مشارکتی برابر با  $\frac{1}{2}Nk$  در گرمای ویژه مشاهده گردیده است. این محتوای اساسی اصل هم‌افراز انرژی است. دقت کنید که این مشارکت در گرمای ویژه، مستقل از جرم ذرات است.

اصل هم‌افراز انرژی کاربرد محدودی دارد زیرا بدون مراجعه به اطلاعات جدول بندی شده نظیر آنچه که در جدول ۱-۱۳ نشان داده شده هرگز از موقع کاربرد آن مطمئن نخواهیم بود. مشخصات تحلیلی نسبتاً عمومی از اصل مذکور ممکن است به طریق زیر داده شود. تصور کنید که انرژی توأم با یک درجه آزادی به صورت تابعی درجه دوم از محورهای مشخص کننده موقعیت ذره، سرعت برداری و غیره قابل بیان باشد.

$$\epsilon_x = a x^2$$

بعلاوه فرض می‌کنیم که توزیع بین حالات انرژی بوسیله فرمول نمایی  $MB$  داده شده است.

$$dN_x = e^{-\beta \epsilon_x} dx$$

که یک توزیع پیوسته حالات انرژی را فرض کرده‌ایم. بنابراین انرژی متوسط توأم با درجه آزادی عبارت است از

$$\bar{\epsilon}_x = \frac{\int \epsilon_x dN_x}{\int dN_x} = \frac{\int_0^{\infty} ax^2 e^{-\alpha x^2} dx}{\int_0^{\infty} e^{-\alpha x^2} dx} = \frac{1}{2} kT \quad (۱۳-۵۷)$$

این انرژی متوسط به ازای هر ذره و به ازای هر درجه آزادی است. کل انرژی توأم با حالت  $x$  برابر  $NkT$

$\frac{1}{p}$  بوده و مشارکت گرمای ویژه برابر  $\frac{1}{p} Nk$  خواهد بود.

در تحلیل ساده بخش‌های پیش گفته چندین فرض محدود کننده وجود دارد. یک تابع انرژی درجه دوم، یک توزیع پیوسته انرژی و فرمول توزیع نمایی از نوع  $MB$  همگی برای به دست آوردن نتیجه  $\frac{1}{p} kT$  ضروری هستند. برآورده شدن این شرایط در مورد حالت‌های انرژی انتقالی برای یک گاز تک اتمی به خاطر بستگی انرژی به  $v_x^2$  و توزیع تقریباً پیوسته این حالت‌های انرژی است. اگر رفتار حالات انرژی چرخشی به صورت "کلاسیکی" می‌بود، به طوری که  $\frac{1}{p} I\omega^2 \sim \varepsilon_{rot}$ ، که  $\omega$  سرعت زاویه‌ای است، باید انتظار می‌داشتیم که افزاز برابر در این مورد هم صدق می‌کرد. به هر صورت همان طور که اکنون مشاهده گردید این گونه رفتار فقط در دماهایی که در مقایسه با  $\theta_{rot}$  بالا می‌باشند، تجربه شده است.

### ۷-۱۳ حالت جامد

بحث‌های گذشته ماکاربرد ترمودینامیک آماری را در مورد سیستم‌هایی مورد بررسی قرار داده است که فاصله ملکولی در مقایسه با اندازه ملکولها خیلی بزرگ هستند. به خاطر این فاصله زیاد می‌توان فرض کرد که ملکولها آزاد هستند تا به صورت موجودیتهای مستقلی حرکت نمایند بدون این که اساساً میدانهای نیروی ملکولهای مجاور تأثیری بر روی انرژی آنها بگذارند. حالت جامد وضعیت کاملاً متفاوتی را ارائه می‌دهد. در این مورد فاصله اتمها خیلی نزدیک به یکدیگر است به طوری که میدانهای نیروی آنها اساساً اتمها را در محل خود ساکن می‌کند، لذا فقط مجاز هستند حول یک موقعیت تعادلی تحت تأثیر میدانهای نیروی اتمهای مجاور نوسان نمایند. یکی از مسائل تحلیل آماری حالت جامد این است که بتوان بطور مناسبی دخالت این حرکت نوسانی را در انرژی داخلی و گرمای ویژه جسم جامد بیان نمود.

اگر جسم جامد یک هادی الکتریکی است، تعداد قابل ملاحظه‌ای از الکترون‌ها نسبتاً آزادند که حرکت کنند و بار الکتریکی را انتقال دهند. معمولاً این الکترونهای آزاد گاز الکترون نامیده می‌شوند. چون الکترون‌ها دارای حرکت و انرژی جنبشی هستند، انتظار می‌رود که در انرژی داخلی کل و گرمای ویژه کل جسم جامد دخالت داشته باشند. بنابراین یک بخش اضافی در تحلیل آماری حالت جامد، عبارت از مشخصات توزیع انرژی در گاز الکترون برای یک جسم جامد است. سپس این اطلاعات با اطلاعات مربوط به انرژی ارتعاش شبکه برای پیش‌بینی کل رفتار انرژی جسم جامد ادغام می‌گردد.

انتظار می‌رود که برای عایقهای الکتریکی دخالت گاز الکترون در انرژی داخلی جسم جامد کم باشد. ابتدا مشارکت انرژی متوجه از ارتعاشات شبکه را در نظر می‌گیریم. اولین تحلیل نسبتاً رضایت‌بخش این مسأله توسط اینشتین انجام گرفت که فرض نمود نیروهای کنترل‌کننده ارتعاش هر کدام از اتمها، یک نوسان ساز ساده هارمونیک تولید می‌کنند که برای تعیین ترازهای انرژی مجاز ممکن است با روشهای مکانیک کوانتومی تجزیه و تحلیل گردند. ترازهای انرژی مجاز توسط همان رابطه مورد استفاده برای تحلیل انرژیهای ارتعاشی در ملکولهای دواتمی داده شده‌اند.

$$\varepsilon = \left(n + \frac{1}{2}\right) h\nu \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

که  $\nu$  فرکانس نوسان ساز است. فرض شده که برای هر تراز انرژی فقط یک حالت کوانتم مجاز می‌باشد به طوری که تابع افراز نظیر قبل به وسیله رابطه زیر داده می‌شود.

$$Z = \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[ - \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{h\nu}{kT} \right] = \frac{e^{-\theta_E/2T}}{1 - e^{-\theta_E/T}} \quad (۱۳-۵۸)$$

که حال  $\theta_E = h\nu/k$  دمای اینشتین جسم جامد نامیده می‌شود.

تعداد کل اتمها در جسم جامد به صورت  $N$  در نظر گرفته شده، اگر چه انتظار می‌رود که برای هر اتم سه نوسان ساز هارمونیک وجود خواهد داشت (یک عدد برای هر محور فضایی) به طوری که تعداد کل نوسان سازهای مورد نظر برابر  $3N$  می‌باشد. بدین ترتیب انرژی داخلی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$U = 3 NkT^2 \left( \frac{\partial \ln Z}{\partial T} \right) \quad (۱۳-۵۹)$$

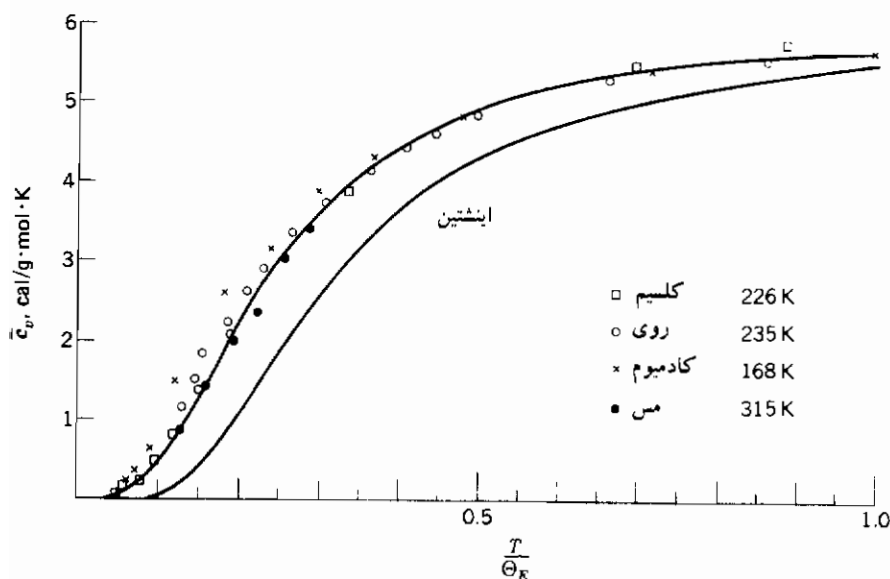
از ترکیب این رابطه با معادله (۱۳-۵۸) حاصل می‌شود:

$$U = \frac{3}{2} NkT \frac{\theta_E}{T} + 3NkT \frac{\theta_E/T}{e^{\theta_E/T} - 1} \quad (۱۳-۶۰)$$

بدین ترتیب گرمای ویژه مولی در حجم ثابت برابر است با

$$\bar{c}_v = 3 \Re \left( \frac{\theta_E}{T} \right)^2 \frac{e^{\theta_E/T}}{(e^{\theta_E/T} - 1)^2} \quad (۱۳-۶۱)$$

این رابطه برای گرمای ویژه به صورت تابعی از  $T/\theta_E$  در شکل ۱۳-۵ رسم شده است. در دماهای خیلی بالا گرمای ویژه به یک مقدار ثابت  $3R$  نزدیک می‌شود. این مقدار دقیقاً همانی خواهد بود که از یک ارزیابی ساده مسأله از نظر هم افزای انرژی انتظار می‌رود. آنها دارای حرکت در سه جهت بوده، برای هر محور دو حالت انرژی ارتعاشی وجود دارد به طوری که مجموعاً شش درجه آزادی انتظار می‌رود. هر درجه آزادی به اندازه  $\frac{1}{2}R$  در گرمای ویژه مشارکت دارد، بدین ترتیب مجموع  $3R$  کاملاً منطقی است.



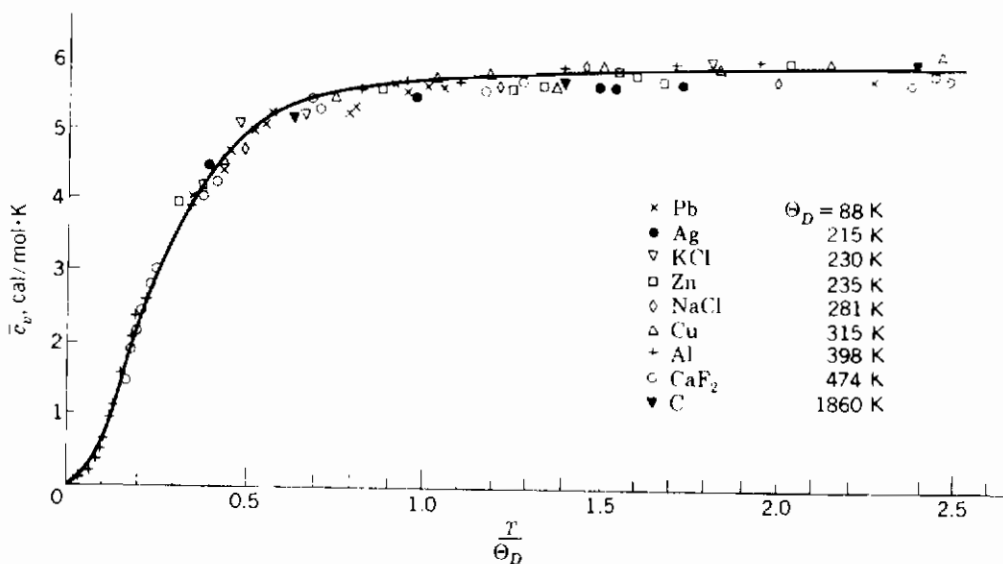
شکل ۱۳-۵ گرمای ویژه یک جسم جامد بر طبق تئوری اینشتین  
مقایسه شده با مقادیر تجربی

شکل منحنی در نمودار ۱۳-۵ در تطابق کلی با نتایج آزمایشی برای گرماهای ویژه جامدات می‌باشد، اما در دماهای پایین مقادیری برای  $\bar{c}_v$  پیش‌بینی می‌کند که خیلی پایین هستند. عیب اصلی در تحلیل اینشتین این است که تمام آنها بر خلاف آنچه که برای محاسبه فرض شده با فرکانس یکسانی نوسان نمی‌کنند. این اشکال را دمای  $\theta_E$  مرتفع کرد، و یک توزیع پیوسته فرکانسها

را فرض نمود که ممکنست از تئوری موج کش‌سان<sup>۱</sup> برای محیط متجانس محاسبه گردد. این تحلیل نسبتاً پیچیده را ارائه نخواهیم داد بلکه فقط نتایج را بیان می‌کنیم. دبای برای انرژی داخلی به دست آورد:

$$U - U_0 = \frac{9NkT}{(\theta_D/T)^3} \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \quad (۱۳-۶۲)$$

$U_0$  انرژی داخلی شبکه در  $T = 0$  است. از این رابطه می‌توان مشتق گرفته تا گرمای ویژه به صورت زیر به دست آید.



شکل ۶-۱۳ گرمای ویژه یک جسم جامد برطبق تئوری دبای و مقایسه با مقادیر تجربی

$$\bar{c}_v = 3 \mathcal{R} \left[ \frac{12}{(\theta_D/T)^3} \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} - \frac{3(\theta_D/T)}{e^{\theta_D/T} - 1} \right] \quad (۱۳-۶۳)$$

در این عبارات  $\theta_D$  دمای دبای نامیده شده و بوسیله رابطه زیر داده شده است.

$$\theta_D = \frac{h\nu_m}{k} \quad (۱۳-۶۴)$$



$\nu_m$  بالاترین فرکانس ملاحظه شده در ارتعاشات شبکه است. انتگرالها در معادلات (۶۲-۱۳) و (۶۳-۱۳) باید به طور عددی تعیین شوند و نتایج چنان ارزیابی در شکل ۶-۱۳ نشان داده شده است. همان طور که بوسیله نقاط داده های تجربی مشخص شده اند، این منحنی در تطابق بسیار خوبی با آزمایش می باشد. مقادیر دمای دمای  $\theta_D$  برای تعدادی از مواد جامد در جدول ۳-۱۳ داده شده اند. برای دماهای بالا در مقایسه با  $\theta_D$  گرمای ویژه به  $3R$  نزدیک می گردد. برای دماهای خیلی پایین در مقایسه با  $\theta_D$  جمله نمایی در مخرجهای معادله (۶۳-۱۳) غلبه کرده و  $\bar{c}_v$  تقریباً به صورت زیر داده شده

جدول ۳-۱۳ دماهای دمای جامدات مختلف

ماده	محدوده، K	$\theta_D$	ماده	محدوده، K	$\theta_D$
سرب	۵۷۳-۱۴	۸۸	سیلیوم (KCl)	۵۵۰-۲۳	۲۳۰
تالیوم	۳۰۱-۲۳	۹۶	روی	۶۷۳-۳۳	۲۳۵
حیود	۲۳۲-۳۱	۹۷	نمک سنگ (NaCl)	۶۶۴-۲۵	۲۸۱
ید	۲۹۸-۲۲	۱۰۶	مس	۷۷۳-۱۴	۳۱۵
کادمیوم	۳۸۰-۵۰	۱۶۸	آلومینیم	۷۷۳-۱۹	۳۹۸
سدیم	۲۴۰-۵۰	۱۷۲	آهن	۹۵-۳۲	۴۵۳
برمیدپتاسیم	۴۱۷-۷۹	۱۷۷	فلورسپار (CaF <sub>۲</sub> )	۳۲۸-۱۷	۴۷۴
نقره	۸۷۳-۳۵	۲۱۵	پیریت (FeS <sub>۲</sub> )	۵۷-۲۲	۶۴۵
کلسیم	۲۶-۲۲	۲۲۶	الماس	۱۱۶۹-۳۰	۱۸۶۰

$$\bar{c}_v \approx 3R \left[ \frac{12}{(\theta_D/T)^3} \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^3 dx}{e^x} \right]$$

$$= \frac{12}{5} R \frac{\pi^4}{(\theta_D/T)^3} = 464.4 \left( \frac{T}{\theta_D} \right)^3 \text{ cal/g.mol.K} \quad T \ll \theta_D \quad (۶۵-۱۳)$$

چون  $R = ۱/۹۸۷ \text{ cal/g.mol.K}$  می باشد، معادله (۶۵-۱۳) معمولاً برای  $T < \theta_D/۱۰$

معتبر است.

## مثال ۱۳-۳

گرمای ویژه آلومینیم را در  $200\text{ K}$  محاسبه کنید.

**حل:** از جدول ۱۳-۳ برای آلومینیم داریم  $\theta_D = 398\text{ K}$ . محاسبه می‌کنیم:

$$\frac{T}{\theta_D} = \frac{200}{398} = 0.502$$

با مراجعه به شکل ۱۳-۶ پیدا می‌کنیم که

$$\bar{c}_v = 4.9\text{ cal/g.mol.K} = 20.5\text{ kJ/kg.mol.K}$$

## مثال ۱۳-۴

گرمای ویژه مس را در  $10\text{ K}$  محاسبه کنید.

**حل:** از جدول ۱۳-۳ برای مس  $\theta_D = 315\text{ K}$  به‌طوری که  $T < \theta_D$ . بنابراین ممکن است معادله (۱۳-۶۵) را برای محاسبه گرمای ویژه به کار ببریم.

$$\begin{aligned}\bar{c}_v &= 464.4 \left( \frac{T}{\theta_D} \right)^3 \\ &= 464.4 \left( \frac{10}{315} \right)^3 = 0.01486\text{ cal/g.mol.K} = 0.0622\text{ kJ/kg.mol.K}\end{aligned}$$

## ۱۳-۸ گاز الکترون

یادآوری می‌شود که بحث ابتدایی ما درباره جامدات نشان داد که الکترونهای آزاد در یک فلز، یا گاز الکترون، ممکن است در کل انرژی جسم جامد و بنابراین در گرمای ویژه در حجم ثابت دخالت داشته باشند. با فرض این که این الکترونها برآستی رفتاری نظیر یک گاز تک اتمی ایده آل دارند،

لذا دخالت آنها در گرمای ویژه همان طور که در بخش ۴-۱۳ محاسبه گردید، باید در حدود  $\frac{3}{4}$  باشد. اما ظاهراً مسأله این گونه نیست زیرا گرماهای ویژه اجسام هادی و غیر هادی به طور کاملاً جالبی تنها به وسیله تئوری دمای پیش بینی شده اند. البته این تئوری به هیچ ترتیبی الکترونها را در نظر نمی گیرد، به عبارت دیگر ظاهراً الکترونها هیچ گونه دخالتی در گرمای ویژه جسم جامد ندارند. این مسأله بسیار جالب است و حال خواهیم دید که چگونه این اختلال مرتفع شده است.

الکترونها در یک جسم جامد اگرچه می تواند حرکت کنند ولی به صورت اتمهای یک گاز تک اتمی حقیقتاً "آزاد" نیستند. الکترونها با اتمهای جسم جامد درگیر می باشند حتی اگر این ارتباط خیلی ضعیف باشد. ترازهای انرژی مجاز آنها نه فقط به وسیله یک اتم نظیر الکترونها چسبیده به اتم یک گاز، بلکه بوسیله تمام اتمهای موجود در جسم جامد تحت تأثیر قرار می گیرند. فرضیه آماری بنیادین مربوط به گاز الکترون، اصل انحصار پاولی<sup>۱</sup> می باشد که بیان کننده این مطلب است که بیشتر از دو الکترون نمی توانند حالت کوانتم یکسانی را اشغال نمایند. ضریب ۲ برای آن است که الکترونها ممکن است دارای اسپین در جهت راست و یا چپ باشند. دقت کنید که اصل مذکور در مورد حالت کوانتم به کار می رود نه تراز انرژی. مشاهده این مطلب باید نسبتاً ساده باشد که با حالتی مواجه هستیم که توزیع آماری فرمی-دیراک به کار می رود یعنی شرایطی که هر حالت کوانتم را فقط یک ذره ممکن است اشغال نماید. (در بخش ۶-۱۲ این بدان معنی بود که بیشتر از یک گلوله در هر جعبه کوچک نداشته باشیم). یک ضریب ۲ برای اسپین در نظر گرفته و به تحلیل ادامه می دهیم. هنوز فرض می کنیم که اصل عدم قطعیت به کار می رود، به طوری که تبهگنی بوسیله رابطه زیر داده شده است:

$$g_i = \frac{2}{h^3} dx dy dz dp_x dp_y dp_z \quad (۱۳-۶۶)$$

توزیع  $FD$  عبارت بود از

$$\frac{N_i}{g_i} = \frac{1}{Ae^{\beta e} + 1} \quad (۱۳-۶۷)$$

حال فرض می کنیم که تعداد زیادی تراز انرژی برای الکترونها موجود در جسم جامد در دسترس است

به طوری که طیف انرژی تقریباً پیوسته باشد. سپس با استفاده از معادلات (۱۳-۶۶) و (۱۳-۶۷) به دست می آوریم:

$$d^6N = \frac{2/h^3}{Ae^{\beta\epsilon} + 1} dx dy dz dp_x dp_y dp_z$$

از انتگرال گرفتن روی حجم سیستم  $V$  حاصل می شود:

$$d^3N = \frac{2V/h^3}{Ae^{\beta\epsilon} + 1} dp_x dp_y dp_z \quad (13-68)$$

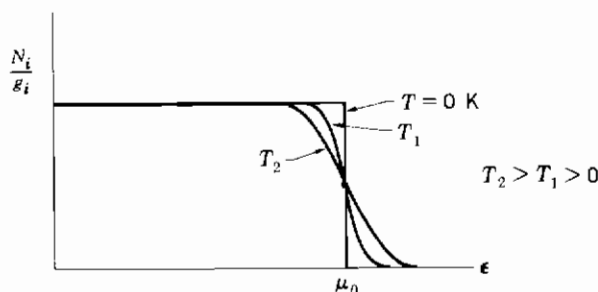
حال با مسأله تعیین ثابت  $A$  روبرو هستیم. جایگزینی زیر را انجام می دهیم.

$$A = e^{-\beta\mu_0} \quad (13-69)$$

$\mu_0$  ثابت جدیدی است. لذا توزیع  $FD$  مربوط به معادله (۱۳-۶۷) به صورت زیر در می آید:

$$\frac{N_i}{g_i} = \frac{1}{e^{(\epsilon - \mu_0)/kT} + 1} \quad (13-70)$$

منحنی این رابطه برای دماهای مختلف در شکل ۱۳-۷ نشان داده شده است. این منحنی نتیجه نسبتاً قابل ملاحظه ای را مشخص می کند. در  $T = 0$  تمام حالات انرژی تا یک انرژی  $\mu_0$  کاملاً پر شده است. بالاتر از این انرژی هیچ کدام از حالات انرژی اشغال نشده است. برای دماهای بالاتر (هنوز نگفته ایم که چقدر بالاتر) توزیع انرژی افت می کند به طوری که بعضی حالت های انرژی پایین تر از  $\mu_0$  وجود دارند که



شکل ۱۳-۷ توزیع فرمی - دیراک به صورت تابعی از دما

کاملاً پر نشده و بعضی حالت‌های انرژی بالای  $\mu_0$  که ممکن است اشغال شده باشند هنوز منحنیها تقریباً حول  $\mu_0 = \varepsilon$  قرینه هستند به طوری که انرژی کل ممکن است فرض شود که برای تمام این دماها تقریباً همانی باشد که در  $T = 0$  مشاهده گردیده است. بیشینه انرژی الکترونها در  $T = 0$  برابر  $\mu_0$  است و این انرژی تراز فرمی نامیده شده است.

حال احتیاج به تعیین عبارتی برای  $\mu_0$  داریم. فرض می‌شود که تمام انرژی الکترون انرژی جنبشی انتقالی است به طوری که

$$\varepsilon = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{p^2}{2m_e} \quad (13-71)$$

$p$  منتوم است. معنی فیزیکی منحنی شکل ۷-۱۳ این است که فضای انرژی در  $T = 0$  به طور یکسان تا یک انرژی  $\mu_0$  تجمع یافته است. بالاتر از این انرژی هیچ گونه تجمعی وجود ندارد. برای این انرژی بیشینه یک منتوم بیشینه وجود دارد.

$$p_m^2 = 2 m_e \mu_0 \quad (13-72)$$

حال روشن است که تعداد الکترونها بر واحد حجم فضای منتوم در  $T = 0$  بوسیله معادله (۶۸-۱۳) به صورت زیر داده می‌شود.

$$\rho_{e0} = \frac{2V}{h^3}$$

این عدد بر روی تمام بخش قابل کاربرد فضای منتوم عدد ثابتی است، بنابراین برای به دست آوردن تعداد کل الکترونها، این تراکم الکترونی،  $\rho_{e0}$ ، را در حجم کل فضای منتوم تا  $p_m$  ضرب می‌کنیم. این حجم برابر با حجم کره‌ای به شعاع  $p_m$  است.

$$N_{e0} = \frac{2V}{h^3} \left( \frac{4}{3} \pi p_m^3 \right) \quad (13-73)$$

از جایگزینی معادله (۷۳-۱۳) در معادله (۷۲-۱۳) به دست می‌آوریم:

$$\mu_0 = \frac{h^2}{8m_e} \left( \frac{3N_{e0}}{\pi V} \right)^{2/3} \quad (13-74)$$

حال عبارتی برای ثابت  $A$  در  $T = 0$  داریم و اگر فرض کنیم که این عبارت در دماهای بالاتر هم به کار می‌رود در آن صورت ممکن است برای به دست آوردن اطلاعات مشخصتر درباره توزیعهای سرعت برداری الکترون و دخالتهای در گرمای ویژه اقدام کنیم. سامرفلد<sup>۱</sup> نشان داد که در دماهای بالای صفر مطلق ممکن است از معادله (۶۹-۱۳) برای ثابت  $A$  استفاده نمود در صورتی که یک پارامتر  $\mu$  به جای  $\mu_0$  جایگزین شود که

$$\mu = \mu_0 \left[ 1 - \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{kT}{\mu_0} \right)^2 + \dots \right] \quad (۷۵-۱۳)$$

فرض خواهیم کرد که احتمال حرکت الکترون در تمام جهات یکسان باشد. بدین ترتیب تراکم الکترونها در یک پوسته کروی باریک از فضای سرعت  $4\pi v^2 dv$  یکنواخت است. این تراکم از معادله (۶۸-۱۳) به صورت زیر به دست آمده است.

$$\frac{d^3N}{dv_x dv_y dv_z} = \frac{2m^3V/h^3}{Ae^{\beta\epsilon} + 1}$$

با استفاده از  $\epsilon = \frac{1}{2}mv^2$ ، مقدار  $A$ ، و از ضرب با حجم پوسته کروی توزیع سرعت برداری به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$dN_v = \frac{8\pi m^3V}{h^3} = \frac{v^2 dv}{\exp \{[(mv^2/2) - \mu]/kT\} + 1} \quad (۷۶-۱۳)$$

می‌توان آرایش این رابطه را تغییر داد تا توزیع انرژی به صورت زیر به دست آید.

$$dN_\epsilon = 4\pi V \left( \frac{2m}{h^2} \right)^{3/2} \frac{\epsilon^{1/2} d\epsilon}{e^{(\epsilon - \mu)/kT} + 1} \quad (۷۷-۱۳)$$

در معادلات (۷۶-۱۳) و (۷۷-۱۳) ضرب

$$f_\epsilon = \frac{1}{e^{(\epsilon - \mu)/kT} + 1} \quad (۷۸-۱۳)$$

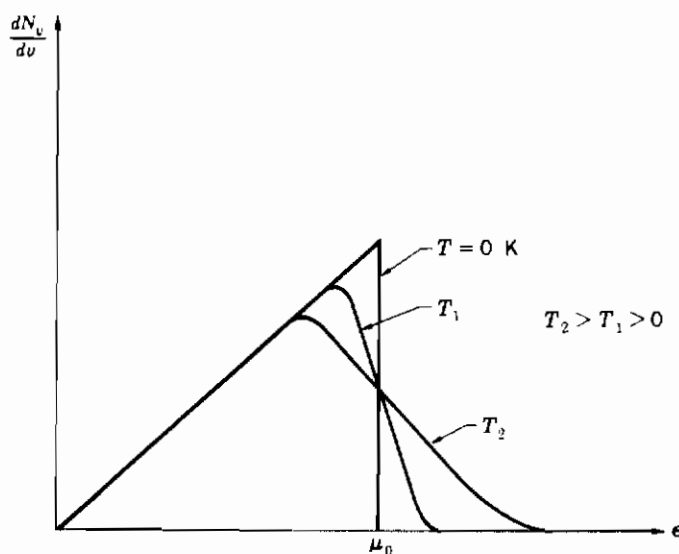
نمایانگر بخشی از حالت‌های انرژی دسترس‌پذیر است که با الکترونها اشغال شده‌اند زیرا در مدل  $FD$  بیشتر از یک ذره در هر حالت کوانتم مجاز نیست.  $f_\epsilon$  را به عنوان تابع فرمی مشخص خواهیم نمود.

شکلهای ۱۳-۸ و ۱۳-۹ منحنیهای توزیع انرژی و سرعت برداری الکترون را به صورت تابعی از دما نشان می دهند. در  $T = 0$  مقدار  $\epsilon$  همیشه کمتر از  $\mu_0$  است و جمله نمایی معادله (۱۳-۷۸) به سمت صفر میل می کند به طوری که توزیع انرژی به وسیله رابطه زیر داده شده است.

$$dN_e = 4\pi V \left( \frac{2m}{h^2} \right)^{3/2} \epsilon^{1/2} d\epsilon \quad T = 0 \quad (13-79)$$

انرژی متوسط الکترون در  $T = 0$  برابر است با

$$\bar{\epsilon}_0 = \frac{\int_0^{\mu_0} \epsilon dN_e}{\int_0^{\mu_0} dN_e} = \frac{3}{5} \mu_0 \quad (13-80)$$



شکل ۱۳-۸ توزیع سرعت برداری برای گاز الکترون

حد بالایی برای این انتگرال ها  $\mu_0$  است زیرا  $\mu_0$  بیشینه انرژی الکترون در  $T = 0$  می باشد. در دماهای بالای صفر مطلق انرژی متوسط الکترون باید از رابطه زیر محاسبه گردد

$$\bar{\epsilon} = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon dN_e}{\int_0^{\infty} dN_e} \quad (13-81)$$

چون هیچ گونه حد بالایی در ترازهای انرژی الکترون وجود ندارد. انتگرالهای معادله (۸۱-۱۳) ممکن است با جایگزینی توزیع انرژی از معادله (۷۷-۱۳) همراه با رابطه سایرفلد برای  $\mu$  از معادله (۷۵-۱۳) محاسبه گردد. نتیجه عبارت است از

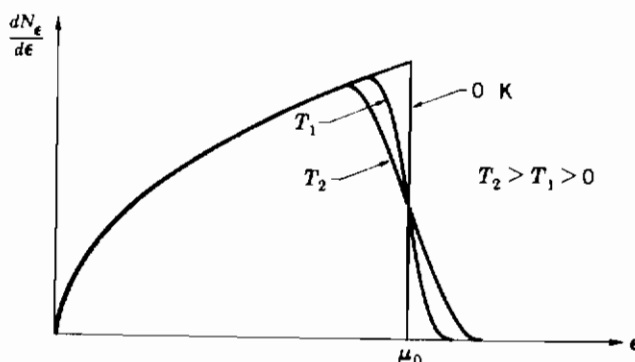
$$\bar{\varepsilon} = \frac{3}{5} \mu_0 \left[ 1 + \frac{5}{12} \pi^2 \left( \frac{kT}{\mu_0} \right)^2 + \dots \right] \quad (۸۲-۱۳)$$

سپس انرژی داخلی برابر است با

$$U = N \bar{\varepsilon} = \frac{3}{5} N \mu_0 + \frac{1}{4} \frac{\pi^2 N k^2}{\mu_0} T^2 \quad (۸۳-۱۳)$$

$N$  تعداد کل الکترونهاست. لذا گرمای ویژه مولی عبارت است از

$$\bar{c}_v = \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial T} \right)_v = \frac{\pi^2}{2} \frac{kT}{\mu_0} \mathfrak{R} \quad (۸۴-۱۳)$$



شکل ۹-۱۳ توزیع انرژی برای گاز الکترون

اگر الکترونها به صورت یک گاز تک اتمی ایده آل رفتار می کردند در آن صورت  $\bar{c}_v = \frac{3}{2} \mathfrak{R}$  را به دست می آوریم که مقدار خیلی بزرگتری است.

تحلیل پیش گفته عدم ضرورت در نظر گرفتن گاز الکترون را در موقع محاسبه گرماهای ویژه جامدات توضیح می دهد. مشارکت آنها برای تمام دماهای معمولی خیلی کوچک است زیرا  $kT \ll \mu_0$



می‌باشد. طریقه دیگر بیان این نتیجه به این صورت است که بخشی از انرژی داخلی الکترون در معادله (۸۳-۱۳) که به دما بستگی دارد در مقایسه با کل انرژی الکترون کوچک است. اگر چه همان طور که در مثال ۵-۱۳ نشان داده شده این انرژی کل کاملاً بزرگ بوده زیرا  $kT \gg \mu_0$  است.

### مثال ۵-۱۳ تراز فرمی برای مس

تراز انرژی فرمی را برای مس تخمین زده و دمای گاز ایده آل معادل را برای الکترونهاى آزاد بر اساس انرژی متوسط آنها در  $T = 0$  محاسبه کنید.

**حل:** فرض می‌کنیم که مس دارای یک الکترون آزاد به ازای هر اتم است به طوری که

$$\frac{N_{e0}}{V} = \frac{N_0}{M} \frac{m}{V} = \frac{N_0}{M} \rho$$

که  $M$  وزن ملکولی و  $\rho$  جرم مخصوص می‌باشد. برای مس  $M = 63.57$  و  $\rho = 8.94 \text{ g/cm}^3$  به طوری که

$$\frac{N_{e0}}{V} = \frac{(6.025 \times 10^{23})(8.94)}{63.57} = 8.47 \times 10^{22} \text{ electrons/cm}^3$$

حال معادله (۷۴-۱۳) را برای محاسبه  $\mu_0$  به کار می‌بریم

$$\begin{aligned} \mu_0 &= \frac{h^2}{8m_e} \left( \frac{3N_{e0}}{\pi V} \right)^{2/3} \\ &= \frac{(6.624 \times 10^{-27})^2}{(8)(9.1 \times 10^{-31})} \left[ \frac{(3)(8.47 \times 10^{22})}{\pi} \right]^{2/3} = \\ &= 1.13 \times 10^{-11} \text{ erg} = 7.07 \text{ eV} \end{aligned}$$

انرژی متوسط الکترون در  $T = 0$  بوسیله معادله (۸۰-۱۳) به صورت زیر داده شده است.

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon}_0 &= \frac{3}{5} \mu_0 = (0.6)(1.13 \times 10^{-11}) \\ &= 6.78 \times 10^{-12} \text{ erg} = 6.78 \times 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

برای محاسبه دمای گاز ایده آل معادل برای الکترونهاى آزاد مى نویسیم.

$$\bar{\varepsilon}_0 = \frac{3}{2} kT_{equiv}$$

از حل برای دمای معادل به دست می آوریم که

$$\begin{aligned} T_{equiv} &= \frac{2\bar{\varepsilon}_0}{3k} \\ &= \frac{(2)(6.78 \times 10^{-19})}{(3)(1.38 \times 10^{-23})} = 32800 \text{ K} \end{aligned}$$

### مثال ۶-۱۳ مشارکت الکترون در گرمای ویژه

مشارکت الکترون در گرمای ویژه مس را در  $300 \text{ K}$  (دمای اتاق) محاسبه کنید.

**حل:** این محاسبه را می توان با معادله (۸۴-۱۳) انجام داد، مقدار  $\mu_0$  در مثال ۵-۱۳ به دست آمده است. بدین ترتیب

$$\begin{aligned} \bar{c}_{v,elec} &= \frac{\pi^2 kT}{2 \mu_0} \Re \\ &= \frac{\pi^2 (1.38 \times 10^{-23})(300)}{(2)(1.13 \times 10^{-18})} \Re = 0.0181 \Re \end{aligned}$$

از این محاسبه مشاهده می کنیم که مشارکت الکترون در گرمای ویژه براستی خیلی کوچک است.

بحث کوتاه ما درباره حالت جامد، به پاره ای اطلاعات مهم منجر شده است:

- ۱ - ارتعاش شبکه مشارکت عمده در گرمای ویژه جامدات را ایجاد می کند.
- ۲ - همان طور که دمای مطلق به صفر نزدیک می گردد گرماهای ویژه جامدات به سمت صفر میل می کنند.
- ۳ - همان طور که  $T \rightarrow 0$  انرژی داخلی جامدات به سمت صفر نمی رود. نه فقط انرژی پتانسیل ذخیره شده در میدانهای نیروی متصل کننده اتمها به یکدیگر وجود دارد بلکه

مقدار قابل ملاحظه‌ای انرژی نیز در انرژی جنبشی الکترون موجود است. در حقیقت انرژی جنبشی الکترون‌ها خیلی بیشتر از انرژی جنبشی یک گاز معمولی در دمای اتاق است.

۴ - دمای صفر مطلق نشان دهنده حالتی نیست که حرکت اتمی و الکترونی متوقف می‌گردد.

۵ - الکترون‌های «آزاد» در یک جسم جامد نظیر یک گاز تک‌اتمی ساده رفتار نمی‌کنند، لذا محاسبه گرماهای ویژه آنها از اصل ساده هم افزای انرژی امکان‌پذیر نیست.

### ۹-۱۳ هادی‌ها و نیمه‌هادی‌ها

تحلیل ما درباره حالت جامد شامل تعیین گرماهای ویژه بر اساس تئوری دبی و استدلال عدم مشارکت اساسی گاز الکترون در گرمای ویژه بوده است. بررسی گاز الکترون بر اساس آنچه که ممکن است مدل نوار منفرد<sup>۱</sup> نامیده شود استوار می‌باشد، یعنی انرژیهای الکترون به‌طور عمده به‌نوعی بین تراز انرژی صفر و تراز انرژی فرمی محدودند. این یک تصویر حقیقی کامل از یک جسم جامد نیست. یک اتم منفرد ممکن است دارای الکترونهایی در ترازهای انرژی گوناگونی باشد که تابع روابطی مناسب از مکانیک کوانتومی می‌باشند. وقتی تعداد زیادی از اتمها مجبور به قرار گرفتن در فاصله نزدیکی از یکدیگر باشند (نظیر یک جسم جامد)، الکترون‌ها به‌طور خیلی قوی بر روی یکدیگر اثر گذاشته و نوارهای وسیعی از حالت‌های انرژی مجاز را اشغال می‌کنند. در صورتی که در یک اتم منفرد مسأله کاملاً بر عکس است و نوارهای انرژی به‌طور جالبی جدا از یکدیگر و مجزا مشاهده می‌گردند. با یک تحلیل نسبتاً پیچیده مکانیک کوانتومی می‌توان نشان داد که نتیجه کلی فرآیند عکس‌العمل داخلی الکترون‌ها بر روی یکدیگر عبارت از ایجاد نوارهای انرژی مجاز و ممنوع در داخل جسم جامد می‌باشد. نوار انرژی مجاز نواری است که ممکن است به‌وسیله الکترون‌ها اشغال گردد، در صورتی که نوار انرژی ممنوع ممکن نیست به‌وسیله الکترون‌ها اشغال شود.

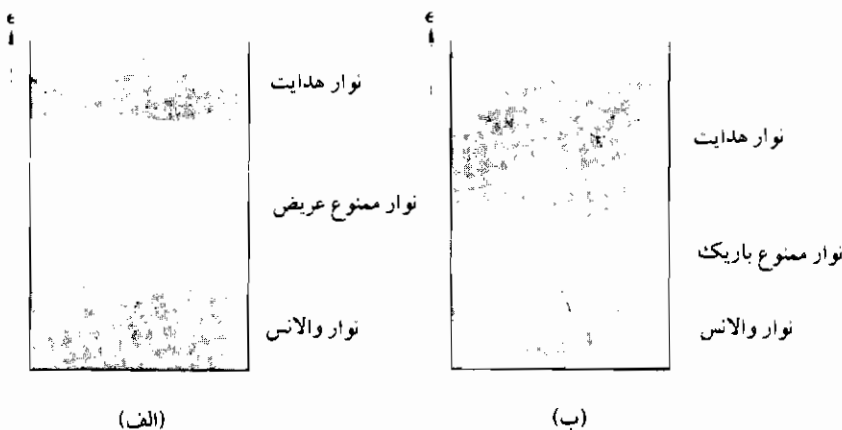
نوار الکترون پایین‌ترین تراز نوار والانس (ظرفیت) بوده و از عکس‌العمل‌های داخلی الکترون‌های والانس (لایه خارجی) در اتمهای منفرد حاصل می‌شود. نوار مجاز بعدی نوار هدایت نامیده می‌شود. به‌طور کلی نوار ممنوعی که جداکننده این دو نوار مجاز است خیلی عریض است (یعنی

خیلی خیلی بزرگتر از  $kT$  است). نوارهای مجاز ممکن دیگری وجود دارند اما دو نوار اشاره شده بیشتر مورد توجه هستند.

تابع توزیع فرمی - دیراک توزیع الکترونها را بین حالت‌های انرژی مجاز گوناگون در جسم جامد به دست می‌دهد. در  $T = 0$  تمام الکترونها نوار والانس را اشغال خواهند کرد. کسری از الکترونها که ممکن است به نوار هدایت بالا برده شوند به  $T$  و عرض نوار ممنوع بستگی دارند.

اگر نوار والانس کاملاً پر شده باشد در آن صورت جسم جامد ممکن نیست هدایت کننده باشد و به عنوان یک عایق عمل خواهد نمود مگر این که انرژی کافی برای جهش الکترونها به کار برده شود. اگر نوار ممنوع باریک بوده و نوار هدایت خالی باشد در آن صورت برای الکترونها خیلی ساده تر خواهد بود که از نوار والانس به داخل نوار هدایت عبور کنند. در این مورد جسم یک نیمه هادی نامیده می‌شود.

اگر نوار هدایت به طور جزئی پر شده باشد در آن صورت برای بالا بردن الکترونها به یک پتانسیل اندکی بالاتر در داخل نوار هدایت یعنی به حالتی اشغال نشده در یک تراز انرژی بالاتر، انرژی نسبتاً کمی لازم است. در این مورد حرکت الکترون به ساده ترین وجهی به وسیله یک میدان الکتریکی تحت تأثیر قرار گرفته و می‌گوییم که جسم به صورت یک هادی رفتار می‌کند اشکال ۱۰-۱۳ و ۱۱-۱۳ رفتار توضیح داده شده در بالا را نشان می‌دهند.



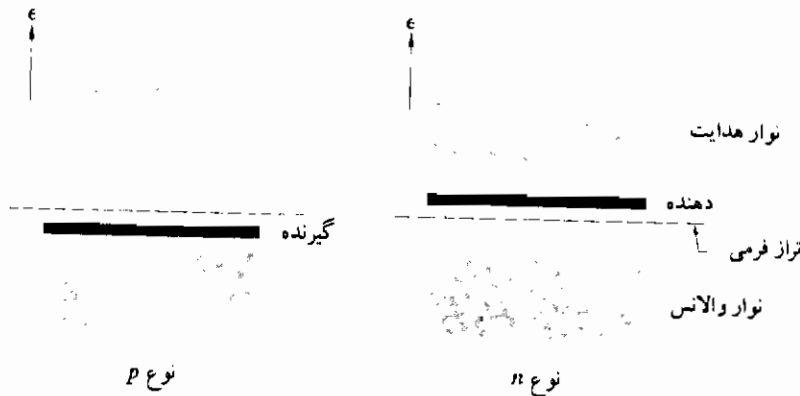
شکل ۱۰-۱۳ تنوری نوار (الف) عایق‌ها و (ب) نیمه هادیا



شکل ۱۱-۱۳ تنوری نوار هادیها

وقتی که یک الکترون فاصله نوار والانس به نوار هدایت را می‌جهد، حالت خالی ایجاد شده در نوار والانس را حفره می‌نامند. حفره مذکور ممکن است خالی باقی‌مانده یا با الکترون دیگری از یک مکان انرژی دیگر در داخل نوار والانس برگردد. تعداد الکترونهايي که از نوار والانس به سمت نوار هدایت حرکت می‌کنند با دما افزایش می‌یابد و چون تمام الکترونهايي که نوار هدایت را اشغال می‌کنند از نوار والانس می‌آیند، فرض می‌کنیم که تعداد الکترونها در نوار هدایت باید با تعداد حفره‌ها در نوار والانس یکسان باشد.

اگر هدایت در جسم فقط از حرکت الکترون از نوار والانس به نوار هدایت حاصل گردد، در آن صورت جسم مذکور یک نیمه‌هادی ذاتی<sup>۱</sup> خوانده می‌شود. مشخصه‌های عملکرد نیمه هادیها ممکن است با افزودن مقادیر کمی از ناخالصی‌ها به جسم جامد به مقدار قابل ملاحظه‌ای تغییر کند. همان‌طور که در شکل ۱۲-۱۳ نمایش داده شده این ناخالصیها به‌عنوان گیرنده یا دهنده الکترونها در فاصله ممنوع عمل می‌کنند. گیرنده یک نوار خالی در یک تراز انرژی کمی بالاتر از نوار والانس است. چون گیرنده حفره‌های اضافی دیگری ایجاد می‌کند لذا یک چنین نیمه‌هادی ناخالص یک نیمه‌هادی نوع  $p$  نامیده می‌شود که  $p$  دلالت بر مثبت بودن است. دهنده یک نوار پر شده در یک تراز انرژی کمی پایین‌تر از نوار هدایت است. این نوع نیمه‌هادی ناخالص بارهای منفی (الکترونها) اضافی دیگری ایجاد می‌کند لذا یک نیمه‌هادی نوع  $n$  نامیده می‌شود.



شکل ۱۲-۱۳ نیمه هادیهای ناخالص

تراز انرژی فرمی را می توان به طریق زیر به عرض نوار ممنوع ارتباط داد. برای سهولت، تراز انرژی را در بالای نوار والانس برابر صفر و در پایین نوار هدایت برابر با  $\epsilon$  در نظر می گیریم. فرض می شود که هر الکترونی که به داخل نوار هدایت می جهد یک حفره در نوار والانس به جای می گذارد. بدین ترتیب

$$N_h |_{\text{والانس}} = N_e |_{\text{هدایت}} \quad (۱۳-۸۵)$$

$N_h$  نشان دهنده تعداد حفره ها و  $N_e$  بیانگر تعداد الکترونهاست. مقیاس انرژی این مدل در شکل ۱۳-۱۳ نمایش داده شده است. به خاطر مفهوم نوار ممنوع لازم است که تعداد حالت های کوانتم دسترس پذیر برای الکترونها در این نوار برابر صفر باشد. سپس خارج از نوار ممنوع یک توزیع  $FD$  فرض می کنیم. این بدان معنی است که باید عبارت زیر را برای  $g_i$  در نوار هدایت به کار بگیریم:

$$g_i |_{\text{نوار هدایت}} = 4\pi V \left( \frac{2m_e}{h^2} \right)^{3/2} (\epsilon - \epsilon_g)^{1/2} \quad (۱۳-۸۶)$$

به عبارت دیگر تشکیل حالت های مجاز از  $\epsilon_g$  شروع می گردد (البته به همان طریقی که برای مدل نوار منفرد از  $\epsilon = 0$  شروع می گردید). باز هم رابطه زیر را برای تابع توزیع انرژی  $FD$  به کار می گیریم

$$f_e = \frac{1}{e^{(e-\mu)/kT} + 1} \quad (۱۳-۸۷)$$

بدین ترتیب تعداد الکترونها در نوار هدایت برابر است با

$$N_e = 4\pi V \left( \frac{2m_e}{h^2} \right)^{3/2} \int_{\epsilon_g}^{\infty} \frac{(\epsilon - \epsilon_g)^{1/2} d\epsilon}{e^{(\epsilon-\mu)/kT} + 1} \quad (۱۳-۸۸)$$

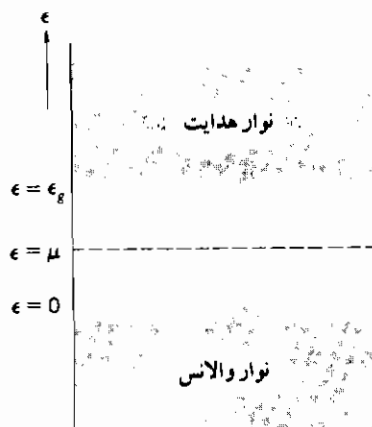
چون عرض نوار ممنوع معمولاً خیلی بیشتر از  $kT$  است لذا انتظار می‌رود که در نوار هدایت  $kT \gg (\epsilon - \mu)$  بوده به طوری که از عدد یک در مخرج معادله (۱۳-۸۸) می‌توان صرف نظر نموده و انتگرال مذکور با تغییر متغیر مناسب محاسبه شده تا نتیجه زیر حاصل گردد.

$$N_e = V \left( \frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{\mu/kT} e^{-\epsilon_g/kT} \quad (۱۳-۸۹)$$

تابع توزیع برای حفره‌های موجود در نوار والانس عبارت است از:

$$f_h = 1 - f_e = 1 - \frac{1}{e^{(\epsilon-\mu)/kT} + 1} = \frac{e^{-(\mu-\epsilon)/kT}}{e^{-(\mu-\epsilon)/kT} + 1} \quad (۱۳-۹۰)$$

انتظار می‌رود که در نوار والانس  $kT \gg (\mu - \epsilon)$  باشد به طوری که از جمله نمایی در مخرج معادله (۱۳-۹۰) می‌توان صرف نظر کرد. بدین ترتیب



شکل ۱۳-۱۳ مقیاس انرژی برای تحلیل نوارها

$$f_h = e^{-(\mu-\epsilon)/kT}$$

سپس تعداد حفره‌ها در نوار والانس با تشکیل انتگرال زیر به دست می‌آید

$$N_h = 4\pi V \left( \frac{2m_h}{h^2} \right)^{3/2} \int_{-\infty}^0 \epsilon^{1/2} e^{-(\mu-\epsilon)/kT} d\epsilon \quad (13-91)$$

$m_h$  جرم مؤثر حفره می‌باشد. با محاسبه انتگرال نتیجه زیر حاصل می‌شود

$$N_h = V \left( \frac{2\pi m_h kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\mu/kT} \quad (13-92)$$

مساوی قرار دادن معادلات (۱۳-۸۹) و (۱۳-۹۲) نتیجه می‌دهد:

$$\mu = \frac{1}{2} \epsilon_g + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_h}{m_e} \quad (13-93)$$

یا اگر جرم الکترون‌ها و حفره‌ها برابر باشد، به دست می‌آوریم

$$\mu = \frac{1}{2} \epsilon_g \quad (13-93a)$$

و تراز انرژی فرمی دقیقاً در مرکز نوار ممنوع قرار می‌گیرد. این نتیجه مهمی است و در توضیح دستگاه‌های تبدیل انرژی ترموالکتریک دارای ارزش عملی است. بعضی از عرض‌های نواری برای نیمه هادی‌ها در جدول ۴-۱۳ داده شده است.

## ۱۰-۱۳ گاز فوتونی (تابش جسم سیاه)

به عنوان یک کاربرد جالب آمار کوانتمی<sup>۱</sup> یک کمیت تابش حرارتی را در داخل یک حفره عایق شده در نظر گرفته و عبارتی برای توزیع انرژی جهت چنین تابشی را جستجو می‌کنیم. چنین سیستمی ممکن است گاز فوتونی خوانده شود زیرا متشکل از پیمانه‌های<sup>۲</sup> انرژی به بزرگی

$$\epsilon_i = h\nu_i$$

1- Quantum statistics

2- Quanta



جدول ۴-۱۳ عرض نوارهای ممنوع نمونه برای نیمه هادیها

ماده	$\varepsilon_g, \text{eV}$
Ge	۰/۷۸
Se	۲/۰
Si	۱/۲۱
Te	۰/۳۳
$\text{Cu}_2\text{O}$	۱/۰
InAs	۰/۵
InSb	۲/۳
$\text{UO}_2$	۰/۲
ZnS	۳/۶

است که  $\nu_i$  نشان دهنده فرکانس فوتونهاست. ممتوم فوتونها عبارت است از

$$p_i = \frac{h\nu_i}{c} = \frac{h}{\lambda_i} = \frac{\varepsilon_i}{c} \quad (۱۳-۹۴)$$

فوتونها معرف «ذراتی» هستند که حالت‌های کوانتم مختلفی را اشغال می‌کنند، اما یک مجموعه منزوی شده آنها، شامل تعداد ثابتی از ذرات نیست. مانند سیستم‌های ذره‌ای مرسوم، تراکم پیمانه‌های انرژی را جستجو می‌کنیم که هر حالت انرژی  $\varepsilon_i$  را اشغال می‌کنند. فوتونها تمیزناپذیر بوده و هیچ‌گونه محدودیتی بر روی تعداد حالت‌های کوانتم در دسترس وجود ندارد، لذا مدل آماری  $BE$  را به کار می‌گیریم.

$$\Omega_{BE} = \prod_i \frac{(g_i + N_i - 1)!}{N_i! (g_i - 1)!} \quad (۱۳-۹۵)$$

با تشکیل شرط به مقدار بیشینه رساندن

$$\delta(\ln \Omega) = 0$$

همراه با شرط انرژی ثابت

$$\delta U = 0 = \sum \varepsilon_i \delta N_i$$

نتیجه می‌دهد که

$$\frac{N_i}{g_i} = \frac{1}{e^{\beta \varepsilon_i} - 1} \quad (۱۳-۹۶)$$

لازم به تذکر است که شرایط ثابت بودن تعداد ذرات را بر روی توزیع اعمال نکرده‌ایم زیرا فتونها همانطور که در بخش ۴-۱۳ گفته شد، ممکن است به‌طور پیوسته تولید شده و نابود گردند.

فرض می‌کنیم که جداره‌های حفره مذکور در دمای  $T$  بوده و حجم کل برابر  $V$  باشد. تعداد حالت‌های کوانتم مجاز  $g_i$  در هر تراز انرژی  $\varepsilon_i$  از تقسیم حجم جزئی دارای این انرژی در فضای فازی بر  $h^3$  (کوچکترین حجم تمیزپذیر در فضای فازی) محاسبه شده است. در فضای کارترین محفظه مورد نظر نمی‌توانیم بگوییم که فتون در «کجا» قرار گرفته است، بجز این که بگوییم در حجم  $V$  می‌باشد. از طرف دیگر تراز انرژی  $\varepsilon_i$  از طریق معادله (۱۳-۹۴) به‌ممتوم متصل گردیده است به‌طوری‌که به‌عنوان حجم جزئی در فضای فازی یک پوسته کروی را انتخاب کرده:

$$V \times 4\pi p_i^2 dp_i$$

تعداد حالت‌های کوانتم در این حجم را به‌وسیله رابطه زیر محاسبه می‌کنیم.

$$g_i = \frac{4\pi V p_i^2 dp_i}{h^3} \quad (۱۳-۹۷)$$

این رابطه باید در یک ضریب ۲ ضرب گردد تا این حقیقت در نظر گرفته شود که نور ممکن است به‌طور دایره‌وار به‌طرف چپ و راست پلاریزه گردد. از ترکیب معادله (۱۳-۹۷) با معادله (۱۳-۹۶) نتیجه می‌گیریم:

$$N_i = \frac{8\pi V p_i^2 dp_i}{h^3 (e^{\beta \varepsilon_i} - 1)} \quad (۱۳-۹۸)$$

یکبار دیگر یادآوری می‌شود که  $N_i$  نشان دهنده تعداد فتون‌های دارای ممتوم بین  $p_i$  و  $p_i + dp_i$  در حجم  $V$  است. این در واقع عددی دارای انرژی بین  $\varepsilon_i$  و  $\varepsilon_i + d\varepsilon$  است. معادله (۱۳-۹۸) با توجه به این مطلب که از معادله (۱۳-۹۴)

$$p_i^2 = \frac{h^2 v_i^2}{c^2} \quad dp_i = \frac{h dv_i}{c}$$

ممکن است بر حسب فرکانس بیان گردد به طوری که

$$N_i = \frac{8\pi V v_i^2 dv_i}{c^3 (e^{\beta h v_i} - 1)} \quad (13-98a)$$

بدین ترتیب تعداد فتونها بر واحد حجم و بر واحد فرکانس برابر است با

$$\frac{dN}{V dv} = \frac{N_i}{V dv_i} = \frac{8\pi v^2}{c^3 (e^{\beta h v} - 1)}$$

در این جا فرض نموده ایم که یک طیف اساساً پیوسته از فرکانسها در دسترس می باشد به طوری که  $v_i$  به وسیله  $v$  جانشین شده است. انرژی هر فتون برابر  $h\nu$  می باشد به طوری که انرژی بر واحد حجم و بر واحد فرکانس برابر است با

$$u_v = \frac{8\pi h v^3}{c^3 (e^{\beta h v} - 1)} \quad (13-99)$$

وقتی که مانند گذشته شرایطی نظیر معادله (۱۳-۵) به کار رود معلوم می گردد که  $\beta = 1/kT$  می باشد. با استفاده از  $v = c/\lambda$  و  $dv = -(c/\lambda^2)d\lambda$ ، معادله (۱۳-۹۹) ممکن است بر حسب طول موج به صورت زیر نوشته شود.

$$u_\lambda = \frac{8\pi h c \lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (13-99a)$$

که حال  $u_\lambda$  انرژی بر واحد حجم و بر واحد طول موج می باشد.

می توان نشان داد که انرژی تابشی انتشار یافته از سطحی در داخل محفظه بسته (حفره) بر واحد

سطح و بر واحد زمان و بر واحد طول موج،  $E_{b\lambda}$ ، به وسیله رابطه زیر به  $u_\lambda$  مربوط گردیده است

$$E_{b\lambda} = \frac{u_\lambda c}{4}$$

به طوری که

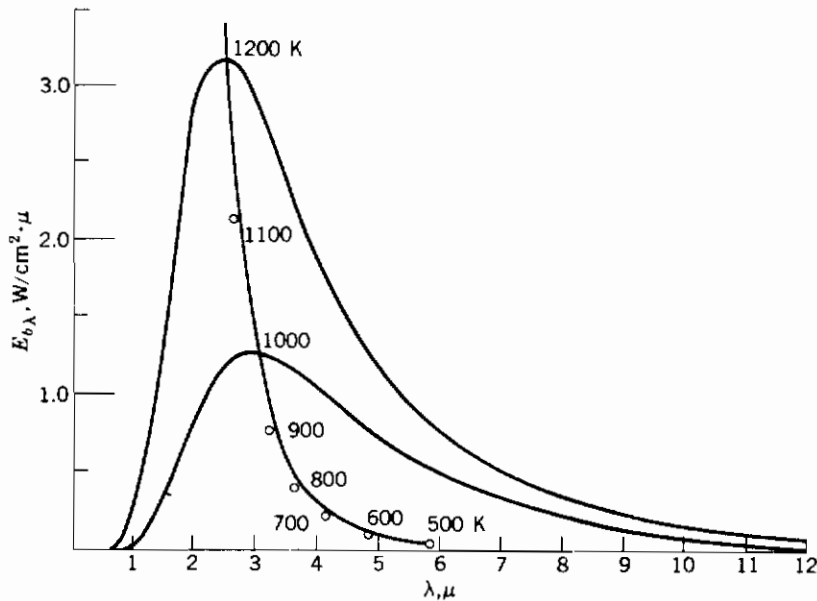
$$E_{b\lambda} = \frac{2\pi h c^2 \lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

$$E_{b\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (۱۳-۱۰۰)$$

معادله (۱۳-۱۰۰) قانون تابش جسم سیاه پلانک نامیده شده و مبنایی برای محاسبات تعداد زیادی از پدیده‌های انتقال حرارت تابشی است. منحنی این رابطه برای چندین دما در شکل ۱۴-۱۳ ارائه شده است. انتگرال‌گیری معادله (۱۳-۱۰۰) بر روی تمام طول موجهای ممکنه به رابطه زیر منجر می‌گردد.

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda = \sigma T^4 \quad (۱۳-۱۰۱)$$

$\sigma$  ثابت جدیدی است که ثابت استفان - بولتزمن<sup>۱</sup> خوانده می‌شود. معادله (۱۳-۱۰۱) بیان کننده کل تابش جسم سیاه صادر شده از یک سطح بر واحد سطح و بر واحد زمان می‌باشد.  $E_b$  معمولاً توان تابشی<sup>۲</sup> یک تابنده ایده آل خوانده می‌شود.  $E_b$  فقط تابش حرارتی صادر شده به وسیله یک جسم را



شکل ۱۴-۱۳ توزیع تابش جسم سیاه پلانک

1- Stefan-Boltzmann constant

2- Emissive power

بیان می‌کند. تابش حرارتی با توجه به این حقیقت که به‌دما بستگی دارد از سایر انواع تابش الکترومغناطیسی تمیز داده می‌شود.

بعضی از ثابتهای مناسب برای استفاده در فرمولهای تابش عبارت است از:

$$\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 = 1.714 \times 10^{-9} \text{ Btu/h.ft}^2 \cdot \text{R}^4$$

$$c_1 = 3.743 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\mu\text{m}^4/\text{m}^2 = 1.187 \times 10^8 \text{ Btu}\cdot\mu\text{m}^4/\text{ft}^2 \cdot \text{h}$$

$$c_2 = 1.4387 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K} = 2.5896 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{R}$$

که  $\mu\text{m}$  نشان دهنده واحد میکرون ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ) است.

### مثال ۱۳-۲

کل انرژی صادر شده به وسیله یک تابنده ایده آل را در  $1000 \text{ K}$  و  $2000 \text{ K}$  محاسبه کنید.

**حل:** این محاسبه سریعاً با معادله (۱۳-۱۰۱) انجام می‌گیرد. در  $T = 1000 \text{ K}$

$$\begin{aligned} E_b &= \sigma T^4 = (5.669 \times 10^{-8})(1000)^4 \\ &= 56.69 \text{ kW/m}^2 = 5.669 \text{ W/cm}^2 \end{aligned}$$

در  $T = 2000 \text{ K}$

$$E_b = (5.669 \times 10^{-8})(2000)^4 = 907 \text{ kW/m}^2$$

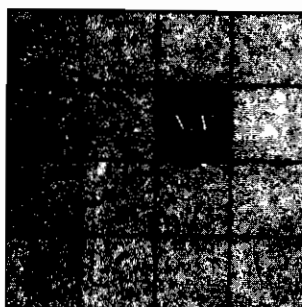
### ۱۳-۱۱ سیستمهای عکس العمل داخلی و مجموعه‌ای<sup>۱</sup>

در ارائه بنیادین روش آماری فصل دوازدهم و در کاربردهای این مدل‌های آماری در این فصل ذراتی مورد نظر بوده‌اند که با یکدیگر عکس العمل داخلی نداشته‌اند. ارتعاش اتمها در یک جسم جامد

به رفتار اتمهای مجاور آنها بستگی دارد. اما هنوز در قسمت آماری تحلیل مورد نظر، ذرات به صورت مستقل در نظر گرفته شده و مشخصات در نظر گرفته شده و مشخصات حالت‌های انرژی مجاز از جنبه مکانیک کوانتومی براساس در نظر گرفتن عکس‌العمل‌های داخلی استوار بوده است. برای سیستم‌هایی که تاکنون بررسی شده مجموعه‌ای منزوی از ذرات فرض گردیده است. برای این مجموعه منزوی انرژی کل و همین‌طور تعداد کل ذرات ثابت است.

در دنیای حقیقی وضعیت‌های زیادی وجود دارد که عکس‌العمل داخلی ذرات تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی توزیع آنها در بین حالت‌های انرژی در دسترس می‌گذارد. به عبارت دیگر تعداد ذرات در یک المان حجم ویژه‌ای در فضای فاز نامحدود نیست بلکه ممکن است به نیروهای عکس‌العمل داخلی بین ذرات و همین‌طور به اندازه ذرات بستگی داشته باشد. حالت جامد مثال آشکاری است. گازهای با فشار بالا و مایعات شال‌های دیگری هستند. در این مثال‌ها ناگزیر از در نظر گرفتن عکس‌العمل‌های داخلی هستیم. این اثرات جالب و پیچیده معمولاً به وسیله تئوری مجموعه‌ای بررسی شده است که خلاصه‌ای از نکات عمده آن را در این بخش ارائه خواهیم نمود.

مجموعه متعارفی در شکل ۱۵-۱۳ نمایش داده شده است. فرض شده است که سیستم بزرگ مجموعه‌ای از تعداد زیادی سیستم‌های کوچکتر فرعی است که هرکدام دارای تعداد ذرات ثابت  $N$  و حجم ثابت  $V$  هستند. مجموعه کلکسیونی از تمام این  $n$  سیستم‌های فرعی است. فرض کرده‌ایم که انرژی کل مجموعه مذکور ثابت است اما انرژی هر سیستم فرعی در ضمن حرکت ذرات تشکیل دهنده آن در کل سیستم، ممکن است تغییر نماید. فرض می‌شود که هرکدام از  $n$  سیستم‌های فرعی تمیزپذیر



$n$  سیستم فرعی به  
حجم  $V$  و  $N$  ذره

شکل ۱۵-۱۳ مجموعه متعارفی

باشد. دقت کنید که سیستمهای فرعی ممکن است با یکدیگر تبادل انرژی داشته باشند، اگر چه کل انرژی مجموعه ثابت باقی می ماند. برای تعیین حالت های انرژی مجاز سیستم های فرعی ملزم به در نظر گرفتن عکس العمل های داخلی ذره های علاوه بر سایر عوامل هستیم. احتمالاً این حالت های انرژی مجاز قابل محاسبه است. اگر تعداد سیستم های فرعی که دارای انرژی  $U_i$  هستند برابر  $\eta_i$  باشد، در آن صورت کل انرژی متوسط نمونه مذکور برابر است با

$$U = \sum_i \eta_i U_i \quad (13-102)$$

تعداد کل سیستم های فرعی برابر  $\eta$  است به طوری که

$$\eta = \sum_i \eta_i \quad (13-103)$$

ما علاقه مند به تعداد روش های آرایش سیستم های فرعی در بین حالت های گوناگون  $\eta_i$  هستیم. این مطلب در معادله (۱۲-۱۰) به صورت زیر محاسبه گردیده بود.

$$\Omega = \frac{\eta!}{\prod \eta_i!} \quad (13-104)$$

البته رابطه های معادلات (۱۳-۱۰۲)، (۱۳-۱۰۳) و (۱۳-۱۰۴) شباهت قابل توجهی با رابطه های بنیادی توزیع  $MB$  فصل دوازدهم دارند. باید به خاطر سپرد اصطلاح مجموعه تداخل انرژی های عکس العمل داخلی را در این توزیع ساده می سازد.

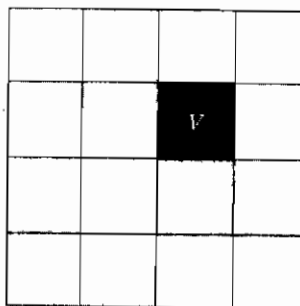
**مجموعه بزرگ متعارف<sup>۱</sup> در شکل ۱۶-۱۳** نمایش داده شده است. در این نوع مجموعه

شرط ثابت بودن تعداد ذرات در هر سیستم فرعی را بر می داریم. حال مقدار  $\eta$  سیستم فرعی به حجم  $V$  داریم. که کلیه آنها تمیز پذیر می باشند. انرژی کل و تعداد ذرات مجموعه مذکور ثابت فرض شده است، اما انرژی و تعداد ذرات در هر سیستم فرعی ممکن است تغییر کند. بدین طریق ما قادر به مطالعه سیستم هایی از ذرات هستیم که ممکن است تبادل انرژی و جرم نمایند. متغیر فرض کردن تعداد ذرات در تحلیل مورد نظر، مسائل را به مقدار قابل ملاحظه ای پیچیده می کند به ویژه این که باید مجموعه ای چندتایی به کار گرفته شوند. البته با توجه به امکانات موجود برای تحلیل سیستم های فیزیکی بُرنجتر، این

پیچیدگی توجیه شده است.

مجموعه جزئی متعارف نمونه‌ای متشکل از یک گروه سیستمهای فرعی است که دارای  $N$ ،  $V$  و انرژی ثابت هستند.

قادر نخواهیم بود که بحث خود را درباره مجموعه‌ها بیشتر از این گسترش دهیم بجز این که بگویم برای مطالعات پیشرفته‌تر ترمودینامیک آماری، بررسی مفصل روشهای مجموعه‌ای مورد لزوم است. برای اطلاعات بیشتر در این مورد خواننده می‌تواند به مآخذهای داده شده در انتهای فصل مذکور مراجعه نماید.



«سیستم فرعی به حجم  $V$ »

شکل ۱۶-۱۳ مجموعه بزرگ متعارف

### خودآزمایی (سؤالات مروری)

- ۱- تابع افراز چیست؟
- ۲- چگونه مفهوم ماکروسکپی دما با مدلهای ترمودینامیک میکروسکپی مربوط شده است؟
- ۳- منظور از یک گاز ایده آل از نقطه نظر فیزیکی چیست؟
- ۴- چگونه انرژی چرخشی در گرماهای ویژه گازهای ایده آل دخالت دارد؟
- ۵- اصل هم افراز انرژی چیست؟
- ۶- در مورد سهمهای نسبی ارتعاشات شبکه و انرژیهای الکترون در گرماهای ویژه جامدات بحث کنید.
- ۷- در بیشتر برنامه‌های علمی دبیرستانها (و بعضی دانشکده‌ها) تأکید زیاد وجود دارد که دمای صفر



مطلق به معنی انرژی صفر است. درباره این مفهوم بحث کنید.

- ۸ - حفره چیست؟
- ۹ - از نقطه نظر میکروسکوپی تفاوت بین هادیها، نیمه هادیها و عایقهای الکتریکی را مشخص کنید.
- ۱۰ - تابش جسم سیاه چیست؟
- ۱۱ - آنتروپی چیست؟
- ۱۲ - تبگه‌نی چیست؟
- ۱۳ - چگونه آنتروپی به تابع افراز مربوط است؟
- ۱۴ - منظور از دماهای چرخشی و ارتعاشی مشخصه چیست؟
- ۱۵ - درجه آزادی چیست؟
- ۱۶ - تفاوت بین مدل‌های اینشتین و دبای یک جسم جامد را بیان کنید.
- ۱۷ - الکترونهاى آزاد چیستند؟
- ۱۸ - تراز فرمی چیست؟
- ۱۹ - فتون چیست؟
- ۲۰ - مجموعه چیست؟
- ۲۱ - تفاوت بین مدل‌های توزیع انرژی  $FD$ ،  $MB$  و  $BE$  را بیان کنید.
- ۲۲ - چگونه الکترونها در گرمای ویژه یک جسم جامد دخالت دارند؟
- ۲۳ - درباره اثر ناخالصیها در رفتار نیمه هادیها بحث کنید.
- ۲۴ - منظور از نیمه هادیهای نوع  $p$  و  $n$  چیست؟
- ۲۵ - یک گاز فتونی چیست؟
- ۲۶ - منظور از تراکم انرژی تابشی چیست؟
- ۲۷ - قانون استفان-بولتزمن چیست؟

### مسائل

۱۳-۱ گرمای ویژه گازهای زیر را تخمین بزنید:

(الف)  $CO$  در  $50\text{ K}$ ،  $100\text{ K}$ ،  $300\text{ K}$ ،  $3000\text{ K}$

(ب)  $O_2$  در  $100\text{ K}$ ،  $300\text{ K}$ ،  $3000\text{ K}$

(ج)  $N_2$  در  $100\text{ K}$ ،  $300\text{ K}$ ،  $3000\text{ K}$

۱۳-۲ گرمای ویژه جامدات زیر را تخمین بزنید:

(الف) سدیم در  $40\text{ K}$ ،  $100\text{ K}$ ،  $200\text{ K}$

(ب) نقره در  $50\text{ K}$ ،  $100\text{ K}$ ،  $300\text{ K}$ ،  $500\text{ K}$

(ج) مس در  $50\text{ K}$ ،  $100\text{ K}$ ،  $300\text{ K}$ ،  $700\text{ K}$

(د) سرب در  $20\text{ K}$ ،  $100\text{ K}$ ،  $300\text{ K}$ ،  $500\text{ K}$

۱۳-۳ چهار جمله اولیه سری معادله (۱۳-۴۴) را محاسبه کرده و مقدار مربوطه گرمای ویژه چرخشی را برای حالات زیر حساب کنید:

$$\frac{T}{\theta_{rot}} = 0/2 \quad (\text{الف})$$

$$\frac{T}{\theta_{rot}} = 0/5 \quad (\text{ب})$$

$$\frac{T}{\theta_{rot}} = 0/8 \quad (\text{ج})$$

$$\frac{T}{\theta_{rot}} = 1/0 \quad (\text{د})$$

نتایج این چهار جمله اولیه سری را با منحنی شکل ۱۳-۲ مقایسه کنید.

۱۳-۴ تراز انرژی فرمی را برای نقره و تنگستن تخمین بزنید.

۱۳-۵ تابع فرمی را نسبت به  $\mu - \epsilon$  برای دماهای زیر رسم کنید.

$$T = 0\text{ K} \quad (\text{الف})$$

$$T = 50\text{ K} \quad (\text{ب})$$

$$T = 100\text{ K} \quad (\text{ج})$$

$$T = 300\text{ K} \quad (\text{د})$$

$$T = 500\text{ K} \quad (\text{ه})$$

درباره منحنی مذکور بحث نمایید.

۱۳-۶ تابع فرمی را نسبت به  $\epsilon/\mu$  برای نوارهای والانس و هدایت یک نیمه هادی که در آن  $\epsilon = \frac{1}{4}\mu$

است برای دماهای زیر رسم کنید:

$$T = 0 \text{ K} \quad (\text{الف})$$

$$T = 50 \text{ K} \quad (\text{ب})$$

$$T = 100 \text{ K} \quad (\text{ج})$$

$$T = 300 \text{ K} \quad (\text{د})$$

$$T = 500 \text{ K} \quad (\text{ه})$$

منحنیها را در فاصله  $5 < \varepsilon/\mu < 5$  - رسم کنید. تراز صفر در بالای نوار والانس در نظر گرفته شده است. برای این محاسبه عرض نوار ممنوع را برابر  $1 \text{ eV}$  در نظر بگیرید. درباره منحنیها بحث کنید.

۱۳-۷ چرا الکترونهاى آزاد اساساً در گرمای ویژه جامدات دخالت نمی‌کنند؟

۱۳-۸ چهار ذره تمیز ناپذیر در دو تراز انرژی گذارده می‌شوند که هر کدام از آنها دارای تبهگنی سه می‌باشند. احتمال ترمودینامیکی را برای تمام آرایشهای ممکنه تعیین کنید. آرایشی که بیشترین احتمال را دارد چیست؟

۱۳-۹ آتروپی  $H_p$  را در  $50$ ،  $300$  و  $3000 \text{ K}$  تعیین کنید.

۱۳-۱۰ عبارتی برای انتالپی بر حسب تابع افراز به دست آورید.

۱۳-۱۱ تجمعهای نسبی در سه تراز اولیه انرژی چرخشی را برای  $N_p$  در  $30$  و  $2000 \text{ K}$  محاسبه کنید.

۱۳-۱۲ تجمعهای نسبی در سه تراز اولیه انرژی ارتعاشی را برای  $N_p$  در  $2000$  و  $3500 \text{ K}$  محاسبه کنید.

۱۳-۱۳ منحنیهای  $\mu$  و  $\bar{\varepsilon}$  را نسبت به دما برای  $N_p$  از  $50$  تا  $7000 \text{ K}$  رسم کنید.

۱۳-۱۴ گرماهای ویژه الماس را در  $30$  و  $1000 \text{ K}$  محاسبه کنید.

۱۳-۱۵ اصل هم‌افراز انرژی برای چه محدوده دمایی در مورد (الف)  $N_p$ ، (ب)  $O_p$  و (ج)  $H_p$  با خطایی کمتر از  $\pm 10$  درصد برای گرمای ویژه به کار خواهد رفت؟

۱۳-۱۶ ممان اینرسی را برای ملکولهای (الف)  $O_p$ ، (ب)  $N_p$  و (ج)  $H_p$  تخمین بزنید.

۱۳-۱۷ حداکثر سرعت برداری الکترون آزاد در مس را در  $T = 0$  محاسبه کنید.

- ۱۳-۱۸ درصد مشارکت گاز الکترون را در گرمای ویژه برای نقره در  $35\text{ K}$  محاسبه کنید.
- ۱۳-۱۹ انرژی کل گاز الکترون در نقره را در صفر درجه کلوین با انرژی لازم برای افزایش دمای نقره از  $35\text{ K}$  تا  $55\text{ K}$  مقایسه نمایید.
- ۱۳-۲۰ حداکثر فرکانس مشخصه ارتعاشی را برای شبکه (الف) مس، (ب) سرب و (ج) الماس تخمین بزنید.
- ۱۳-۲۱ تابش صادر شده از یک تابنده ایده آل را در (الف)  $100\text{ K}$ ، (ب)  $1000\text{ K}$  و (ج)  $5000\text{ K}$  محاسبه کنید.
- ۱۳-۲۲ تراکم انرژی تابش را بر واحد طول موج در  $1\text{ }\mu\text{m}$  و  $5\text{ }\mu\text{m}$  برای هر یک از موارد مسأله ۱۳-۲۱ محاسبه کنید.
- ۱۳-۲۳ با یک فرآیند مشتق‌گیری مناسب نشان دهید که در فرمول تابش جسم سیاه پلانک نقطه بیشینه‌ای وجود دارد و این نقطه به وسیله رابطه زیر داده شده است.

$$(\lambda T)_{\max} = 5215.6\text{ }\mu\text{m}\cdot^{\circ}\text{R}$$

این رابطه قانون جابه‌جایی وین<sup>۱</sup> نامیده شده است.

## مراجع

- 1 Allis, W. P., and M. A. Herlin: "Thermodynamics and Statistical Mechanics," McGraw-Hill Book Company, New York, 1952.
- 2 Crawford, F. H.: "Heat, Thermodynamics and Statistical Physics," Harcourt, Brace & World, New York, 1963.
- 3 Hill, L.: "Statistical Mechanics," McGraw-Hill Book Company, New York, 1956.
- 4 Lee, J. F., F. W. Sears, and D. L. Turcotte: "Statistical Thermodynamics," Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1963.
- 5 Mayer, J. E., and M. G. Mayer: "Statistical Mechanics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1940.
- 6 Reynolds, W. C.: "Thermodynamics," 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.

- 7 SchrÖdinger, E.: "Statistical Thermodynamics," Cambridge University Press, Cambridge, 1952.
- 8 Sears, F. W.: "An Introduction to Thermodynamics, The Kinetic Theory of Gases, and Statistical Mechanics," Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1950.
- 9 Sommerfeld, A.: "Thermodynamics and Statistical Mechanics," Academic Press, Inc., New York, 1956.
- 10 Tolman, C.: "The Principles of Statistical Mechanics," Oxford University Press, London, 1938.
- 11 Tribus, M.: "Thermostatistics and Thermodynamics," D. Van Nostrand Company, Inc., Princeton, N. J., 1961.
- 12 Hatsopoulos, G. N., and J. H. Keenan: "Principles of General Thermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
- 13 Fay, J. A.: "Molccular Thermodynamics," Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Princeton, N.J., 1961.
- 14 Knuth, E. S.: "Introduction to Statistical Thermodynamics," McGraw-Hill Book Company, New York, 1966.



# ضمیمه A

## جدول A-۱ ثابتهای فیزیکی مهم

---

$N_0 = 6.022045 \times 10^{26}$ molecules/kg mol	عدد آووگادرو
$\mathfrak{R} = 1545.35$ ft.lbf/lbm.mol. $^{\circ}$ R	ثابت عمومی گاز
$= 8314.41$ J/kg mol.K	
$= 1.986$ Btu/lbm.mol. $^{\circ}$ R	
$= 1.986$ kcal/kg mol.K	
$h = 6.626176 \times 10^{-34}$ J	ثابت پلانک
$k = 1.380662 \times 10^{-23}$ J/molecule.K	ثابت بولتزمن
$= 8.6173 \times 10^{-5}$ eV/molecule.K	
$c = 2.997925 \times 10^8$ m/s	سرعت نور در خلأ
$g = 32.174$ ft/s $^2$	شتاب جاذبه ثقلی استاندارد
$= 9.80665$ m/s $^2$	
$m_e = 9.1095 \times 10^{-31}$ kg	جرم الکترون
$e = 1.602189 \times 10^{-19}$ C	بار الکترون
$\sigma = 0.1714 \times 10^{-8}$ Btu/h.ft $^2$ .R $^4$	ثابت استفان - بولتزمن
$= 5.67032 \times 10^{-8}$ W/m $^2$ .K $^4$	

---

## جدول A-۲ ضرایب تبدیل

1 cm	= 0.3937 in = $10^4 \mu\text{m}$ = $10^4 \text{ \AA}$	طول
1 in	= 2.540 cm	
1 ft	= 0.3048 m	
1 lbm	= 0.45359237 kg	جرم
1 slug	= 32.174 lbm	
1 N	= $10^5 \text{ dyn}$	نیرو
1 lbf	= 444822 dyn = 4.44822 N	
1 kgf	= 9.80665 N	
	= 1.0 kilopond	
1 Pa	= $1 \text{ N/m}^2$	فشار
1 lbf/in <sup>2</sup>	= 2.036 inHg at 32°F = 6894.76 Pa	
1 inHg	= 33864 dyn/cm <sup>2</sup> = 0.0334 atm	
	= 0.491 lbf/in <sup>2</sup>	
1 atm	= 14.69595 lbf/in <sup>2</sup> = 760 mmHg at 32°F	
	= 29.92 inHg at 32°F = 2116.21 lbf/ft <sup>2</sup>	
	= $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$	
1 kgf/cm <sup>2</sup>	= $9.80665 \times 10^4 \text{ Pa}$	
1 bar	= $10^5 \text{ N/m}^2$ = 0.98692 atm	
1 liter	= 0.2642 gal = 0.0353 ft <sup>3</sup> = 61.03 in <sup>3</sup>	حجم
1 gal	= 231 in <sup>3</sup>	
1 ft <sup>3</sup>	= 28.3168 liters = 7.4805 gal = 0.0283168 m <sup>3</sup>	
1 in <sup>3</sup>	= 16.387 cm <sup>3</sup>	
1 Btu	= 778.16 ft.lbf = 252.16 cal = 1055.04 J	انرژی
1 ft.lbf	= 1.3558 J	
1 J	= 1 N.m = $10^7 \text{ ergs}$	
1 cal	= 4.1854 J (ترموشیماپی)	
1 W	= 1 J/s = 860.13 cal/h = 3.413 Btu/h	توان
1 hp	= 746 W (الکتریکی) = 550 ft.lbf/s (مکانیکی)	
	= 2545 Btu/h	



جدول A-۲ (ادامہ) ضرایب تبدیل

°F	= 1.8°C + 32	دما
°R	= °F + 459.67	
K	= °C + 273.15	
°R	= 1.8 K	
1 Btu/lbm.°F	= 4186.8 J/kg.°C	متفرقہ
1 Btu/lbm	= 0.5559 cal/g	
	= 2326 J/kg	
1 ft³/lbm	= 0.062427 m³/kg	

جدول A-۳ آحاد اصلی و مکمل SI

علامت	واحد	کمیت
آحاد اصلی		
m	متر	طول
kg	کیلوگرم	جرم
s	ثانیہ	زمان
A	آمپر	جریان الکتریکی
K	کلوین	دما
cd	شمع (کاندلا)	شدت نور
آحاد مکمل		
rad	رادیان	زاویہ مسطحہ
sr	استرادیان	زاویہ رأس [احجام]

جدول ۴- A مشتقات واحدهای SI

کمیت	نام(های) واحد	نشانه با علامت اختصاری واحد، جایی که باشکلی اصلی متفاوت باشد	واحد بیان شده بر حسب واحدهای اصلی یا مکمل
مساحت	متر مربع		$m^2$
حجم	متر مکعب		$m^3$
فرکانس	هرتز، سیکل بر ثانیه	Hz	$s^{-1}$
چگالی، غلظت	کیلوگرم بر متر مکعب		$kg/m^3$
سرعت	متر بر ثانیه		$m/s$
سرعت زاویه‌ای	رادیان بر ثانیه		$rad/s$
شتاب	متر بر متر مربع ثانیه		$m/s^2$
شتاب زاویه‌ای	رادیان بر متر مربع ثانیه		$rad/s^2$
دبی حجمی جریان	متر مکعب بر ثانیه		$m^3/s$
نیرو	نیوتن	N	$kg.m/s^2$
کشش سطحی	نیوتن بر متر، ژول بر متر مربع	N/m, J/m <sup>2</sup>	$kg/s^2$
فشار	نیوتن بر متر مربع، پاسکال	N/m <sup>2</sup> , Pa	$kg/m.s^2$
لزجت، دینامیک	نیوتن ثانیه بر متر مربع، پواز	N.s/m <sup>2</sup> , Pl	$kg/m.s$
لزجت، سینماتیک، ضریب انتشار، هدایت جرم	متر مربع بر ثانیه		$m^2/s$
کار، گشتاور، انرژی، کمیت حرارت	ژول، نیوتن متر، وات - ثانیه	J, N.m, W.s	$kg.m^2/s^2$
توان، فلوی حرارتی	وات، ژول بر ثانیه	W, J/s	$kg.m^2/s^3$
چگالی فلوی حرارتی	وات بر متر مربع	W/m <sup>2</sup>	$kg/s^3$
نرخ حجمی حرارت آزاد شده	وات بر متر مکعب	W/m <sup>3</sup>	$kg/m.s^3$
ضریب انتقال حرارت	وات بر متر مربع - درجه	W/m <sup>2</sup> .deg	$kg/s^3.deg$
گرمای نهان انتالپی (مخصوص)	ژول بر کیلوگرم	J/kg	$m^2/s^2$

جدول ۴- A (ادامه) مشتقات واحدها SI

کمیت	نام(های) واحد	نشانه یا علامت اختصاری واحد، جایی که باشد اصلی متفاوت باشد	واحد بیان شده بر حسب واحدها اصلی یا مکمل
ظرفیت حرارتی (ویژه)	ژول بر کیلوگرم- درجه	J/kg.deg	$m^2/s^2.deg$
نرخ ظرفیت	وات بر درجه	W/deg	$kg.m^2/s^3.deg$
ضریب هدایت حرارتی	وات بر متر- درجه	W/m.deg , J.m/s.m <sup>2</sup> .deg	$kg/m.s^3.deg$
فلوی جرمی، دبی جرمی جریان	کیلوگرم بر ثانیه		kg/s
چگالی فلوی جرمی، دبی جرمی جریان بر واحد سطح	کیلوگرم بر مترمربع - ثانیه		$kg/m^2.s$
ضریب انتقال جرم	متر بر ثانیه		m/s
کمیت الکتریسته	کولن (کولمب)	C	A.s
نیروی الکتروموتوری	ولت	V, W/A	$kg.m^2/A.s^3$
مقاومت الکتریکی	اهم	$\Omega$ , V/A	$kg/m^2/A^2.s^3$
هدایت الکتریکی	آمپر بر ولت مربع	A/V.m	$A^2.s^3/kg.m^3$
کاپاسیتانس (ظرفیت) الکتریکی	فاراد	F, A.s/V	$A^3.s^4/kg.m^2$
فلوی مغناطیسی	وبر	Wb, V.s	$kg.m^2/A.s^2$
اندوکتانس (ضریب القایی)	هائری	H, V.s/A	$kg.m^2/A^2.s^2$
پرماییته (ضریب نفوذپذیری) مغناطیسی	هائری بر متر	H/m	$kg.m/A^2.s^2$
چگالی فلوی مغناطیسی	تسلا، وبر بر مترمربع	T, Wb/m <sup>2</sup>	$kg/A.s^2$
شدت میدان مغناطیسی	آمپر بر متر		A/m
نیروی محرکه مغناطیسی	آمپر		A
جریان نور	لومن	lm	cd.sr
روشنایی	کاندلا (شمع) بر مترمربع		cd/m <sup>2</sup>
شدت روشنایی	لاکس، لومن بر مترمربع	lx, lm/m <sup>2</sup>	cd.sr/m <sup>2</sup>

جدول ۵-۸ ثابتهای بحرانی

$z_c$	$v_c$		$p_c$	$T_c$	$M$	علامت	ماده
	$\frac{\text{ft}^3}{\text{lbm mol}}$	$\frac{\text{cm}^3}{\text{g mol}}^\dagger$	atm	K			
0.274	1.81	113	61.6	309.5	26.038	$\text{C}_2\text{H}_2$	استیلن
0.320	1.49	93.25	37.25	132.41	28.967		هوا
0.243	1.16	72.5	111.3	405.4	17.032	$\text{NH}_3$	آمونیاک
0.291	1.25	75	47.996	150.72	39.944	A	آرگون
0.274	4.17	260	48.6	562.6	78.114	$\text{C}_6\text{H}_6$	بنزن
0.274	4.08	255	37.47	425.17	58.124	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	$n$ -بوتان
0.283	4.21	263	36.00	408.14	58.124	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	ایزوبوتان
0.277	3.84	240	39.7	419.6	56.108	$\text{C}_4\text{H}_8$	۱-بوتان
0.275	1.51	94	72.90	304.20	44.011	$\text{CO}_2$	دی اکسیدکربن
0.294	4.42	93	34.529	132.91	28.011	CO	مونو اکسیدکربن
0.272	4.42	276	45.0	556.4	153.839	$\text{CCl}_4$	تتراکلرید کربن
			16.421	38.43	4.029	$\text{D}_2$	$n$ -دیتریم
0.237	11.5		17.9	659	170.340	$\text{C}_{12}\text{H}_{26}$	دو دکان
0.285	2.37	148	48.20	305.43	30.070	$\text{C}_2\text{H}_6$	اتان
0.262	4.53	282.9	35.6	467.8	74.124	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	اتیل اتر
0.270	1.99	124	50.50	283.06	28.054	$\text{C}_2\text{H}_4$	اتیلن
0.279	3.47	217	40.6	385.16	120.925	$\text{CCl}_2\text{F}_2$	فريون، F-۱۲
0.308	0.929	58	2.26	5.19	4.003	He	هلیوم
0.260	6.82	426	27.00	540.17	100.205	$\text{C}_7\text{H}_{16}$	$n$ -هپتان
0.264	5.89	368	29.94	507.9	86.178	$\text{C}_6\text{H}_{14}$	$n$ -هگزان
0.304	1.04	65	12.797	33.24	2.016	$\text{H}_2$	هیدروژن
0.284	1.57	98	88.8	373.7	34.082	$\text{H}_2\text{S}$	سولفید هیدروژن
					200.610	Hg	جیوه
0.290	1.59	99	45.8	190.7	16.043	$\text{CH}_4$	متان
0.251	1.81	113	58.0	317.71	34.035	$\text{CH}_3\text{F}$	فلورید متیل
0.308	0.668	41.7	26.86	44.39	20.183	Ne	نئون
0.256	0.929	58	65.0	179.2	30.008	NO	اکسید نیتریک

 $^\dagger - (1 \text{ cm}^3/\text{g mol} = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg mol})$

جدول A-۵ (ادامه) ثابتهای بحرانی

ماده	علامت	$M$	$T_c$ K	$p_c$ atm	$v_c$ $\frac{\text{ft}^3/\text{mol}}{\text{lbm mol}} \quad \frac{\text{cm}^3/\text{mol}^\dagger}{\text{g mol}^\dagger}$	$z_c$
نیتروژن	$\text{N}_2$	28.016	126.2	33.54	0.144 90	0.291
اکتان	$\text{C}_8\text{H}_{18}$	114.232	569.4	24.64	7.77 486	0.256
اکسیژن	$\text{O}_2$	32.000	154.78	50.14	1.19 74	0.292
$n$ -پنتان	$\text{C}_5\text{H}_{12}$	72.151	469.78	33.31	4.98 311	0.269
ایزوپنتان	$\text{C}_5\text{H}_{12}$	72.151	461.0	32.92	4.93 308	0.268
پروپان	$\text{C}_3\text{H}_8$	44.097	370.01	42.1	3.20 200	0.277
پروپیلن	$\text{C}_3\text{H}_6$	42.081	365.1	45.40	2.90 181	0.274
دی اکسید گوگرد	$\text{SO}_2$	64.066	430.7	77.8	1.95 122	0.269
آب	$\text{H}_2\text{O}$	18.016	647.27	218.167	0.897 56	0.230
زنون	$\text{Xe}$	131.300	289.81	58.0	1.90 118.8	0.290

$^\dagger - (1 \text{ cm}^3/\text{g mol} = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg mol})$

جدول A-۶: انتالی تشکیل، تابع گیبس تشکیل و آنتروپی مطلق در ۲۵°C (۷۷°F) و ۱ atm

ماده	فرمول	وزن مولکولی	$\bar{h}_f^\circ$		$\bar{g}_f^\circ$		$s^\circ$
			Btu/lbm.mol	kJ/kg.mol	Btu/lbm.mol	kJ/kg.mol	
کربن (جامد)	C(s)	12.01	0	0	0	0	5.74
کربن (گاز)	C(g)	12.01	+309.60	+289520	+672980	37.76	157.99
هیدروژن	H <sub>2</sub> (g)	2.018	0	0	0	31.21	130.57
اکسیژن	O <sub>2</sub> (g)	32.00	0	0	0	49.00	205.03
مونو اکسید کربن	CO(g)	28.01	-475.40	-59010	-137150	47.21	197.56
دی اکسید کربن	CO <sub>2</sub> (g)	44.01	-169300	-393520	-394360	51.07	213.64
آب (گاز)	H <sub>2</sub> O(g)	18.02	-104040	-98350	-228590	45.11	188.72
آب (مایع)	H <sub>2</sub> O(l)	18.02	-122970	-285830	-237180	16.71	69.92
پرواکسید هیدروژن	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g)	34.02	-58640	-136310	-105600	55.60	232.63
آمونیاک	NH <sub>3</sub> (g)	17.04	-19750	-46190	-16590	45.97	192.33
متان	CH <sub>4</sub> (g)	16.04	-32210	-74850	-50790	44.49	186.16
استیلن	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (g)	26.04	+97540	+226730	+209170	48.00	200.85
اتیلن	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (g)	28.05	+22490	+52280	+68120	52.54	219.83
اتان	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)	30.07	-36420	-84680	-32890	54.85	229.49
پروپیلن	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (g)	42.08	+8790	+20410	+62720	63.80	266.94
پروپان	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (g)	44.09	-44680	-103850	-23490	64.51	269.91
n-پنتان	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (g)	58.12	-54270	-126150	-15710	74.11	310.12
n-پنتان	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (g)	72.15	-63000	-146440	-8360	83.34	348.69
n-هگزان	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (g)	86.17	-71930	-167200	-293	92.83	388.40
n-هپتان	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> (g)	100.20	-80800	-187820	-8110	102.24	427.77
n-اکتان	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (g)	114.22	-89680	-208450	+16530	111.55	466.73
پنتن	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (g)	78.11	+35680	+82930	+129660	64.34	269.20
اکنل جلیک	CH <sub>3</sub> OH(g)	32.05	-86540	-200670	-162000	57.29	239.70
اکنل اتیلک	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH(g)	46.07	-101230	-235310	-168570	67.54	282.59
دی اکسید گوگرد	SO <sub>2</sub> (g)	64.07	-127730	-296910	-300370	59.40	248.53

جدول ۷-۸ خواص آب: جدول دمایی اشباع (آحاد انگلیسی)

در بر حسب  $h \cdot 10^{-6} [ft^3/lbm]$ ، در بر حسب  $[Btu/lbm \cdot R]$

دما $T_f$ °F	تغییر $P_f$ psia	حجم مخصوص			انرژی داخلی		انتالپی		آنترالپی		دما $T_g$ °F
		مایع اشباع $v_f$	بخار اشباع $v_g$	بخار اشباع $v_{fg}$	مایع اشباع $u_f$	بخار اشباع $u_g$	مایع اشباع $h_f$	بخار اشباع $h_g$	مایع اشباع $s_f$	بخار اشباع $s_g$	
32	0.0886	0.016 02	3305		-0.01	1021.2	-0.01	1075.4	-0.000 03	2.1870	32
35	0.0999	0.016 02	2948		2.99	1022.9	3.00	1076.7	0.006 07	2.1704	35
40	0.1217	0.016 02	2445		8.02	1023.2	8.02	1078.9	0.016 17	2.1430	40
45	0.1475	0.016 02	2037		13.04	1025.5	13.04	1081.1	0.026 18	2.1162	45
50	0.1780	0.016 02	1704		18.06	1027.2	18.06	1083.3	0.036 07	2.0899	50
55	0.2140	0.016 03	1431		23.07	1028.8	23.07	1085.5	0.045 86	2.0641	55
60	0.2563	0.016 04	1207		28.08	1030.4	28.08	1087.7	0.055 55	2.0388	60
65	0.3057	0.016 04	1022		33.09	1032.1	33.09	1089.9	0.065 14	2.0140	65
70	0.3632	0.016 05	867.7		38.09	1033.7	38.09	1092.0	0.074 63	1.9896	70
75	0.4300	0.016 06	739.7		43.09	1035.4	43.09	1094.2	0.084 02	1.9657	75
80	0.5073	0.016 07	632.8		48.08	1037.0	48.09	1096.4	0.093 32	1.9423	80
85	0.5964	0.016 09	543.1		53.08	1038.6	53.08	1098.6	0.1025	1.9193	85
90	0.6988	0.016 10	467.7		58.07	1040.2	58.07	1100.7	0.1117	1.8966	90
95	0.8162	0.016 11	404.0		63.06	1041.9	63.06	1102.9	0.1207	1.8744	95
100	0.9503	0.016 13	350.0		68.04	1043.5	68.05	1105.0	0.1296	1.8526	100
110	1.276	0.016 17	265.1		78.02	1046.7	78.02	1109.3	0.1473	1.8101	110
120	1.695	0.016 21	203.0		87.99	1049.9	88.00	1113.5	0.1647	1.7690	120
130	2.225	0.016 25	157.2		97.97	1053.0	97.98	1117.8	0.1817	1.7292	130
140	2.892	0.016 29	122.9		107.95	1056.2	107.96	1121.9	0.1985	1.6907	140
150	3.722	0.016 34	97.0		117.95	1059.3	117.96	1126.1	0.2150	1.6533	150
160	4.745	0.016 40	77.2		127.94	1062.3	127.96	1130.1	0.2313	1.6171	160
170	5.996	0.016 45	62.0		137.95	1065.4	137.97	1134.2	0.2473	1.5819	170
180	7.515	0.016 51	50.2		147.97	1068.5	147.99	1138.2	0.2631	1.5478	180
190	9.343	0.016 57	41.0		158.00	1071.3	158.03	1142.1	0.2787	1.5146	190
200	11.529	0.016 63	33.6		168.04	1074.2	168.07	1145.9	0.2940	1.4822	200
210	14.13	0.016 70	27.82		178.1	1077.0	178.1	1149.7	0.3091	1.4508	210
212	14.70	0.016 72	26.80		180.1	1077.6	180.2	1150.5	0.3121	1.4446	212
220	17.19	0.016 77	23.15		188.2	1079.8	188.2	1153.5	0.3241	1.4201	220
230	20.78	0.016 85	19.39		198.3	1082.6	198.3	1157.1	0.3388	1.4001	230
240	24.97	0.016 92	16.33		208.4	1085.3	208.4	1160.9	0.3514	1.3849	240
250	29.82	0.017 00	13.83		218.5	1087.9	218.6	1164.2	0.3677	1.3724	250
260	35.42	0.017 08	11.77		228.6	1090.5	228.8	1167.6	0.3819	1.3644	260
270	41.85	0.017 17	10.07		238.8	1093.0	239.0	1170.9	0.3960	1.3571	270
280	49.18	0.017 26	8.65		249.0	1095.4	249.2	1174.1	0.4099	1.3504	280
290	57.53	0.017 35	7.47		259.3	1097.7	259.4	1177.2	0.4236	1.3241	290

جدول A-7 (ادامه)  
در حسب [h/m]، h و در حسب [Bruth/m]، و در حسب [Bruth/m]

دما $T_1$ °C	فشار $P_1$ مجم	حجم مخصوص			انرژی داخلی		آنتروپی		دما $T_2$ °C		
		مائع اشباع $v_f$	بخار اشباع $v_g$	مائع اشباع $v_{fg}$	مائع اشباع $h_f$	تبخیر $h_{fg}$	مائع اشباع $h_g$	مائع اشباع $s_f$		تبخیر $s_{fg}$	بخار اشباع $s_g$
300	66.98	0.017 45	6.472	269.5	1180.0	269.7	910.4	0.4172	1.1984	1.6356	300
310	77.64	0.017 55	5.632	279.8	1102.1	280.1	903.0	0.4507	1.1731	1.6236	310
320	89.60	0.017 65	4.919	290.1	1104.2	290.4	895.3	0.4640	1.1483	1.6123	320
330	103.00	0.017 76	4.312	300.5	1106.2	300.8	887.5	0.4772	1.1238	1.6010	330
340	117.93	0.017 87	3.792	310.9	1108.0	311.3	879.5	0.4903	1.0997	1.5901	340
350	134.53	0.017 99	3.346	321.4	1109.8	321.8	871.3	0.5033	1.0760	1.5793	350
360	152.92	0.018 11	2.961	331.8	1111.4	332.4	862.9	0.5162	1.0526	1.5688	360
370	173.23	0.018 23	2.628	342.4	1112.9	343.0	854.2	0.5289	1.0295	1.5585	370
380	195.60	0.018 36	2.339	353.0	1114.3	353.6	845.4	0.5416	1.0067	1.5483	380
390	220.2	0.018 50	2.087	363.6	1115.6	364.3	836.2	0.5542	0.9841	1.5383	390
400	247.1	0.018 64	1.866	374.3	1116.6	375.1	826.8	0.5667	0.9617	1.5284	400
410	276.5	0.018 78	1.673	385.0	1117.6	386.0	817.2	0.5792	0.9395	1.5187	410
420	308.5	0.018 94	1.502	395.8	1118.3	396.9	807.2	0.5915	0.9175	1.5091	420
430	343.3	0.019 09	1.352	406.7	1118.9	407.9	796.9	0.6038	0.8957	1.4995	430
440	381.2	0.019 26	1.219	417.6	1119.3	419.0	786.3	0.6161	0.8740	1.4900	440
450	422.1	0.019 43	1.101	428.6	1119.5	430.2	775.4	0.6282	0.8523	1.4806	450
460	466.3	0.019 61	0.996	439.7	1119.6	441.4	764.4	0.6404	0.8308	1.4712	460
470	514.1	0.019 80	0.902	450.9	1119.4	452.8	752.4	0.6525	0.8093	1.4618	470
480	565.5	0.020 00	0.818	462.2	1118.9	464.3	740.3	0.6646	0.7878	1.4524	480
490	620.7	0.020 21	0.743	473.6	1118.3	475.9	727.8	0.6767	0.7663	1.4430	490
500	680.0	0.020 43	0.676	485.1	1117.4	487.7	714.8	0.6888	0.7448	1.4335	500
520	811.4	0.020 91	0.560	508.5	1114.8	511.7	687.3	0.7190	0.7015	1.4145	520
540	961.5	0.021 45	0.465	532.6	1111.0	536.4	657.5	0.7374	0.6576	1.3959	540
560	1131.8	0.022 07	0.387	558.4	1105.8	562.0	625.0	0.7620	0.6129	1.3749	560
580	1324.3	0.022 78	0.322	583.1	1098.9	588.6	589.3	0.7872	0.5668	1.3540	580
600	1541.0	0.023 63	0.267	609.9	1090.0	616.7	549.7	0.8130	0.5187	1.3317	600
620	1784.4	0.024 65	0.220	638.3	1078.5	646.4	505.0	0.8398	0.4677	1.3075	620
640	2057.1	0.025 93	0.180	668.7	1063.2	678.6	453.4	0.8681	0.4122	1.2813	640
660	2362	0.027 67	0.144	702.3	1042.3	714.4	391.1	0.8990	0.3493	1.2483	660
680	2705	0.030 32	0.111	741.7	1011.0	756.9	309.8	0.9350	0.2718	1.2068	680
700	3090	0.036 66	0.074	801.7	947.7	822.7	167.5	0.9902	0.1444	1.1146	700
705.4	3204	0.050 53	0.050	872.6	872.6	902.5	0	1.0580	0	1.0580	705.4

Source: Abridged from Keenan, J. H., F. G. Keyes, P. G. Hill, and J. G. Moore: "Steam Tables," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969



جدول A-۷M خواص آب: جدول دمای اشباع (آحاد SI)  
 $\nu$  بر حسب  $[cm^3/g]$ ،  $h$  و  $u$  بر حسب  $[kJ/Kg]$ ،  $s$  بر حسب  $[kJ/Kg]$ ،  $p$  بر حسب  $[bars]$

دما $T$ , $^{\circ}C$	فشار $p$ , bars	حجم مخصوص		انرژی داخلی		انثالپی			آنترپی	
		مایع اشباع $v_f$	بخار اشباع $v_g$	مایع اشباع $u_f$	بخار اشباع $u_g$	مایع اشباع $h_f$	تبخیر $h_{fg}$	بخار اشباع $h_g$	مایع اشباع $s_f$	بخار اشباع $s_g$
0	0.006 11	1.0002	206 278	-0.03	2375.4	-0.02	2501.4	2501.3	-0.0001	9.1565
5	0.008 72	1.0001	147 120	20.97	2382.1	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	9.0257
10	0.012 28	1.0004	106 379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008
15	0.017 05	1.0009	77 926	62.99	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.7814
20	0.023 39	1.0018	57 791	83.95	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.6672
25	0.031 69	1.0029	43 360	104.88	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.5580
30	0.042 46	1.0043	32 894	125.78	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.4533
35	0.056 28	1.0060	25 216	146.67	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	8.3531
40	0.073 84	1.0078	19 523	167.56	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	8.2570
45	0.095 93	1.0099	15 258	188.44	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	8.1648
50	0.1235	1.0121	12 032	209.32	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	8.0763
55	0.1576	1.0146	9568	230.21	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.9913
60	0.1994	1.0172	7671	251.11	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.9096
65	0.2503	1.0199	6197	272.02	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	7.8310
70	0.3119	1.0228	5042	292.95	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	7.7553
75	0.3858	1.0259	4131	313.90	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	7.6824
80	0.4739	1.0291	3407	334.86	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	7.6122
85	0.5783	1.0325	2828	355.84	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	7.5445
90	0.7014	1.0360	2361	376.85	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	7.4791
95	0.8455	1.0397	1982	397.88	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	7.4159
100	1.014	1.0435	1673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549
110	1.433	1.0516	1210	461.14	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	7.2387
120	1.985	1.0603	891.9	503.50	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	7.1296
130	2.701	1.0697	668.5	546.02	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	7.0269
140	3.613	1.0797	508.9	588.74	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	6.9299
150	4.758	1.0905	392.8	631.68	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	6.8379
160	6.178	1.1020	307.1	674.86	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	6.7502
170	7.917	1.1143	242.8	718.33	2576.5	719.21	2049.8	2768.7	2.0419	6.6663
180	10.02	1.1274	194.1	762.09	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	6.5857
190	12.54	1.1414	156.5	806.19	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	6.5079
200	15.54	1.1565	127.4	850.65	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	6.4323
210	19.06	1.1726	104.4	895.53	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	6.3585
220	23.18	1.1900	86.19	940.87	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	6.2861
230	27.95	1.2088	71.58	986.74	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	6.2146
240	33.44	1.2291	59.76	1033.2	2604.0	1037.3	1766.5	2803.8	2.7015	6.1437
250	39.73	1.2512	50.13	1080.4	2602.4	1085.4	1716.2	2801.5	2.7927	6.0730
260	46.88	1.2755	42.21	1128.4	2599.0	1134.4	1662.5	2796.9	2.8838	6.0019
270	54.99	1.3023	35.64	1177.4	2593.7	1184.5	1605.2	2789.7	2.9751	5.9301
280	64.12	1.3321	30.17	1227.5	2586.1	1236.0	1543.6	2779.6	3.0668	5.8571
290	74.36	1.3656	25.57	1278.9	2576.0	1289.1	1477.1	2766.2	3.1594	5.7821
300	85.81	1.4036	21.67	1332.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	5.7045
320	112.7	1.4988	15.49	1444.6	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	5.5362
340	145.9	1.6379	10.80	1570.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	5.3357
360	186.5	1.8925	6.945	1752.2	2351.1	1760.5	720.5	2481.0	3.9147	5.0526
374.14	220.9	3.155	3.155	2029.6	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	4.4298

Source: Abridged from Keenan, J. H., F. G. Keyes, P. G. Hill, and J. G. Moore. "Steam Tables." John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969.

جدول A-8: خواص آب: جدول فشار اشباع (آحاد انگلیسی)  
 درجه سانتیگراد [°C]، بار مطلق [Bart]، و درجه سانتیگراد [°C]

فشار مطلق $P_{\text{abs}}$ مطابق	دما $T$ °C	مائع اشباع $v_f$	حجم مخصوص بخار اشباع $v_g$	انرژی داخلی مائع اشباع $u_f$	بخار اشباع $u_g$	انرژی داخلی بخار اشباع $u_{fg}$	انرژی داخلی بخار اشباع $h_f$	بخار اشباع $h_g$	انرژی داخلی بخار اشباع $h_{fg}$	آنتروپی بخار اشباع $s_g$	فشار اشباع $P_{\text{sat}}$
0.4	72.84	0.016 06	792.0	40.94	1034.7	40.94	1052.3	1093.3	0.0800	1.9760	2.0359
0.6	85.19	0.016 09	540.0	53.26	1038.7	53.27	1045.4	1098.6	0.1079	1.9184	2.0213
0.8	94.35	0.016 11	411.7	62.41	1041.7	62.41	1040.2	1102.6	0.1195	1.8773	1.9968
1.0	101.70	0.016 14	333.6	69.74	1044.0	69.74	1036.0	1105.8	0.1327	1.8453	1.9779
1.2	107.88	0.016 16	280.9	75.90	1046.0	75.90	1033.5	1108.4	0.1436	1.8190	1.9626
1.5	115.65	0.016 19	227.7	83.65	1048.5	83.65	1028.0	1111.7	0.1571	1.7867	1.9418
2.0	126.04	0.016 23	173.75	94.02	1051.8	94.02	1022.1	1116.1	0.1750	1.7448	1.9198
3.0	141.43	0.016 30	118.72	109.38	1056.6	109.39	1013.1	1122.5	0.2009	1.6852	1.8661
4.0	152.93	0.016 36	90.64	120.88	1060.2	120.89	1006.4	1127.3	0.2198	1.6426	1.8424
5.0	162.21	0.016 41	73.53	130.15	1063.0	130.17	1000.9	1131.0	0.2349	1.6093	1.8441
6.0	170.03	0.016 45	61.98	137.98	1065.4	138.00	996.2	1134.2	0.2474	1.5819	1.8292
7.0	176.82	0.016 49	53.65	144.78	1067.4	144.80	992.1	1136.9	0.2581	1.5585	1.8167
8.0	182.84	0.016 53	47.35	150.81	1069.2	150.84	988.4	1139.3	0.2675	1.5383	1.8058
9.0	188.26	0.016 56	42.41	156.25	1070.8	156.27	985.1	1141.4	0.2760	1.5203	1.7963
10	193.19	0.016 59	38.42	161.20	1072.2	161.23	982.1	1143.3	0.2836	1.5041	1.7877
14.696	211.99	0.016 72	26.80	180.10	1077.6	180.15	970.4	1150.5	0.3121	1.4446	1.7567
15	213.03	0.016 72	26.29	181.14	1077.9	181.19	969.7	1150.9	0.3137	1.4414	1.7551
20	227.96	0.016 83	20.09	196.19	1082.0	196.26	960.1	1156.4	0.3358	1.3962	1.7330
25	240.08	0.016 92	16.31	208.44	1085.3	208.52	952.2	1160.7	0.3535	1.3607	1.7142
30	250.34	0.017 00	13.75	218.84	1088.0	218.93	945.4	1164.3	0.3682	1.3314	1.6996
35	259.30	0.017 08	11.90	227.93	1090.3	228.04	939.3	1167.4	0.3809	1.3064	1.6873
40	267.26	0.017 15	10.50	236.16	1092.3	236.16	933.8	1170.0	0.3921	1.2845	1.6767
45	274.46	0.017 21	9.40	243.37	1094.0	243.51	928.8	1172.3	0.4022	1.2651	1.6673
50	281.03	0.017 27	8.52	250.08	1095.6	250.24	924.2	1174.4	0.4113	1.2476	1.6589
55	287.10	0.017 33	7.79	256.28	1097.0	256.46	919.9	1176.3	0.4196	1.2317	1.6513
60	292.73	0.017 38	7.177	262.1	1098.3	262.2	915.8	1178.0	0.4273	1.2170	1.6443
65	298.00	0.017 43	6.647	267.5	1099.5	267.7	911.9	1179.6	0.4345	1.2035	1.6380
70	302.96	0.017 48	6.209	272.6	1100.6	272.8	908.3	1181.0	0.4412	1.1909	1.6321
75	307.63	0.017 52	5.818	277.4	1101.6	277.6	904.8	1182.4	0.4475	1.1790	1.6265
80	312.07	0.017 57	5.474	282.0	1102.6	282.2	901.4	1183.6	0.4534	1.1679	1.6213
85	316.29	0.017 61	5.170	286.3	1103.5	286.6	898.2	1184.8	0.4591	1.1574	1.6165
90	320.31	0.017 66	4.898	290.5	1104.3	290.8	895.1	1185.9	0.4644	1.1475	1.6119
95	324.16	0.017 70	4.654	294.5	1105.0	294.8	892.1	1186.9	0.4695	1.1380	1.6075
100	327.86	0.017 74	4.434	298.3	1105.8	298.6	889.2	1187.8	0.4744	1.1290	1.6034
110	334.82	0.017 81	4.051	305.5	1107.1	305.9	883.7	1189.6	0.4836	1.1122	1.5958

120	341.30	0.017 89	3.720	312.3	1108.3	312.7	878.5	1191.1	0.4920	1.0966	1.5886	120
140	347.37	0.017 96	3.475	318.6	1109.4	319.0	871.5	1192.5	0.4999	1.0822	1.5821	130
160	353.08	0.018 02	3.221	324.6	1110.3	325.1	868.7	1193.8	0.5073	1.0688	1.5761	140
180	358.48	0.018 09	3.016	330.2	1111.2	330.8	864.2	1194.9	0.5142	1.0562	1.5704	150
200	363.60	0.018 15	2.836	335.6	1112.0	336.2	859.8	1196.0	0.5208	1.0443	1.5651	160
170	368.47	0.018 21	2.676	340.8	1112.7	341.3	855.6	1196.9	0.5270	1.0330	1.5600	170
180	373.13	0.018 27	2.533	345.7	1113.4	346.3	851.5	1197.8	0.5329	1.0223	1.5552	180
190	377.59	0.018 33	2.405	350.4	1114.0	351.0	847.5	1198.6	0.5386	1.0122	1.5508	190
200	381.86	0.018 39	2.289	354.9	1114.6	355.6	843.7	1199.3	0.5440	1.0025	1.5465	200
250	401.04	0.018 65	1.845	375.4	1116.7	376.2	825.8	1202.1	0.5680	0.9594	1.5274	250
300	417.43	0.018 90	1.544	393.0	1118.2	394.1	809.8	1203.9	0.5883	0.9232	1.5115	300
350	431.82	0.019 12	1.327	408.7	1119.0	409.9	795.0	1204.9	0.6060	0.8917	1.4977	350
400	444.70	0.019 34	1.162	422.8	1119.5	424.2	781.2	1205.8	0.6218	0.8638	1.4856	400
450	456.39	0.019 55	1.033	435.7	1119.6	437.4	768.2	1205.6	0.6360	0.8385	1.4745	450
500	467.13	0.019 75	0.928	447.7	1119.4	449.5	755.8	1205.3	0.6490	0.8154	1.4644	500
550	477.07	0.019 94	0.842	458.9	1119.1	460.9	741.9	1204.8	0.6611	0.7941	1.4551	550
600	486.33	0.020 13	0.770	469.4	1118.6	471.7	732.4	1204.1	0.6723	0.7742	1.4464	600
700	503.23	0.020 51	0.656	488.9	1117.0	491.5	710.5	1202.0	0.6927	0.7378	1.4305	700
800	518.36	0.020 87	0.569	506.6	1115.0	509.7	689.6	1199.3	0.7110	0.7050	1.4160	800
900	532.12	0.021 23	0.501	523.0	1112.6	526.6	669.5	1196.0	0.7277	0.6750	1.4027	900
1000	544.75	0.021 59	0.446	538.4	1109.9	542.4	650.0	1192.4	0.7432	0.6471	1.3903	1000
1100	556.45	0.021 95	0.401	552.9	1106.8	557.4	631.0	1188.3	0.7576	0.6209	1.3790	1100
1200	567.37	0.022 32	0.362	566.7	1103.5	571.7	612.3	1183.9	0.7712	0.5961	1.3675	1200
1300	577.60	0.022 69	0.330	579.9	1099.8	585.4	593.8	1179.2	0.7841	0.5724	1.3565	1300
1400	587.25	0.023 07	0.302	592.7	1096.0	598.6	575.5	1174.1	0.7964	0.5497	1.3461	1400
1500	596.39	0.023 46	0.277	605.0	1091.8	611.5	557.2	1168.7	0.8082	0.5276	1.3359	1500
1600	605.06	0.023 86	0.255	616.9	1087.4	624.0	538.9	1162.9	0.8196	0.5062	1.3258	1600
1700	613.32	0.024 28	0.236	628.6	1082.7	636.2	520.6	1156.9	0.8307	0.4852	1.3159	1700
1800	621.21	0.024 72	0.218	640.0	1077.7	648.3	502.1	1150.4	0.8414	0.4645	1.3060	1800
1900	628.76	0.025 17	0.203	651.3	1072.3	660.1	483.4	1143.5	0.8519	0.4441	1.2961	1900
2000	636.00	0.025 65	0.188	662.4	1066.6	671.9	464.4	1136.3	0.8623	0.4238	1.2861	2000
2250	652.90	0.026 98	0.157	689.9	1050.6	701.1	414.8	1115.9	0.8876	0.3728	1.2604	2250
2500	668.31	0.028 60	0.131	717.7	1031.0	730.9	360.5	1091.4	0.9131	0.3196	1.2327	2500
2750	682.46	0.030 77	0.107	747.3	1005.9	763.0	297.4	1060.4	0.9401	0.2604	1.2005	2750
3000	695.52	0.034 31	0.084	783.4	968.8	802.5	213.0	1015.5	0.9732	0.1843	1.1575	3000
3203.6	705.44	0.030 53	0.0903	872.6	872.6	902.5	0	902.5	1.0580	0	1.0580	3203.6

Source: Abridged from Keenan, J. H., F. G. Keyes, P. G. Hill, and L. G. Moore, "Steam Tables," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969.

جدول A-M خواص آب: جدول فشار اشباع (آحاد SI)  
 $\nu$  بر حسب  $[cm^3/g]$ ،  $h$  و  $u$  بر حسب  $[kJ/kg]$ ،  $s$  بر حسب  $[kJ/kg \cdot K]$ ،  $p$  بر حسب  $[bars]$

فشار $p$ , bars	دما $T$ , °C	حجم مخصوص		انرژی داخلی		انتالپی			آنتروپی	
		مایع اشباع $v_f$	بخار اشباع $v_g$	مایع اشباع $u_f$	بخار اشباع $u_g$	مایع اشباع $h_f$	تبخیر $h_{fg}$	بخار اشباع $h_g$	مایع اشباع $s_f$	بخار اشباع $s_g$
0.040	28.96	1.0040	34.800	121.45	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746
0.060	36.16	1.0064	23.729	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304
0.080	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2403.1	2577.0	0.5926	8.2287
0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	8.1502
0.20	60.06	1.0172	7649.	251.38	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.9085
0.30	69.10	1.0223	5229.	289.20	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	7.7686
0.40	75.87	1.0265	3993.	317.53	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	7.6700
0.50	81.33	1.0300	3240.	340.44	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	7.5939
0.60	85.94	1.0331	2732.	359.79	2489.6	359.86	2293.6	2653.5	1.1453	7.5320
0.70	89.95	1.0360	2365.	376.63	2494.5	376.70	2283.3	2660.0	1.1919	7.4797
0.80	93.50	1.0380	2087.	391.58	2498.8	391.66	2274.1	2665.8	1.2329	7.4346
0.90	96.71	1.0410	1869.	405.06	2502.6	405.15	2265.7	2670.9	1.2695	7.3949
1.00	99.63	1.0432	1694.	417.36	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	7.3594
1.50	111.4	1.0528	1159.	466.94	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	7.2233
2.00	120.2	1.0605	885.7	504.49	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	7.1271
2.50	127.4	1.0672	718.7	535.10	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	7.0527
3.00	133.6	1.0732	605.8	561.15	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	6.9919
3.50	138.9	1.0786	524.1	583.95	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	6.9405
4.00	143.6	1.0836	462.5	604.31	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	6.8959
4.50	147.9	1.0882	414.0	622.77	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	6.8565
5.00	151.9	1.0926	374.9	639.68	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	6.8213
6.00	158.9	1.1006	315.7	669.90	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	6.7600
7.00	165.0	1.1080	272.9	696.44	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	6.7080
8.00	170.4	1.1148	240.4	720.22	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	6.6628
9.00	175.4	1.1212	215.0	741.83	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	6.6226
10.0	179.9	1.1273	194.4	761.68	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	6.5863
15.0	198.3	1.1539	131.8	843.16	2594.5	844.89	1947.3	2792.2	2.3150	6.4448
20.0	212.4	1.1767	99.63	906.44	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	6.3409
25.0	224.0	1.1973	79.98	959.11	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	6.2575
30.0	233.9	1.2165	66.68	1004.8	2604.1	1008.4	1795.7	2804.2	2.6457	6.1869
35.0	242.6	1.2347	57.07	1045.4	2603.7	1049.8	1753.7	2803.4	2.7253	6.1253
40.0	250.4	1.2522	49.78	1082.1	2602.3	1087.3	1714.1	2801.4	2.7964	6.0701
45.0	257.5	1.2692	44.06	1116.2	2600.1	1121.9	1676.4	2798.3	2.8610	6.0199
50.0	264.0	1.2859	39.44	1147.8	2597.1	1154.2	1640.1	2794.3	2.9202	5.9734
60.0	275.6	1.3187	32.44	1205.4	2589.7	1213.4	1571.0	2784.3	3.0267	5.8892
70.0	285.9	1.3513	27.37	1257.6	2580.5	1267.0	1505.1	2772.1	3.1211	5.8133
80.0	295.1	1.3842	23.52	1305.6	2569.8	1316.6	1441.3	2758.0	3.2068	5.7432
90.0	303.4	1.4178	20.48	1350.5	2557.8	1363.3	1378.9	2742.1	3.2858	5.6772
100.0	311.1	1.4524	18.03	1393.0	2544.4	1407.6	1317.1	2724.7	3.3596	5.6141
110.0	318.2	1.4886	15.99	1433.7	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4293	5.5527
120.0	324.8	1.5267	14.26	1473.0	2513.7	1491.3	1193.6	2684.9	3.4962	5.4924
130.0	330.9	1.5671	12.78	1511.1	2496.1	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	5.4323
140.0	336.8	1.6107	11.49	1548.6	2476.8	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	5.3717
150.0	342.2	1.6581	10.34	1585.6	2455.5	1610.5	1000.0	2610.5	3.6848	5.3098
160.0	347.4	1.7107	9.306	1622.7	2431.7	1650.1	936.6	2580.6	3.7461	5.2455
170.0	352.4	1.7702	8.364	1660.2	2405.0	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	5.1777
180.0	357.1	1.8397	7.489	1698.9	2374.3	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	5.1044
190.0	361.5	1.9241	6.657	1739.9	2338.1	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	5.0228
200.0	365.8	2.036	5.834	1785.6	2293.0	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	4.9269
220.9	374.1	3.155	3.155	2029.6	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	4.4298

Source: Abrdged from Keenan, J. H., F. G. Keyes, P. G. Hill, and J. G. Moore, "Steam Tables," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969.

جدول ۹-۸ خواص آب: بخار داغ (آحاد انگلیسی)  
 $v$  بر حسب  $[ft^3/lbm]$ ،  $h$  و  $u$  بر حسب  $[Btu/lbm]$ ،  $s$  بر حسب  $[Btu/lbm \cdot ^\circ R]$

دما °F	$v$	$u$	$h$	$s$	$v$	$u$	$h$	$s$
	1 psia (101.7°F)				5 psia (162.2°F)			
Sat.	333.6	1044.0	1105.8	1.9779	73.53	1063.0	1131.0	1.8441
150	362.6	1060.4	1127.5	2.0151				
200	392.5	1077.5	1150.1	2.0508	78.15	1076.0	1148.6	1.8715
250	422.4	1094.7	1172.8	2.0839	84.21	1093.8	1171.7	1.9052
300	452.3	1112.0	1195.7	2.1150	90.24	1111.3	1194.8	1.9367
400	511.9	1147.0	1241.8	2.1720	102.24	1146.6	1241.2	1.9941
500	571.5	1182.8	1288.5	2.2235	114.20	1182.5	1288.2	2.0458
600	631.1	1219.3	1336.1	2.2706	126.15	1219.1	1335.8	2.0930
700	690.7	1256.7	1384.5	2.3142	138.08	1256.5	1384.3	2.1367
800	750.3	1294.4	1433.7	2.3550	150.01	1294.7	1433.5	2.1775
900	809.9	1333.9	1483.8	2.3932	161.94	1333.8	1483.7	2.2158
1000	869.5	1373.9	1534.8	2.4294	173.86	1373.9	1534.7	2.2520
	10 psia (193.2°F)				14.7 psia (212.0°F)			
Sat.	38.42	1072.2	1143.3	1.7877	26.80	1077.6	1150.5	1.7567
200	38.85	1074.7	1146.6	1.7927				
250	41.95	1092.6	1170.2	1.8272	28.42	1091.5	1168.8	1.7832
300	44.99	1110.4	1193.7	1.8592	30.52	1109.6	1192.6	1.8157
400	51.03	1146.1	1240.5	1.9171	34.67	1145.6	1239.9	1.8741
500	57.04	1182.2	1287.7	1.9690	38.77	1181.8	1287.3	1.9263
600	63.03	1218.9	1335.5	2.0164	42.86	1218.6	1335.2	1.9737
700	69.01	1256.3	1384.0	2.0601	46.93	1256.1	1383.8	2.0175
800	74.98	1294.6	1433.3	2.1009	51.00	1294.4	1433.1	2.0584
900	80.95	1333.7	1483.5	2.1393	55.07	1333.6	1483.4	2.0967
1000	86.91	1373.8	1534.6	2.1755	59.13	1373.7	1534.5	2.1330
1100	92.88	1414.7	1586.6	2.2099	63.19	1414.6	1586.4	2.1674
	20 psia (228.0°F)				40 psia (267.3°F)			
Sat.	20.09	1082.0	1156.4	1.7320	10.50	1093.3	1170.0	1.6767
250	20.79	1090.3	1167.2	1.7475				
300	22.36	1108.7	1191.5	1.7805	11.04	1105.1	1186.8	1.6993
350	23.90	1126.9	1215.4	1.8110	11.84	1124.2	1211.8	1.7312
400	25.43	1145.1	1239.2	1.8395	12.62	1143.0	1236.4	1.7606
500	28.46	1181.5	1286.8	1.8919	14.16	1180.1	1284.9	1.8140
600	31.47	1218.4	1334.8	1.9395	15.69	1217.3	1333.4	1.8621
700	34.47	1255.9	1383.5	1.9834	17.20	1255.1	1382.4	1.9063
800	37.46	1294.3	1432.9	2.0243	18.70	1293.7	1432.1	1.9474
900	40.45	1333.5	1483.2	2.0627	20.20	1333.0	1482.5	1.9859
1000	43.44	1373.5	1534.3	2.0989	21.70	1373.1	1533.8	2.0223
1100	46.42	1414.5	1586.3	2.1334	23.20	1414.2	1585.9	2.0568

Source: Abridged from Kennan, J. H., F. G. Keyes, P. G. Hill, and J. G. Moore, "Steam Tables," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969.

جدول A-۱ (ادامه)

$v$  بر حسب  $[ft^3/lbm]$ ؛  $h$  و  $u$  بر حسب  $[Btu/lbm]$ ؛  $s$  بر حسب  $[Btu/lbm \cdot ^\circ R]$

دما °F	$v$	$u$	$h$	$s$	$v$	$u$	$h$	$s$
60 psia (292.7°F)					80 psia (312.1°F)			
Sat.	7.17	1098.3	1178.0	1.6444	5.47	1102.6	1183.6	1.6214
300	7.26	1101.3	1181.9	1.6496				
350	7.82	1121.4	1208.2	1.6830	5.80	1118.5	1204.3	1.6476
400	8.35	1140.8	1233.5	1.7134	6.22	1138.5	1230.6	1.6790
500	9.40	1178.6	1283.0	1.7678	7.02	1177.2	1281.1	1.7346
600	10.43	1216.3	1332.1	1.8165	7.79	1215.3	1330.7	1.7838
700	11.44	1254.4	1381.4	1.8609	8.56	1253.6	1380.3	1.8285
800	12.45	1293.0	1431.2	1.9022	9.32	1292.4	1430.4	1.8700
900	13.45	1332.5	1481.8	1.9408	10.08	1332.0	1481.2	1.9087
1000	14.45	1372.7	1533.2	1.9773	10.83	1372.3	1532.6	1.9453
1100	15.45	1413.8	1585.4	2.0119	11.58	1413.5	1584.9	1.9799
1200	16.45	1455.8	1638.5	2.0448	12.33	1455.5	1638.1	2.0130
100 psia (327.8°F)					120 psia (341.3°F)			
Sat.	4.434	1105.8	1187.8	1.6034	3.730	1108.3	1191.1	1.5886
350	4.592	1115.4	1200.4	1.6191	3.783	1112.2	1196.2	1.5950
400	4.934	1136.2	1227.5	1.6517	4.079	1133.8	1224.4	1.6288
450	5.265	1156.2	1253.6	1.6812	4.360	1154.3	1251.2	1.6590
500	5.587	1175.7	1279.1	1.7085	4.633	1174.2	1277.1	1.6868
600	6.216	1214.2	1329.3	1.7582	5.164	1213.2	1327.8	1.7371
700	6.834	1252.8	1379.2	1.8033	5.682	1252.0	1378.2	1.7825
800	7.445	1291.8	1429.6	1.8449	6.195	1291.2	1428.7	1.8243
900	8.053	1331.5	1480.5	1.8838	6.703	1330.9	1479.8	1.8633
1000	8.657	1371.9	1532.1	1.9204	7.208	1371.5	1531.5	1.9000
1100	9.260	1413.1	1584.5	1.9551	7.711	1412.8	1584.0	1.9348
1200	9.861	1455.2	1637.7	1.9882	8.213	1454.9	1637.3	1.9679
140 psia (353.1°F)					160 psia (363.6°F)			
Sat.	3.221	1110.3	1193.8	1.5761	2.836	1112.0	1196.0	1.5651
400	3.466	1131.4	1221.2	1.6088	3.007	1128.8	1217.8	1.5911
450	3.713	1152.4	1248.6	1.6399	3.228	1150.5	1246.1	1.6230
500	3.952	1172.7	1275.1	1.6682	3.440	1171.2	1273.0	1.6518
550	4.184	1192.5	1300.9	1.6945	3.646	1191.3	1299.2	1.6785
600	4.412	1212.1	1326.4	1.7191	3.848	1211.1	1325.0	1.7034
700	4.860	1251.2	1377.1	1.7648	4.243	1250.4	1376.0	1.7494
800	5.301	1290.5	1427.9	1.8068	4.631	1289.9	1427.0	1.7916
900	5.739	1330.4	1479.1	1.8459	5.015	1329.9	1478.4	1.8308
1000	6.173	1371.0	1531.0	1.8827	5.397	1370.6	1530.4	1.8677
1100	6.605	1412.4	1583.6	1.9176	5.776	1412.1	1583.1	1.9026
1200	7.036	1454.6	1636.9	1.9507	6.154	1454.3	1636.5	1.9358

جدول A-9 (داده)

$\nu$  بر حسب  $[ft^2/bm]$  ،  $h$  و  $u$  بر حسب  $[Btu/bm]$  ،  $s$  بر حسب  $[Btu/bm \cdot ^\circ R]$

دما °F	$\nu$	$u$	$h$	$s$	$\nu$	$u$	$h$	$s$
	180 psia (373.1°F)				200 psia (381.8°F)			
Sat.	2.533	1113.4	1197.8	1.5553	2.289	1114.6	1199.3	1.5464
400	2.648	1126.2	1214.4	1.5749	2.361	1123.5	1210.8	1.5600
450	2.850	1148.5	1243.4	1.6078	2.548	1146.4	1240.7	1.5938
500	3.042	1169.6	1270.9	1.6372	2.724	1168.0	1268.8	1.6239
550	3.228	1190.0	1297.5	1.6642	2.893	1188.7	1295.7	1.6512
600	3.409	1210.0	1323.5	1.6893	3.058	1208.9	1322.1	1.6767
700	3.763	1249.6	1374.9	1.7357	3.379	1248.8	1373.8	1.7234
800	4.110	1289.3	1426.2	1.7781	3.693	1288.6	1425.3	1.7660
900	4.453	1329.4	1477.7	1.8174	4.003	1328.9	1477.1	1.8055
1000	4.793	1370.2	1529.8	1.8545	4.310	1369.8	1529.3	1.8425
1100	5.131	1411.7	1582.6	1.8894	4.615	1411.4	1582.2	1.8776
1200	5.467	1454.0	1636.1	1.9227	4.918	1453.7	1635.7	1.9109
	250 psia (401.0°F)				300 psia (417.4°F)			
Sat.	1.845	1116.7	1202.1	1.5274	1.544	1118.2	1203.9	1.5115
450	2.002	1141.1	1233.7	1.5632	1.636	1135.4	1226.2	1.5365
500	2.150	1163.8	1263.3	1.5948	1.766	1159.5	1257.5	1.5701
550	2.290	1185.3	1291.3	1.6233	1.888	1181.9	1286.7	1.5997
600	2.426	1206.1	1318.3	1.6494	2.004	1203.2	1314.5	1.6266
700	2.688	1246.7	1371.1	1.6970	2.227	1244.0	1368.3	1.6751
800	2.943	1287.0	1423.2	1.7301	2.442	1285.4	1421.0	1.7187
900	3.193	1327.6	1475.3	1.7799	2.653	1326.3	1473.6	1.7589
1000	3.440	1368.7	1527.9	1.8172	2.860	1367.7	1526.5	1.7964
1100	3.685	1410.5	1581.0	1.8524	3.066	1409.6	1579.8	1.8317
1200	3.929	1453.0	1634.8	1.8858	3.270	1452.2	1633.8	1.8653
1300	4.172	1496.3	1689.3	1.9177	3.473	1495.6	1688.4	1.8973
	350 psia (431.8°F)				400 psia (444.7°F)			
Sat.	1.327	1119.0	1204.9	1.4978	1.162	1119.5	1205.5	1.4856
450	1.373	1129.2	1218.2	1.5125	1.175	1122.6	1209.6	1.4901
500	1.491	1154.9	1251.5	1.5482	1.284	1150.1	1245.2	1.5282
550	1.600	1178.3	1281.9	1.5790	1.383	1174.6	1277.0	1.5605
600	1.703	1200.3	1310.6	1.6068	1.476	1197.3	1306.6	1.5892
700	1.898	1242.5	1365.4	1.6562	1.650	1240.4	1362.5	1.6397
800	2.085	1283.8	1418.8	1.7004	1.816	1282.1	1416.6	1.6844
900	2.267	1325.0	1471.8	1.7409	1.978	1323.7	1470.1	1.7252
1000	2.446	1366.6	1525.0	1.7787	2.136	1365.5	1523.6	1.7632
1100	2.624	1408.7	1578.6	1.8142	2.292	1407.8	1577.4	1.7989
1200	2.799	1451.5	1632.8	1.8478	2.446	1450.7	1631.8	1.8327
1300	2.974	1495.0	1687.6	1.8799	2.599	1494.3	1686.8	1.8648

جدول A-9 (ادامه)

بر حسب  $v$  [ft<sup>3</sup>/lbm]،  $h$  و  $u$  بر حسب [Btu/lbm]،  $s$  بر حسب [Btu/lbm·°R]

دما	$v$	$u$	$h$	$s$	$v$	$u$	$h$	$s$
°F	450 psia (456.4°F)				500 psia (467.1°F)			
Sat.	1.033	1119.6	1205.6	1.4746	0.928	1119.4	1205.3	1.4645
500	1.123	1145.1	1238.5	1.5097	0.992	1139.7	1231.5	1.4923
550	1.215	1170.7	1271.9	1.5436	1.079	1166.7	1266.6	1.5279
600	1.300	1194.3	1302.5	1.5732	1.158	1191.1	1298.3	1.5585
700	1.458	1238.2	1359.6	1.6248	1.304	1236.0	1356.7	1.6112
800	1.608	1280.5	1414.4	1.6701	1.441	1278.8	1412.1	1.6571
900	1.752	1322.4	1468.3	1.7113	1.572	1321.0	1466.5	1.6987
1000	1.894	1364.4	1522.2	1.7495	1.701	1363.3	1520.7	1.7471
1100	2.034	1406.9	1576.3	1.7853	1.827	1406.0	1575.1	1.7731
1200	2.172	1450.0	1630.8	1.8192	1.952	1449.2	1629.8	1.8072
1300	2.308	1493.7	1685.9	1.8515	2.075	1493.1	1685.1	1.8395
1400	2.444	1538.1	1741.7	1.8823	2.198	1537.6	1741.0	1.8704
	600 psia (486.3°F)				700 psia (503.2°F)			
Sat.	0.770	1118.6	1204.1	1.4464	0.656	1117.0	1202.0	1.4305
500	0.795	1128.0	1216.2	1.4592				
550	0.875	1158.2	1255.4	1.4990	0.728	1149.0	1243.2	1.4723
600	0.946	1184.5	1289.5	1.5320	0.793	1177.5	1280.2	1.5081
700	1.073	1231.5	1350.6	1.5872	0.907	1226.9	1344.4	1.5661
800	1.190	1275.4	1407.6	1.6343	1.011	1272.0	1402.9	1.6145
900	1.302	1318.4	1462.9	1.6766	1.109	1315.6	1459.3	1.6576
1000	1.411	1361.2	1517.8	1.7155	1.204	1358.9	1514.9	1.6970
1100	1.517	1404.2	1572.7	1.7519	1.296	1402.4	1570.2	1.7337
1200	1.622	1447.7	1627.8	1.7861	1.387	1446.2	1625.8	1.7682
1300	1.726	1491.7	1683.4	1.8186	1.476	1490.4	1681.7	1.8009
1400	1.829	1536.5	1739.5	1.8497	1.565	1535.3	1738.1	1.8321
	800 psia (518.3°F)				900 psia (532.1°F)			
Sat.	0.569	1115.0	1199.3	1.4160	0.501	1112.6	1196.0	1.4027
550	0.615	1138.8	1229.9	1.4469	0.527	1127.5	1215.2	1.4219
600	0.677	1170.1	1270.4	1.4861	0.587	1162.2	1260.0	1.4652
650	0.732	1197.2	1305.6	1.5186	0.639	1191.1	1297.5	1.4999
700	0.783	1222.1	1338.0	1.5471	0.686	1217.1	1331.4	1.5297
800	0.876	1268.5	1398.2	1.5969	0.772	1264.9	1393.4	1.5810
900	0.964	1312.9	1455.6	1.6408	0.851	1310.1	1451.9	1.6257
1000	1.048	1356.7	1511.9	1.6807	0.927	1354.5	1508.9	1.6662
1100	1.130	1400.5	1567.8	1.7178	1.001	1398.7	1565.4	1.7036
1200	1.210	1444.6	1623.8	1.7526	1.073	1443.0	1621.7	1.7386
1300	1.289	1489.1	1680.0	1.7854	1.144	1487.8	1687.3	1.7717
1400	1.367	1534.2	1736.6	1.8167	1.214	1533.0	1735.1	1.8031



جدول A-۹ (ادامه)

بر حسب  $h$  ،  $u$  بر حسب  $[Btu/lbm]$  ، و بر حسب  $[Btu/lbm \cdot ^\circ R]$

دما °F	$v$	$u$	$h$	$s$	$v$	$u$	$h$	$s$
	1000 psia (544.7°F)				1200 psia (567.4°F)			
Sat.	0.446	1109.0	1192.4	1.3903	0.362	1103.5	1183.9	1.3673
600	0.514	1153.7	1248.8	1.4450	0.402	1134.4	1223.6	1.4054
650	0.564	1184.7	1289.1	1.4822	0.450	1170.9	1270.8	1.4490
700	0.608	1212.0	1324.6	1.5135	0.491	1201.3	1310.2	1.4837
800	0.688	1261.2	1388.5	1.5665	0.562	1253.7	1378.4	1.5402
900	0.761	1307.3	1448.1	1.6120	0.626	1301.5	1440.4	1.5876
1000	0.831	1352.2	1505.9	1.6530	0.685	1347.5	1499.7	1.6297
1100	0.898	1396.8	1562.9	1.6908	0.743	1393.0	1557.9	1.6682
1200	0.963	1441.5	1619.7	1.7261	0.798	1438.3	1615.5	1.7040
1300	1.027	1486.5	1676.5	1.7593	0.853	1483.8	1673.1	1.7377
1400	1.091	1531.9	1733.7	1.7909	0.906	1529.6	1730.7	1.7696
1600	1.215	1624.4	1849.3	1.8499	1.011	1622.6	1847.1	1.8290
	1400 psia (587.2°F)				1600 psia (605.1°F)			
Sat.	0.302	1096.0	1174.1	1.3461	0.255	1087.4	1162.9	1.3258
600	0.318	1110.9	1193.1	1.3641				
650	0.367	1155.5	1250.5	1.4171	0.303	1137.8	1227.4	1.3852
700	0.406	1189.6	1294.8	1.4562	0.342	1177.0	1278.1	1.4299
800	0.471	1245.8	1367.9	1.5168	0.403	1237.7	1357.0	1.4953
900	0.529	1295.6	1432.5	1.5661	0.456	1289.5	1424.4	1.5468
1000	0.582	1342.8	1493.5	1.6094	0.504	1338.0	1487.1	1.5913
1100	0.632	1389.1	1552.8	1.6487	0.549	1385.2	1547.7	1.6315
1200	0.681	1435.1	1611.4	1.6851	0.592	1431.8	1607.1	1.6684
1300	0.728	1481.1	1669.6	1.7192	0.634	1478.3	1666.1	1.7029
1400	0.774	1527.2	1727.8	1.7513	0.675	1524.9	1724.8	1.7354
1600	0.865	1620.8	1844.8	1.8111	0.755	1619.0	1842.6	1.7955
	1800 psia (621.2°F)				2000 psia (636.0°F)			
Sat.	0.218	1077.7	1150.4	1.3060	0.188	1066.6	1136.3	1.2861
650	0.251	1117.0	1200.4	1.3517	0.206	1091.1	1167.2	1.3141
700	0.291	1163.1	1259.9	1.4042	0.249	1147.7	1239.8	1.3782
750	0.322	1198.6	1305.9	1.4430	0.280	1187.3	1291.1	1.4216
800	0.350	1229.1	1345.7	1.4753	0.307	1220.1	1333.8	1.4562
900	0.399	1283.2	1416.1	1.5291	0.353	1276.8	1407.6	1.5126
1000	0.443	1333.1	1480.7	1.5749	0.395	1328.1	1474.1	1.5598
1100	0.484	1381.2	1542.5	1.6159	0.433	1377.2	1537.2	1.6017
1200	0.524	1428.5	1602.9	1.6534	0.469	1425.2	1598.6	1.6398
1300	0.561	1475.5	1662.5	1.6883	0.503	1472.7	1659.0	1.6751
1400	0.598	1522.5	1721.8	1.7211	0.537	1520.2	1718.8	1.7082
1600	0.670	1617.2	1840.4	1.7817	0.602	1615.4	1838.2	1.7692

جدول A-٦ (ادامه)

ν بر حسب  $[ft^2/lbm]$ ، h و μ بر حسب  $[Btu/lbm]$ ، و بر حسب  $[Btu/lbm \cdot ^\circ R]$

°F	$\nu$	$\mu$	$h$	$s$	$\nu$	$\mu$	$h$	$s$
2500 psia (668.3°F)					3000 psia (695.5°F)			
Sat.	0.1306	1031.0	1091.4	1.2327	0.0840	968.8	1015.5	1.1575
700	0.1684	1098.7	1176.6	1.3073	0.0977	1003.9	1058.1	1.1944
750	0.2030	1155.2	1249.1	1.3686	0.1483	1114.7	1197.1	1.3122
800	0.2291	1195.7	1301.7	1.4112	0.1757	1167.6	1265.2	1.3675
900	0.2712	1259.9	1385.4	1.4752	0.2160	1241.8	1361.7	1.4414
1000	0.3069	1315.2	1457.2	1.5262	0.2485	1301.7	1439.6	1.4967
1100	0.3393	1366.8	1523.8	1.5704	0.2772	1356.2	1510.1	1.5434
1200	0.3696	1416.7	1587.7	1.6101	0.3086	1408.0	1576.6	1.5848
1300	0.3984	1465.7	1650.0	1.6465	0.3285	1458.5	1640.9	1.6224
1400	0.4261	1514.2	1711.3	1.6804	0.3524	1508.1	1703.7	1.6571
1500	0.4531	1562.5	1772.1	1.7123	0.3754	1557.3	1765.7	1.6896
1600	0.4795	1610.8	1832.6	1.7424	0.3978	1606.3	1827.1	1.7201
3500 psia					4000 psia			
650	0.0249	663.5	679.7	0.8630	0.0245	657.7	675.8	0.8574
700	0.0306	759.5	779.3	0.9506	0.0287	742.1	763.4	0.9345
750	0.1046	1058.4	1126.1	1.2440	0.0633	960.7	1007.5	1.1395
800	0.1363	1134.7	1223.0	1.3226	0.1052	1095.0	1172.9	1.2740
900	0.1763	1222.4	1336.5	1.4096	0.1462	1201.5	1309.7	1.3789
1000	0.2066	1287.6	1421.4	1.4699	0.1752	1272.9	1402.6	1.4449
1100	0.2328	1345.2	1496.0	1.5193	0.1995	1333.9	1481.6	1.4973
1200	0.2566	1399.2	1565.3	1.5624	0.2213	1390.1	1553.9	1.5423
1300	0.2787	1451.1	1631.7	1.6012	0.2414	1443.7	1622.4	1.5823
1400	0.2997	1501.9	1696.1	1.6368	0.2603	1495.7	1688.4	1.6188
1500	0.3199	1552.0	1759.2	1.6699	0.2784	1546.7	1752.8	1.6526
1600	0.3395	1601.7	1821.6	1.7010	0.2959	1597.1	1816.1	1.6841
4400 psia					4800 psia			
650	0.0242	653.6	673.3	0.8535	0.0237	649.8	671.0	0.8499
700	0.0278	732.7	755.3	0.9257	0.0271	725.1	749.1	0.9187
750	0.0415	870.8	904.6	1.0513	0.0352	832.6	863.9	1.0154
800	0.0844	1056.5	1125.3	1.2306	0.0668	1011.2	1070.5	1.1827
900	0.1270	1183.7	1287.1	1.3548	0.1109	1164.8	1263.4	1.3310
1000	0.1552	1260.8	1387.2	1.4260	0.1385	1248.3	1317.4	1.4078
1100	0.1784	1324.7	1469.9	1.4809	0.1608	1315.3	1458.1	1.4653
1200	0.1989	1382.8	1544.7	1.5274	0.1802	1375.4	1535.4	1.5133
1300	0.2176	1437.7	1614.9	1.5685	0.1979	1431.7	1607.4	1.5555
1400	0.2352	1490.7	1682.3	1.6057	0.2143	1485.7	1676.1	1.5934
1500	0.2520	1542.7	1747.6	1.6399	0.2300	1538.2	1742.5	1.6282
1600	0.2681	1593.4	1811.7	1.6718	0.2450	1589.8	1807.4	1.6605

جدول A-9 خواص آب: بخار داغ (آحاد SI)  
 بر حسب  $v$  [cm<sup>3</sup>/g]،  $h$  و  $u$  بر حسب [kJ/kg]،  $s$  بر حسب [kJ/kg.K]

دما °C	$v$	$u$	$h$	$s$	$v$	$u$	$h$	$s$
6 kPa (36.16°C)					35 kPa (72.69°C)			
Sat.	23739	2425.0	2546.4	8.3304	4526.	2473.0	2631.4	7.7158
80	27132	2487.3	2650.1	8.5804	4625	2483.7	2645.6	7.7564
120	30219	2544.7	2726.0	8.7840	5163	2542.4	2723.1	7.9644
160	33302	2602.7	2802.5	8.9693	5696.	2601.2	2800.6	8.1519
200	36383	2661.4	2879.7	9.1398	6228.	2660.4	2878.4	8.3237
240	39462	2721.0	2957.8	9.2982	6758.	2720.3	2956.8	8.4828
280	42540	2781.5	3036.8	9.4464	7287.	2780.9	3036.0	8.6314
320	45618	2843.0	3116.7	9.5859	7815.	2842.5	3116.1	8.7712
360	48696	2905.5	3197.7	9.7180	8344.	2905.1	3197.1	8.9034
400	51774	2969.0	3279.6	9.8435	8872	2968.6	3279.2	9.0291
440	54851	3033.5	3362.6	9.9633	9400.	3033.2	3362.2	9.1490
500	59467	3132.3	3489.1	10.134	10192.	3132.1	3488.8	9.3194
70 kPa (89.95°C)					100 kPa (99.63°C)			
Sat.	2365.	2494.5	2660.0	7.4797	1694.	2506.1	2675.5	7.3594
100	2434.	2509.7	2680.0	7.5341	1696.	2506.7	2676.2	7.3614
120	2571.	2539.7	2719.6	7.6375	1793.	2537.3	2716.6	7.4668
160	2841.	2599.4	2798.2	7.8279	1984.	2597.8	2796.2	7.6597
200	3108.	2659.1	2876.7	8.0012	2172.	2658.1	2875.3	7.8343
240	3374.	2719.3	2955.5	8.1611	2359.	2718.5	2954.5	7.9949
280	3640.	2780.2	3035.0	8.3162	2546.	2779.6	3034.2	8.1445
320	3905.	2842.0	3115.3	8.4504	2732.	2841.5	3114.6	8.2849
360	4170.	2904.6	3196.5	8.5828	2917.	2904.2	3195.9	8.4175
400	4434.	2968.2	3278.6	8.7086	3103.	2967.9	3278.2	8.5435
440	4698.	3032.9	3361.8	8.8286	3288.	3032.6	3361.4	8.6636
500	5095.	3131.8	3488.5	8.9991	3565.	3131.6	3488.1	8.8342
150 kPa (111.37°C)					300 kPa (133.55°C)			
Sat.	1159.	2519.7	2693.6	7.2233	606.	2543.6	2725.3	6.9919
120	1188.	2533.3	2711.4	7.2693				
160	1317.	2595.2	2792.8	7.4665	651.	2587.1	2782.3	7.1276
200	1444.	2656.2	2872.9	7.6433	716.	2650.7	2865.5	7.3115
240	1570.	2717.2	2952.7	7.8052	781.	2713.1	2947.3	7.4774
280	1695.	2778.6	3032.8	7.9555	844.	2775.4	3028.6	7.6299
320	1819.	2840.6	3113.5	8.0964	907.	2838.1	3110.1	7.7722
360	1943.	2903.5	3195.0	8.2293	969.	2901.4	3192.2	7.9061
400	2067.	2967.3	3277.4	8.3555	1032.	2965.6	3275.0	8.0330
440	2191.	3032.1	3360.7	8.4757	1094.	3030.6	3358.7	8.1538
500	2376.	3131.2	3487.6	8.6466	1187.	3130.0	3486.0	8.3251
600	2685.	3301.7	3704.3	8.9101	1341.	3300.8	3703.2	8.5892

Source: Abridged from Keenan, J. H., F. G. Keyes, P. G. Hill, and J. G. Moore, "Steam Tables," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969.

جدول A-9 (ادامه)

$v$  بر حسب  $[cm^3/g]$ ،  $h$  و  $u$  بر حسب  $[kJ/kg]$ ،  $s$  بر حسب  $[kJ/kg \cdot K]$

دما °C	$v$	$u$	$h$	$s$	$v$	$u$	$h$	$s$
	500 kPa (151.86°C)				700 kPa (164.97°C)			
Sat.	374.9	2561.2	2748.7	6.8213	272.9	2572.5	2763.5	6.7080
180	404.5	2609.7	2812.0	6.9656	284.7	2599.8	2799.1	6.7880
200	424.9	2642.9	2855.4	7.0592	299.9	2634.8	2844.8	6.8865
240	464.6	2707.6	2939.9	7.2307	329.2	2701.8	2932.2	7.0641
280	503.4	2771.2	3022.9	7.3865	357.4	2766.9	3017.1	7.2233
320	541.6	2834.7	3105.6	7.5308	385.2	2831.3	3100.9	7.3697
360	579.6	2898.7	3188.4	7.6660	412.6	2895.8	3184.7	7.5063
400	617.3	2963.2	3271.9	7.7938	439.7	2960.9	3268.7	7.6350
440	654.8	3028.6	3356.0	7.9152	466.7	3026.6	3353.3	7.7571
500	710.9	3128.4	3483.9	8.0873	507.0	3126.8	3481.7	7.9299
600	804.1	3299.6	3701.7	8.3522	573.8	3298.5	3700.2	8.1956
700	896.9	3477.5	3925.9	8.5952	640.3	3476.6	3924.8	8.4391
	1.0 MPa (179.91°C)				1.5 MPa (198.32°C)			
Sat.	194.4	2583.6	2778.1	6.5865	131.8	2594.5	2792.2	6.4448
200	206.0	2621.9	2827.9	6.6940	132.5	2598.1	2796.8	6.4546
240	227.5	2692.9	2920.4	6.8817	148.3	2676.9	2899.3	6.6628
280	248.0	2760.2	3008.2	7.0465	162.7	2748.6	2992.7	6.8381
320	267.8	2826.1	3093.9	7.1962	176.5	2817.1	3081.9	6.9938
360	287.3	2891.6	3178.9	7.3349	189.9	2884.4	3169.2	7.1363
400	306.6	2957.3	3263.9	7.4651	203.0	2951.3	3255.8	7.2690
440	325.7	3023.6	3349.3	7.5883	216.0	3018.5	3342.5	7.3940
500	354.1	3124.4	3478.5	7.7622	235.2	3120.3	3473.1	7.5698
540	372.9	3192.6	3565.6	7.8720	247.8	3189.1	3560.9	7.6805
600	401.1	3296.8	3697.9	8.0290	266.8	3293.9	3694.0	7.8385
640	419.8	3367.4	3787.2	8.1290	279.3	3364.8	3783.8	7.9391
	2.0 MPa (212.42°C)				3.0 MPa (233.90°C)			
Sat.	99.6	2600.3	2799.5	6.3409	66.7	2604.1	2804.2	6.1869
240	108.5	2659.6	2876.5	6.4952	68.2	2619.7	2824.3	6.2265
280	120.0	2736.4	2976.4	6.6828	77.1	2709.9	2941.3	6.4462
320	130.8	2807.9	3069.5	6.8452	85.0	2788.4	3043.4	6.6245
360	141.1	2877.0	3159.3	6.9917	92.3	2861.7	3138.7	6.7801
400	151.2	2945.2	3247.6	7.1271	99.4	2932.8	3230.9	6.9212
440	161.1	3013.4	3335.5	7.2540	106.2	3002.9	3321.5	7.0520
500	175.7	3116.2	3467.6	7.4317	116.2	3108.0	3456.5	7.2338
540	185.3	3185.6	3556.1	7.5434	122.7	3178.4	3546.6	7.3474
600	199.6	3290.9	3690.1	7.7024	132.4	3285.0	3682.3	7.5085
640	209.1	3362.2	3780.4	7.8035	138.8	3357.0	3773.5	7.6106
700	223.2	3470.9	3917.4	7.9487	148.4	3466.5	3911.7	7.7571

جدول A-۹ (ادامه)

$\nu$  بر حسب  $[\text{cm}^3/\text{g}]$ ،  $h$  و  $u$  بر حسب  $[\text{kJ/Kg}]$ ،  $s$  بر حسب  $[\text{kJ/Kg.K}]$

دما °C	$\nu$	$u$	$h$	$s$	$\nu$	$u$	$h$	$s$
	4.0 MPa (250.40°C)				6.0 MPa (275.64°C)			
Sat.	49.78	2602.3	2801.4	6.0701	32.44	2589.7	2784.3	5.8892
280	55.46	2680.0	2901.8	6.2568	33.17	2605.2	2804.2	5.9252
320	61.99	2767.4	3015.4	6.4553	38.76	2720.0	2952.6	6.1846
360	67.88	2845.7	3117.2	6.6215	43.31	2811.2	3071.1	6.3782
400	73.41	2919.9	3213.6	6.7690	47.39	2892.9	3177.2	6.5408
440	78.72	2992.2	3307.1	6.9041	51.22	2970.0	3277.3	6.6853
500	86.43	3099.5	3445.3	7.0901	56.65	3082.2	3422.2	6.8803
540	91.45	3171.1	3536.9	7.2056	60.15	3156.1	3517.0	6.9999
600	98.85	3279.1	3674.4	7.3688	65.25	3266.9	3658.4	7.1677
640	103.7	3351.8	3766.6	7.4720	68.59	3341.0	3752.6	7.2731
700	111.0	3462.1	3905.9	7.6198	73.52	3453.1	3894.1	7.4234
740	115.7	3536.6	3999.6	7.7141	76.77	3528.3	3989.2	7.5190
	8.0 MPa (295.06°C)				10.0 MPa (311.06°C)			
Sat.	23.52	2569.8	2758.0	5.7432	18.03	2544.4	2724.7	5.6141
320	26.82	2662.7	2877.2	5.9489	19.25	2588.8	2781.3	5.7103
360	30.89	2772.7	3019.8	6.1819	23.31	2729.1	2962.1	6.0060
400	34.32	2863.8	3138.3	6.3634	26.41	2832.4	3096.5	6.2120
440	37.42	2946.7	3246.1	6.5190	29.11	2922.1	3213.2	6.3805
480	40.34	3025.7	3348.4	6.6586	31.60	3005.4	3321.4	6.5282
520	43.13	3102.7	3447.2	6.7871	33.94	3085.6	3425.1	6.6622
560	45.82	3178.7	3545.3	6.9072	36.19	3164.1	3526.0	6.7864
600	48.45	3254.4	3642.0	7.0206	38.37	3241.7	3625.3	6.9029
640	51.02	3330.1	3738.3	7.1283	40.48	3318.9	3723.7	7.0131
700	54.81	3443.9	3882.4	7.2812	43.58	3434.7	3870.5	7.1687
740	57.29	3520.4	3978.7	7.3782	45.60	3512.1	3968.1	7.2670
	12.0 MPa (324.75°C)				14.0 MPa (336.75°C)			
Sat.	14.26	2513.7	2684.9	5.4924	11.49	2476.8	2637.6	5.3717
360	18.11	2678.4	2895.7	5.8361	14.22	2617.4	2816.5	5.6602
400	21.08	2798.3	3051.3	6.0747	17.22	2760.9	3001.9	5.9448
440	23.55	2896.1	3178.7	6.2586	19.54	2868.6	3142.2	6.1474
480	25.76	2984.4	3293.5	6.4154	21.57	2962.5	3264.5	6.3143
520	27.81	3068.0	3401.8	6.5555	23.43	3049.8	3377.8	6.4610
560	29.77	3149.0	3506.2	6.6840	25.17	3133.6	3486.0	6.5941
600	31.64	3228.7	3608.3	6.8037	26.83	3215.4	3591.1	6.7172
640	33.45	3307.5	3709.0	6.9164	28.43	3296.0	3694.1	6.8326
700	36.10	3425.2	3858.4	7.0749	30.75	3415.7	3846.2	6.9939
740	37.81	3503.7	3957.4	7.1746	32.25	3495.2	3946.7	7.0952

جدول 9-M-A (ادامه)

ν بر حسب [cm<sup>3</sup>/g] ، h و u بر حسب [kJ/Kg] ، s بر حسب [kJ/kg.K]

دما °C	v	u	h	s	v	u	h	s
16.0 MPa (347.44°C)					18.0 MPa (357.06°C)			
Sat.	9.31	2431.7	2580.6	5.2455	7.49	2374.3	2509.1	5.1044
360	11.05	2539.0	2715.8	5.4614	8.09	2418.9	2564.5	5.1922
400	14.26	2719.4	2947.6	5.8175	11.90	2672.8	2887.0	5.6887
440	16.52	2839.4	3103.7	6.0429	14.14	2808.2	3062.8	5.9428
480	18.42	2939.7	3234.4	6.2215	15.96	2915.9	3203.2	6.1345
520	20.13	3031.1	3353.3	6.3752	17.57	3011.8	3378.0	6.2960
560	21.72	3117.8	3465.4	6.5132	19.04	3101.7	3444.4	6.4392
600	23.23	3201.8	3573.5	6.6399	20.42	3188.0	3555.6	6.5696
640	24.67	3284.2	3678.9	6.7580	21.74	3272.3	3663.6	6.6905
700	26.74	3406.0	3833.9	6.9224	23.62	3396.3	3821.5	6.8580
740	28.08	3486.7	3935.9	7.0251	24.83	3478.0	3925.0	6.9623
20.0 MPa (365.81°C)					24.0 MPa			
Sat.	5.83	2293.0	2409.7	4.9269	6.73	2477.8	2639.4	5.2393
400	9.94	2619.3	2818.1	5.5540	9.29	2700.6	2923.4	5.6506
440	12.22	2774.9	3019.4	5.8450	9.29	2700.6	2923.4	5.6506
480	13.99	2891.2	3170.8	6.0518	11.00	2838.3	3102.3	5.8950
520	15.51	2992.0	3302.2	6.2218	12.41	2950.5	3248.5	6.0842
560	16.89	3085.2	3423.0	6.3705	13.66	3051.1	3379.0	6.2448
600	18.18	3174.0	3537.6	6.5048	14.81	3145.2	3500.7	6.3875
640	19.40	3260.2	3648.1	6.6286	15.88	3235.5	3616.7	6.5174
700	21.13	3386.4	3809.0	6.7993	17.39	3366.4	3783.8	6.6947
740	22.24	3469.3	3914.1	6.9052	18.35	3451.7	3892.1	6.8038
800	23.85	3592.7	4069.7	7.0544	19.74	3578.0	4051.6	6.9567
28.0 MPa					32.0 MPa			
400	3.83	2223.5	2330.7	4.7494	2.36	1980.4	2055.9	4.3239
440	7.12	2613.2	2812.6	5.4494	5.44	2509.0	2683.0	5.2327
480	8.85	2780.8	3028.5	5.7446	7.22	2718.1	2949.2	5.5968
520	10.20	2906.8	3192.3	5.9566	8.53	2860.7	3133.7	5.8357
560	11.36	3015.7	3333.7	6.1307	9.63	2979.0	3287.2	6.0246
600	12.41	3115.6	3463.0	6.2823	10.61	3085.3	3424.6	6.1858
640	13.38	3210.3	3584.8	6.4187	11.50	3184.5	3552.5	6.3290
700	14.73	3346.1	3758.4	6.6029	12.73	3325.4	3732.8	6.5203
740	15.58	3433.9	3870.0	6.7153	13.50	3415.9	3847.8	6.6361
800	16.80	3563.1	4033.4	6.8720	14.60	3548.0	4015.1	6.7966
900	18.73	3774.3	4298.8	7.1084	16.33	3762.7	4285.1	7.0372

جدول A-۱۰ خواص آب: جدول مایع متراکم شده (آحاد انگلیسی)

بر حسب  $[ft^3/lbm]$ ،  $h$  و  $u$  بر حسب  $[Btu/lbm]$ ،  $s$  بر حسب  $[Btu/lbm \cdot ^\circ R]$

دما °F	500 psia ( $T_{sat} = 467.1^\circ F$ )				1000 psia ( $T_{sat} = 544.7^\circ F$ )			
	$v$	$u$	$h$	$s$	$v$	$u$	$h$	$s$
32	0.015994	0.00	1.49	0.00000	0.015967	0.03	2.99	0.00005
50	0.015998	18.02	19.50	0.03599	0.015972	17.99	20.94	0.03592
100	0.016106	67.87	69.36	0.12932	0.016082	67.70	70.68	0.12901
150	0.016318	117.66	119.17	0.21457	0.016293	117.38	120.40	0.21410
200	0.016608	167.65	169.19	0.29341	0.016580	167.26	170.32	0.29281
300	0.017416	268.92	270.53	0.43641	0.017379	268.24	271.46	0.43552
400	0.018608	373.68	375.40	0.56604	0.018550	372.55	375.98	0.56472
Sat.	0.019748	447.70	449.53	0.64904	0.021591	538.39	542.38	0.74320
دما °F	1500 psia ( $T_{sat} = 596.4^\circ F$ )				2000 psia ( $T_{sat} = 636.0^\circ F$ )			
	$v$	$u$	$h$	$s$	$v$	$u$	$h$	$s$
32	0.015939	0.05	4.47	0.00007	0.015912	0.06	5.95	0.00008
50	0.015946	17.95	22.38	0.03584	0.015920	17.91	23.81	0.03575
100	0.016058	67.53	71.99	0.12870	0.016034	67.37	73.30	0.12839
150	0.016268	117.10	121.62	0.21364	0.016244	116.83	122.84	0.21318
200	0.016554	166.87	171.46	0.29221	0.016527	166.49	172.60	0.29162
300	0.017343	267.58	272.39	0.43463	0.017308	266.93	273.33	0.43376
400	0.018493	371.45	376.59	0.56343	0.018439	370.38	377.21	0.56216
500	0.02024	481.8	487.4	0.6853	0.02014	479.8	487.3	0.6832
Sat.	0.02346	605.0	611.5	0.8082	0.02565	662.4	671.9	0.8623
دما °F	3000 psia ( $T_{sat} = 695.5^\circ F$ )				4000 psia			
	$v$	$u$	$h$	$s$	$v$	$u$	$h$	$s$
32	0.015859	0.09	8.90	0.00009	0.015807	0.10	11.80	0.00005
50	0.015870	17.84	26.65	0.03555	0.015821	17.76	29.47	0.03534
100	0.015987	67.04	75.91	0.12777	0.015942	66.72	78.52	0.12714
150	0.016196	116.30	125.29	0.21226	0.016150	115.77	127.73	0.21136
200	0.016476	165.74	174.89	0.29046	0.016425	165.02	177.18	0.28931
300	0.017240	265.66	275.23	0.43205	0.017174	264.43	277.15	0.43038
400	0.018334	368.32	378.50	0.55970	0.018235	366.35	379.85	0.55734
500	0.019944	476.2	487.3	0.6794	0.019766	472.9	487.5	0.6758
Sat.	0.034310	783.5	802.5	0.9732				

Source: Abridged from Keenan, J. H., F. G. Keyes, P. G. Hill, and J. G. Moore, "Steam Tables," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969.

جدول A-1 خواص آب: جدول مایع متراکم شده (SI واحد)

$v$  بر حسب  $[cm^3/g]$ ،  $h$  و  $u$  بر حسب  $[kJ/kg]$ ،  $s$  بر حسب  $[kJ/kg \cdot K]$

دما C	$v$	$u$	$h$	$s$	$v$	$u$	$h$	$s$
2.5 MPa (223.99°C)					5.0 MPa (263.99°C)			
20	1.0006	83.80	86.30	0.2961	0.9995	83.65	88.65	0.2956
40	1.0067	167.25	169.77	0.5715	1.0056	166.95	171.97	0.5705
80	1.0280	334.29	336.86	1.0737	1.0268	333.72	338.85	1.0720
120	1.0590	502.68	505.33	1.5255	1.0576	501.80	507.09	1.5233
160	1.1006	673.90	676.65	1.9404	1.0988	672.62	678.12	1.9375
200	1.1555	849.9	852.8	2.3294	1.1530	848.1	848.1	2.3255
220	1.1898	940.7	943.7	2.5174	1.1866	938.4	944.4	2.5128
Sat.	1.1973	959.1	962.1	2.5546	1.2859	1147.8	1154.2	2.9202
7.5 MPa (290.59°C)					10.0 MPa (311.06°C)			
20	0.9984	83.50	90.99	0.2950	0.9972	83.36	93.33	0.2945
40	1.0045	166.64	174.18	0.5696	1.0034	166.35	176.38	0.5686
80	1.0256	333.15	340.84	1.0704	1.0245	332.59	342.83	1.0688
100	1.0397	416.81	424.62	1.3011	1.0385	416.12	426.50	1.2992
140	1.0752	585.72	593.78	1.7317	1.0737	584.68	595.42	1.7292
180	1.1219	758.13	766.55	2.1308	1.1199	756.65	767.84	2.1275
220	1.1835	936.2	945.1	2.5083	1.1805	934.1	945.9	2.5039
260	1.2696	1124.4	1134.0	2.8763	1.2645	1121.1	1133.7	2.8699
Sat.	1.3677	1282.0	1292.2	3.1649	1.4524	1393.0	1407.6	3.3596
15.0 MPa (342.24°C)					20.0 MPa (365.81°C)			
20	0.9950	83.06	97.99	0.2934	0.9928	82.77	102.62	0.2923
40	1.0013	165.76	180.78	0.5666	0.9992	165.17	185.16	0.5646
100	1.0361	414.75	430.28	1.2955	1.0337	413.39	434.06	1.2917
180	1.1159	753.76	770.50	2.1210	1.1120	750.95	773.20	2.1147
220	1.1748	929.9	947.5	2.4953	1.1693	925.9	949.3	2.4870
260	1.2550	1114.6	1133.4	2.8576	1.2462	1108.6	1133.5	2.8459
300	1.3770	1316.6	1337.3	3.2260	1.3596	1306.1	1333.3	3.2071
Sat.	1.6581	1585.6	1610.5	3.6848	2.036	1785.6	1826.3	4.0139
25.0 MPa					30.0 MPa			
20	0.9907	82.47	107.24	0.2911	0.9886	82.17	111.84	0.2899
40	0.9971	164.60	189.52	0.5626	0.9951	164.04	193.89	0.5607
100	1.0313	412.08	437.85	1.2881	1.0290	410.78	441.66	1.2844
200	1.1344	834.5	862.8	2.2961	1.1302	831.4	865.3	2.2893
300	1.3442	1296.6	1330.2	3.1900	1.3304	1287.9	1327.8	3.1741

Source: Adapted from Keenan, J. H., F. G. Keyes, P. G. Hill, and J. G. Moore, "Steam Tables," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969.



جدول ۸-۱۱ خواص آب: انحرافات مایع متراکم از مایع اشباع (آحاد انگلیسی)

فشار مطلق mm Hg (دمای اشباع)	مائع اشباع	دما °F											
		32		100		200		300		400		500	
		P	v <sub>f</sub> h <sub>f</sub> s <sub>f</sub>	P	v <sub>f</sub> h <sub>f</sub> s <sub>f</sub>	P	v <sub>f</sub> h <sub>f</sub> s <sub>f</sub>	P	v <sub>f</sub> h <sub>f</sub> s <sub>f</sub>	P	v <sub>f</sub> h <sub>f</sub> s <sub>f</sub>	P	v <sub>f</sub> h <sub>f</sub> s <sub>f</sub>
200 (381.79)	$(v - v_f) \times 10^3$ $h - h_f$ $(s - s_f) \times 10^3$	-1.2 +0.57 0	-1.2 +0.53 -0.08	-0.4 +0.50 -0.20	-0.9 +0.35 -0.20								
400 (444.59)	$(v - v_f) \times 10^3$ $h - h_f$ $(s - s_f) \times 10^3$	-2.2 +1.17 0	-2.2 +1.06 -0.18	-1.4 +0.96 -0.32	-1.9 +0.72 -0.34					-1.9 +0.28 -0.08			
800 (518.23)	$(v - v_f) \times 10^3$ $h - h_f$ $(s - s_f) \times 10^3$	-4.2 +2.38 +0.1	-4.2 +2.12 -0.48	-4.4 +1.87 -0.82	-4.9 +1.46 -1.14					-6.9 +0.74 -1.18		-2.2 +0.04 -0.21	
1000 (544.61)	$(v - v_f) \times 10^3$ $h - h_f$ $(s - s_f) \times 10^3$	-5.2 +2.98 +0.1	-5.2 +2.64 -0.58	-5.4 +2.32 -1.02	-6.9 +1.83 -1.44					-8.9 +0.97 -1.68		-7.2 -0.10 -1.11	
1500 (586.23)	$(v - v_f) \times 10^3$ $h - h_f$ $(s - s_f) \times 10^3$	-8.2 +4.48 +0.1	-7.2 +3.96 -0.88	-8.4 +3.46 -1.62	-9.9 +2.77 -2.34					-14.9 +1.57 -2.98		-18.2 -0.19 -3.21	

Source: Differential values calculated from tabulated data for compressed water in "Thermodynamics and Transport Properties of Steam," American Society of Mechanical Engineers, New York, 1967.

جدول ١٢- A خواص آمونیاک اشباع: جدول دما (آحاد انگلیسی)

دما $t_f$ °F	فشار $P_f$ psia	حجم مخصوص $ft^3/lbm$			انثالپی Btu/lbm			آنترالپی Btu/lbm·°R		
		مایع اشباع $v_f$	بخار اشباع $v_g$	مایع اشباع $h_f$	تبخیر $h_{fg}$	بخار اشباع $h_g$	مایع اشباع $s_f$	تبخیر $s_{fg}$	بخار اشباع $s_g$	
-60	5.55	0.022 78	44.73	-21.2	610.8	589.6	-0.0517	1.5286	1.4769	
-50	7.67	0.022 99	33.08	-10.6	604.3	593.7	-0.0256	1.4753	1.4497	
-40	10.41	0.023 22	24.86	0.0	597.6	597.6	0.0000	1.4242	1.4242	
-30	13.90	0.023 45	18.97	10.7	590.7	601.4	0.0250	1.3751	1.4001	
-20	18.30	0.023 69	14.68	21.4	583.6	605.0	0.0497	1.3277	1.3774	
-10	23.74	0.023 93	11.50	32.1	576.4	608.5	0.0738	1.2820	1.3558	
0	30.42	0.024 19	9.116	42.9	568.9	611.8	0.0975	2.2377	1.3352	
5	34.27	0.024 32	8.150	48.3	565.0	613.3	0.1092	1.2161	1.3253	
10	38.51	0.024 46	7.304	53.8	561.1	614.9	0.1208	1.1949	1.3157	
20	48.21	0.024 74	5.910	64.7	553.1	617.8	0.1437	1.1532	1.2969	
30	59.74	0.025 03	4.825	75.7	544.8	620.5	0.1663	1.1127	1.2790	
40	73.32	0.025 33	3.971	86.8	536.2	623.0	0.1885	1.0733	1.2618	
50	89.19	0.025 64	3.294	97.9	527.3	625.2	0.2105	1.0348	1.2453	
60	107.6	0.025 97	2.751	109.2	518.1	627.3	0.2322	0.9972	1.2294	
70	128.8	0.026 32	2.312	120.5	508.6	629.1	0.2537	0.9603	1.2140	
80	153.0	0.026 68	1.955	132.0	498.7	630.7	0.2749	0.9242	1.1991	
86	169.2	0.026 91	1.772	138.9	492.6	631.5	0.2875	0.9029	1.1904	
90	180.6	0.027 07	1.661	143.5	488.5	632.0	0.2958	0.8888	1.1846	
100	211.9	0.027 47	1.419	155.2	477.8	633.0	0.3166	0.8539	1.1705	
110	247.0	0.027 90	1.217	167.0	466.7	633.7	0.3372	0.8194	1.1566	
120	286.4	0.028 36	1.047	179.0	455.0	634.0	0.3576	0.7851	1.1427	

Source: Data from Tables of Thermodynamic Properties of Ammonia, Natl. Bur. Std. Circ. 142, 1945.

جدول A-۱۳ خواص آمونیاک اشباع : جدول فشار (آحاد انگلیسی)

فشار $P$ , psia	دما $t$ , °F	حجم مخصوص $R/lbm$			انتالپی , Btu/lbm			آنترالپی , Btu/lbm·R		
		مایع اشباع $v_f$	بخار اشباع $v_g$	بخار اشباع $h_g$	مایع اشباع $h_f$	تبخیر $h_{fg}$	بخار اشباع $h_g$	مایع اشباع $s_f$	تبخیر $s_{fg}$	بخار اشباع $s_g$
5	-63.11	0.022 71	49.31	588.3	-24.5	612.8	588.3	-0.0599	1.5456	1.4857
10	-41.34	0.023 19	25.81	597.1	-1.4	598.5	597.1	-0.0034	1.4310	1.4276
15	-27.29	0.023 51	17.67	602.4	13.6	588.8	602.4	0.0318	1.3620	1.3938
20	-16.64	0.023 77	13.50	606.2	25.0	581.2	606.2	0.0578	1.3122	1.3700
30	0.57	0.024 17	9.236	611.6	42.3	569.3	611.6	0.0962	1.2402	1.3364
40	11.66	0.024 51	7.047	615.4	55.6	559.8	615.4	0.1246	1.1879	1.3125
50	21.67	0.024 79	5.710	618.2	66.5	551.7	618.2	0.1475	1.1464	1.2939
60	30.21	0.025 04	4.805	620.5	75.9	544.6	620.5	0.1668	1.1119	1.2787
80	44.40	0.025 46	3.655	624.0	91.7	532.3	624.0	0.1982	1.0563	1.2545
100	56.05	0.025 84	2.952	626.5	104.7	521.8	626.5	0.2237	1.0119	1.2356
120	66.02	0.026 18	2.476	628.4	116.0	512.4	628.4	0.2452	0.9749	1.2201
140	74.79	0.026 49	2.132	629.9	126.0	503.9	629.9	0.2638	0.9430	1.2068
170	86.29	0.026 92	1.764	631.6	139.3	492.3	631.6	0.2881	0.9019	1.1900
200	96.34	0.027 32	1.502	632.7	150.9	481.8	632.7	0.3090	0.8666	1.1756
230	105.30	0.027 70	1.307	633.4	161.4	472.0	633.4	0.3275	0.8356	1.1631
260	113.42	0.028 06	1.155	633.9	171.1	462.8	633.9	0.3441	0.8077	1.1518

Source: Data from Tables of Thermodynamic Properties of Ammonia, Natl. Bur. Std. (U.S.) Circ. 142, 1945.

جدول ۱۲-۸ خواص آمونیاک داغ (آحاد انگلیسی)

تعداد مصطفی	(دماهی اشباع)													تعداد
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220		
u	28.58	29.90	31.20	32.49	33.78	35.07	36.35	37.62	38.90	40.17	41.45			
h	618.9	629.1	639.1	649.5	659.7	670.0	680.3	690.6	701.1	711.6	722.2			
s	1.477	1.499	1.520	1.540	1.559	1.578	1.596	1.614	1.631	1.647	1.664			
(-41.34)														
u	18.92	19.82	20.70	21.58	22.44	23.31	24.17	25.03	25.88	26.74	27.59			
h	617.2	627.8	638.2	648.5	658.9	669.2	679.6	690.0	700.5	711.1	721.7			
s	1.427	1.450	1.471	1.491	1.511	1.529	1.548	1.566	1.583	1.599	1.616			
(-27.29)														
u	14.09	14.78	15.45	16.12	16.78	17.43	18.08	18.73	19.37	20.02	20.66			
h	615.5	626.4	637.0	647.5	658.0	668.5	678.9	689.4	700.0	710.6	721.2			
s	1.391	1.414	1.436	1.456	1.476	1.495	1.513	1.531	1.549	1.565	1.582			
(-16.64)														
u	11.19	11.75	12.30	12.84	13.37	13.90	14.43	14.95	15.47	15.99	16.50			
h	613.8	625.0	635.8	646.5	657.1	667.7	678.2	688.8	699.4	710.1	720.8			
s	1.362	1.386	1.408	1.429	1.449	1.468	1.486	1.504	1.522	1.539	1.555			
(-7.96)														
u	9.25	9.731	10.20	10.65	11.10	11.55	11.99	12.43	12.87	13.30	13.73			
h	611.9	623.5	634.6	645.5	656.2	666.9	677.5	688.2	698.8	709.6	720.3			
s	1.337	1.362	1.385	1.406	1.426	1.446	1.464	1.482	1.501	1.517	1.533			
(-0.57)														
u	8.287	8.693	9.091	9.484	9.869	10.25	10.63	11.00	11.38	11.75	12.12			
h	622.0	633.4	644.4	655.3	666.1	676.8	687.6	698.3	709.1	719.9	730.7			
s	1.341	1.365	1.386	1.407	1.427	1.445	1.464	1.481	1.498	1.515	1.531			
(5.89)														
u	7.203	7.568	7.922	8.268	8.609	8.945	9.278	9.609	9.938	10.27	10.59			
h	620.4	632.1	643.4	654.4	665.3	676.1	686.9	697.7	708.5	719.4	730.3			
s	1.323	1.347	1.369	1.390	1.410	1.429	1.447	1.465	1.482	1.499	1.515			
(11.66)														
u	6.213	6.538	6.851	7.157	7.457	7.753	8.045	8.335	8.623	8.909	9.194			
h	618.5	630.5	642.1	653.3	664.4	675.3	686.2	697.1	708.0	718.8	729.8			
s	1.304	1.328	1.351	1.372	1.392	1.411	1.430	1.448	1.465	1.482	1.498			
(17.87)														
u	5.988	6.280	6.564	6.843	7.117	7.387	7.655	7.921	8.185	8.448	8.709			
h	629.5	641.2	652.6	663.7	674.7	685.7	696.6	707.5	718.5	729.4	740.3			
s	1.317	1.340	1.361	1.382	1.401	1.420	1.437	1.455	1.472	1.489	1.505			
(21.67)														
u	4.933	5.184	5.428	5.665	5.897	6.126	6.352	6.576	6.796	7.019	7.236			
h	626.8	639.0	650.7	662.1	673.3	684.4	695.5	706.5	717.5	728.6	739.6			
s	1.2913	1.3152	1.3373	1.3581	1.3778	1.3966	1.4148	1.4323	1.4493	1.4658	1.4819			
(30.21)														

جدول ١٢-أ (دالة)  
ب، °ف

	60	80	100	120	140	160	180	200	240	280	320	360
v	4.401	4.615	4.822	5.025	5.224	5.420	5.615	5.807	6.187	6.563		
h	636.6	648.7	660.4	671.8	683.1	694.3	705.5	716.6	738.9	761.4		
(37.7) s	1.294	1.317	1.338	1.358	1.377	1.395	1.413	1.430	1.463	1.494		
v	3.812	4.005	4.190	4.371	4.548	4.722	4.893	5.063	5.398	5.73		
h	634.3	646.7	658.7	670.4	681.8	693.2	704.4	715.6	738.1	760.7		
(44.4) s	1.273	1.298	1.320	1.340	1.360	1.378	1.396	1.414	1.447	1.478		
v	3.353	3.529	3.698	3.862	4.021	4.178	4.332	4.484	4.783	5.081		
h	631.8	644.7	657.0	668.9	680.5	692.0	703.4	714.7	737.3	760.0		
(50.47) s	1.257	1.281	1.304	1.325	1.344	1.363	1.381	1.400	1.432	1.464		
v	2.985	3.149	3.304	3.454	3.600	3.743	3.883	4.021	4.294	4.562		
h	629.3	642.6	655.2	667.3	679.2	690.8	702.3	713.7	736.5	759.4		
(56.05) s	1.241	1.266	1.289	1.310	1.331	1.349	1.368	1.385	1.419	1.451		
v	2.166	2.288	2.404	2.515	2.622	2.727	2.830	2.930	3.030	3.227		
h	633.8	647.8	661.1	673.7	686.0	698.0	709.9	721.6	733.3	745.7		
(74.79) s	1.214	1.240	1.263	1.284	1.305	1.324	1.342	1.359	1.376	1.409		
v	1.720	1.818	1.910	1.999	2.084	2.167	2.248	2.328	2.404	2.637		
h	639.9	654.4	668.0	681.0	693.6	705.9	718.1	730.1	741.9	753.9		
(89.78) s	1.199	1.225	1.248	1.269	1.289	1.308	1.326	1.344	1.377	1.408		
v	1.443	1.525	1.601	1.673	1.745	1.815	1.881	1.945	2.012	2.140		
h	647.3	662.0	675.8	689.1	701.9	714.5	726.8	738.8	751.1	763.3		
(102.42) s	1.192	1.217	1.239	1.259	1.280	1.301	1.317	1.331	1.351	1.383		
v	1.302	1.380	1.452	1.521	1.587	1.652	1.714	1.774	1.835	1.954		
h	643.5	658.8	673.1	686.7	699.8	712.4	724.8	736.9	748.4	760.4		
(108.09) s	1.176	1.203	1.226	1.248	1.268	1.288	1.305	1.339	1.371	1.402		
v	1.182	1.257	1.326	1.391	1.453	1.512	1.572	1.606	1.796	1.904		
h	639.5	655.6	670.4	684.4	697.7	710.4	722.4	734.4	746.4	758.4		
(113.42) s	1.162	1.189	1.213	1.235	1.256	1.279	1.294	1.319	1.361	1.391		
v	1.078	1.151	1.217	1.279	1.339	1.399	1.451	1.558	1.661	1.762		
h	635.4	652.2	667.6	681.9	695.6	708.8	721.8	734.7	747.0	759.3		
(118.45) s	1.147	1.176	1.201	1.224	1.245	1.263	1.283	1.318	1.351	1.382		

Source: Data from Tables of Thermodynamic Properties of Ammonia, Natl. Bur. Std. (U.S.) Circ. 142, 1945.

جدول A-۱۵ خواص فربون ۱۲ (دی کلوروفلورمتان) جدول دمای اشباع (آحاد انگیسی)

دما $t_f$ °F	فشار مطلق $P_s$ psia	حجم مخصوص			انتالپی			آنترالپی		
		مایع اشباع $v_f$	تبخیر $v_g$	بخار اشباع $v_g$	مایع اشباع $h_f$	تبخیر $h_g$	بخار اشباع $h_g$	مایع اشباع $s_f$	تبخیر $s_g$	بخار اشباع $s_g$
-130	0.41224	0.009 736	70.7203	70.730	-18.609	81.577	62.968	-0.049 83	0.247 43	0.197 60
-120	0.64190	0.009 816	46.7312	46.741	-16.565	80.617	64.052	-0.043 72	0.237 31	0.193 59
-110	0.97034	0.009 899	31.7671	31.777	-14.518	79.663	65.145	-0.037 79	0.227 80	0.190 02
-100	1.4280	0.009 985	21.1541	22.164	-12.466	78.714	66.248	-0.032 00	0.218 83	0.186 83
-90	2.0509	0.010 073	15.8109	15.821	-10.409	77.764	67.355	-0.026 37	0.210 34	0.183 98
-80	2.8807	0.010 164	11.5228	11.533	-8.3451	76.812	68.467	-0.020 86	0.202 29	0.181 43
-70	3.9651	0.010 259	8.5584	8.5687	-6.2730	75.853	69.580	-0.015 48	0.194 64	0.179 16
-60	5.3575	0.010 357	6.4670	6.4774	-4.1919	74.885	70.693	-0.010 21	0.187 16	0.177 14
-50	7.1168	0.010 459	4.9637	4.9742	-2.1011	73.906	71.805	-0.005 06	0.180 38	0.175 33
-40	9.3076	0.010 564	3.8644	3.8750	0	72.913	72.913	0	0.173 73	0.173 73
-30	11.9999	0.010 674	3.0478	3.0585	2.1120	71.903	74.015	0.004 96	0.167 33	0.172 29
-20	15.267	0.010 788	2.4321	2.4429	4.2357	70.874	75.110	0.009 83	0.161 19	0.171 02
-10	19.189	0.010 906	1.9628	1.9727	6.3716	69.824	76.196	0.014 62	0.155 27	0.169 89
0	23.849	0.011 030	1.5979	1.6089	8.5207	68.750	77.271	0.019 32	0.149 36	0.168 88
10	29.335	0.011 160	1.3129	1.3241	10.684	67.651	78.335	0.023 95	0.144 03	0.167 98
20	35.736	0.011 296	1.0875	1.0988	12.863	66.522	79.385	0.028 52	0.138 67	0.167 19
30	43.148	0.011 438	0.907 36	0.91890	15.058	65.361	80.419	0.033 01	0.133 47	0.166 48

40	51.667	0.011 588	0.761 98	0.77357	17.273	64.163	81.436	0.037 45	0.128 41	0.165 86
50	61.394	0.011 746	0.643 62	0.65537	19.507	62.926	82.433	0.041 84	0.123 46	0.165 30
60	72.433	0.011 913	0.546 48	0.55839	21.766	61.643	83.409	0.046 18	0.118 61	0.164 79
70	84.888	0.012 089	0.466 09	0.47818	24.050	60.309	84.359	0.050 48	0.113 86	0.164 34
80	98.870	0.012 277	0.399 07	0.411 35	26.365	58.917	85.282	0.054 75	0.109 17	0.163 92
90	114.49	0.012 478	0.342 81	0.355 29	28.713	57.461	86.174	0.059 00	0.104 53	0.163 53
100	131.86	0.012 693	0.295 25	0.307 94	31.100	55.929	87.029	0.063 23	0.099 92	0.163 15
110	151.11	0.012 924	0.255 77	0.267 69	33.531	54.313	87.844	0.067 45	0.095 34	0.162 79
120	172.35	0.013 174	0.220 19	0.233 26	36.013	52.597	88.610	0.071 68	0.090 73	0.162 41
130	195.71	0.013 447	0.190 19	0.203 64	38.553	50.768	89.321	0.075 83	0.086 09	0.162 02
140	221.32	0.013 746	0.164 24	0.177 99	41.162	48.805	89.967	0.080 21	0.081 38	0.161 59
150	249.31	0.014 078	0.141 56	0.155 64	43.850	46.684	90.534	0.084 53	0.076 57	0.161 10
160	279.82	0.014 449	0.121 59	0.136 04	46.633	44.373	91.006	0.088 93	0.072 60	0.160 53
170	313.00	0.014 871	0.103 86	0.118 73	49.529	41.830	91.359	0.093 42	0.066 43	0.159 85
180	349.00	0.015 360	0.087 94	0.103 30	52.562	38.999	91.561	0.098 04	0.060 96	0.159 00
190	387.98	0.015 942	0.073 476	0.089 418	55.769	35.792	91.561	0.102 84	0.055 11	0.157 93
200	430.09	0.016 659	0.060 069	0.076 728	59.203	32.075	91.278	0.107 89	0.048 62	0.156 51
210	475.52	0.017 601	0.047 242	0.064 843	62.959	27.599	90.558	0.113 32	0.039 21	0.154 53
220	524.43	0.018 986	0.035 154	0.053 140	67.246	21.790	89.036	0.119 43	0.032 06	0.151 49
230	577.03	0.021 854	0.017 581	0.039 435	72.893	12.229	85.122	0.127 39	0.017 73	0.145 12
233.6	596.9	0.028 70	0	0.028 70	78.86	0	78.86	0.135 9	0	0.135 9

(critical)

Source: E. I. du Pont de Nemours & Company, Inc., copyright 1955 and 1956.

جدول A-16 خواص فبرون ۱۲ دانگ (آمله انجلی)

دما، °C	h			h			h		
	D	5 points	S	D	10 points	S	D	15 points	S
0	8.0611	78.582	0.196 63	3.9809	78.246	0.194 71	2.6201	77.902	0.177 51
20	8.4265	81.309	0.202 44	4.1691	81.014	0.190 61	2.7494	80.712	0.183 49
40	8.7903	84.090	0.208 12	4.3156	83.828	0.196 35	2.8770	83.561	0.189 31
60	9.1528	86.922	0.213 67	4.5408	86.689	0.201 97	3.0031	86.431	0.194 98
80	9.5142	89.806	0.219 12	4.7248	89.596	0.207 46	3.1281	89.383	0.200 51
100	9.8747	92.738	0.224 43	4.9079	92.548	0.212 83	3.2521	92.357	0.205 93
120	10.234	95.717	0.229 68	5.0903	95.546	0.218 09	3.3754	95.373	0.211 22
140	10.594	98.743	0.234 81	5.2720	98.586	0.223 25	3.4981	98.429	0.216 40
160	10.952	101.812	0.239 85	5.4533	101.669	0.228 30	3.6202	101.525	0.221 48
180	11.311	104.925	0.244 79	5.6341	104.793	0.233 26	3.7419	104.661	0.226 40
200	11.668	108.079	0.249 64	5.8145	107.957	0.238 13	3.8632	107.835	0.231 35
220	12.026	111.272	0.254 41	5.9946	111.159	0.242 91	3.9841	111.046	0.236 14
25 points									
20	2.0391	80.403	0.178 29	1.6125	80.084	0.174 14	1.3278	79.765	0.170 65
40	2.1373	83.289	0.184 19	1.6932	83.012	0.180 12	1.3969	82.730	0.176 71
60	2.2340	86.210	0.189 92	1.7723	85.965	0.185 91	1.4644	85.716	0.182 57
80	2.3295	89.168	0.195 50	1.8502	88.950	0.191 55	1.5306	88.729	0.188 36
100	2.4241	92.164	0.200 95	1.9271	91.968	0.197 04	1.5957	91.770	0.193 79
120	2.5179	95.198	0.206 28	2.0032	95.021	0.202 40	1.6600	94.843	0.199 18
140	2.6110	98.270	0.211 49	2.0786	98.110	0.207 63	1.7237	97.948	0.204 45
160	2.7036	101.380	0.216 59	2.1535	101.234	0.212 76	1.7868	101.086	0.209 60
180	2.7957	104.528	0.221 59	2.2279	104.393	0.217 78	1.8494	104.258	0.214 63
200	2.8874	107.712	0.226 49	2.3019	107.588	0.222 69	1.9116	107.464	0.219 57
220	2.9789	110.932	0.231 30	2.3756	110.817	0.227 52	1.9735	110.702	0.224 40
240	3.0700	114.186	0.236 02	2.4491	114.080	0.232 25	2.0351	113.973	0.229 15
35 points									
40	1.1850	82.442	0.173 75	1.0238	82.148	0.171 12	0.80248	81.540	0.166 55
60	1.2442	85.463	0.179 68	1.0789	85.206	0.177 12	0.84713	84.676	0.172 71
80	1.3021	88.504	0.185 42	1.1306	88.277	0.182 92	0.89025	87.811	0.178 82
100	1.3589	91.570	0.191 00	1.1812	91.367	0.188 54	0.93216	90.953	0.184 34
120	1.4148	94.663	0.196 43	1.2309	94.480	0.194 01	0.97315	94.110	0.189 88
140	1.4701	97.785	0.201 72	1.2798	97.620	0.199 33	1.0133	97.286	0.195 27
160	1.5248	100.938	0.206 89	1.3282	100.788	0.204 53	1.0529	100.485	0.200 51
180	1.5789	104.122	0.211 95	1.3761	103.985	0.209 61	1.0920	103.708	0.205 63
200	1.6327	107.338	0.216 90	1.4236	107.212	0.214 57	1.1307	106.958	0.210 64
220	1.6862	110.586	0.221 75	1.4707	110.469	0.219 44	1.1690	110.235	0.215 53
240	1.7394	113.865	0.226 51	1.5176	113.757	0.224 20	1.2070	113.539	0.220 52
260	1.7923	117.175	0.231 17	1.5642	117.074	0.228 88	1.2447	116.871	0.225 07

Source: E. I. du Pont de Nemours & Company, Inc. copyright 1955 and 1956.



(403) A-17 جدول

L <sub>0</sub> , °F	h					h					h				
	e		s		e		s		e		s		h		
	60 psia					70 psia					80 psia				
60	0.692 10	84.126	0.168 92	0.580 88	83.552	0.165 86	0.577 95	86.316	0.164 85	87.330	0.174 97	0.585 85	89.640	0.174 89	
80	0.729 64	87.330	0.174 97	0.614 58	86.832	0.171 75	0.557 84	89.640	0.170 87	90.528	0.178 24	0.565 83	92.373	0.178 30	
100	0.765 88	90.528	0.180 79	0.646 85	90.091	0.177 64	0.545 82	92.373	0.183 91	93.731	0.183 91	0.537 81	94.537	0.183 91	
120	0.801 10	93.731	0.186 41	0.679 03	93.343	0.183 39	0.535 84	96.542	0.187 86	96.945	0.189 38	0.524 79	98.824	0.189 38	
140	0.835 31	96.945	0.191 86	0.708 36	96.597	0.188 91	0.524 86	101.464	0.192 62	98.824	0.194 69	0.512 91	102.557	0.194 69	
160	0.869 28	100.176	0.197 16	0.736 00	99.862	0.194 48	0.519 43	104.539	0.197 82	102.557	0.199 84	0.504 13	105.805	0.199 84	
180	0.902 52	103.427	0.202 53	0.767 08	103.141	0.199 48	0.509 45	107.720	0.202 87	105.805	0.204 86	0.496 92	109.267	0.204 86	
200	0.935 51	106.700	0.207 56	0.795 71	106.439	0.204 55	0.690 95	110.605	0.207 80	109.267	0.209 76	0.488 38	112.644	0.209 76	
220	0.967 75	109.997	0.212 79	0.823 97	109.756	0.209 51	0.716 09	113.906	0.212 61	112.644	0.214 55	0.480 54	116.040	0.214 55	
240	0.999 88	113.319	0.217 10	0.851 91	113.096	0.214 35	0.740 90	117.475	0.217 31	116.040	0.219 23	0.472 50	119.456	0.219 23	
260	1.031 8	116.666	0.221 82	0.879 59	116.459	0.219 09	0.765 44	121.761	0.221 91	121.761	0.223 81	0.465 18	122.892	0.223 81	
280	1.063 4	120.039	0.226 44	0.907 05	119.846	0.223 73	0.789 75	125.290	0.226 41	125.290	0.228 30	0.458 72	126.549	0.228 30	
	90 psia					100 psia					125 psia				
100	0.487 49	89.175	0.172 34	0.431 38	88.694	0.169 96	0.329 43	91.407	0.164 55	92.373	0.178 24	0.455 62	94.537	0.178 24	
120	0.513 46	92.536	0.178 24	0.455 62	92.116	0.175 97	0.330 86	94.537	0.170 87	95.408	0.183 91	0.478 81	98.824	0.183 91	
140	0.538 45	95.879	0.183 91	0.478 81	95.507	0.181 72	0.330 86	98.824	0.183 72	99.216	0.189 38	0.496 92	102.557	0.189 38	
160	0.562 68	99.216	0.189 38	0.496 92	98.824	0.187 36	0.390 15	104.539	0.187 86	102.557	0.194 69	0.504 13	105.805	0.194 69	
180	0.586 29	102.557	0.194 69	0.522 91	102.257	0.192 62	0.408 57	107.720	0.192 62	105.805	0.199 84	0.512 91	109.267	0.199 84	
200	0.609 41	105.805	0.199 84	0.544 13	105.613	0.197 82	0.426 42	110.605	0.197 82	109.267	0.204 86	0.524 79	112.644	0.204 86	
220	0.632 13	109.267	0.204 86	0.564 92	109.018	0.202 87	0.443 80	113.906	0.202 87	112.644	0.209 76	0.538 38	116.040	0.209 76	
240	0.654 51	112.644	0.209 76	0.585 38	112.415	0.207 80	0.460 81	117.475	0.207 80	116.040	0.214 55	0.548 54	119.456	0.214 55	
260	0.676 62	116.040	0.214 55	0.605 54	115.828	0.212 61	0.477 50	121.761	0.212 61	119.456	0.219 23	0.562 46	122.892	0.219 23	
280	0.698 49	119.456	0.219 23	0.625 46	119.258	0.217 31	0.493 94	125.290	0.217 31	122.892	0.223 81	0.645 18	126.549	0.223 81	
300	0.720 16	122.892	0.223 81	0.645 18	122.707	0.221 91	0.510 16	126.549	0.221 91	126.549	0.228 30	0.664 72	128.833	0.228 30	
320	0.741 66	126.549	0.228 30	0.664 72	126.176	0.226 41	0.526 19	128.833	0.226 41	128.833	0.233 43	0.683 24	130.176	0.233 43	
	150 psia					175 psia					200 psia				
120	0.280 07	89.800	0.164 29	0.245 95	92.373	0.168 59	0.205 79	91.137	0.164 80	95.100	0.172 56	0.261 98	99.824	0.172 56	
140	0.296 45	93.498	0.172 56	0.261 98	96.142	0.174 78	0.221 21	95.100	0.171 30	100.675	0.180 79	0.276 97	104.206	0.180 79	
160	0.315 66	97.412	0.180 79	0.276 97	99.824	0.180 62	0.235 35	102.557	0.180 62	105.805	0.189 38	0.290 76	112.644	0.189 38	
180	0.332 00	100.675	0.186 41	0.290 76	101.464	0.186 20	0.248 60	107.720	0.186 20	110.605	0.194 69	0.304 85	116.040	0.194 69	
200	0.347 69	104.206	0.191 86	0.304 85	107.036	0.191 56	0.261 17	110.605	0.191 56	112.644	0.204 86	0.310 87	121.761	0.204 86	
220	0.362 85	107.720	0.197 16	0.310 87	110.605	0.196 74	0.271 23	113.906	0.196 74	116.040	0.209 76	0.315 67	125.290	0.209 76	
240	0.377 61	111.226	0.199 92	0.310 87	114.162	0.201 75	0.284 89	117.475	0.201 75	121.761	0.214 55	0.325 67	130.176	0.214 55	
260	0.392 03	114.732	0.204 85	0.310 87	116.605	0.206 62	0.296 23	121.761	0.206 62	125.290	0.219 23	0.338 24	137.377	0.219 23	
280	0.406 17	118.242	0.209 67	0.315 67	118.242	0.211 37	0.307 30	125.290	0.211 37	130.176	0.223 81	0.350 73	144.737	0.223 81	
300	0.420 08	121.761	0.214 36	0.315 67	121.761	0.215 99	0.318 15	130.176	0.215 99	137.377	0.228 30	0.364 72	148.833	0.228 30	
320	0.433 79	125.290	0.218 94	0.315 67	124.835	0.220 52	0.328 81	137.377	0.220 52	144.737	0.233 43	0.379 63	153.408	0.233 43	
340	0.447 33	128.833	0.223 43	0.315 67	128.407	0.225 52	0.338 81	144.737	0.225 52	153.408	0.238 30	0.389 63	157.408	0.238 30	

جدول A-۱۶ (ادامه)

		250 psia	300 psia	400 psia
160	0.162 49	92.717	0.164 62	94.556
180	0.176 05	96.925	0.171 30	98.975
200	0.188 24	100.930	0.177 47	0.165 37
			0.146 97	0.172 17
				0.091 005
				93.718
				0.160 92
		250 psia	300 psia	400 psia
220	0.199 52	104.809	0.183 26	103.136
240	0.210 14	108.607	0.188 77	107.140
260	0.220 27	112.351	0.194 04	111.043
280	0.230 01	116.060	0.199 13	114.879
300	0.239 44	119.747	0.204 05	118.670
320	0.248 62	123.420	0.208 82	122.430
340	0.257 59	127.088	0.213 46	126.171
360	0.266 39	130.754	0.217 99	129.900
380	0.275 04	134.423	0.222 41	133.624
			0.225 22	0.218 72
				0.162 85
				131.961
				0.212 53
		500 psia	600 psia	
220	0.064 207	92.397	0.156 83	91.024
240	0.077 620	99.218	0.166 72	0.153 35
260	0.087 054	104.526	0.174 21	0.165 66
280	0.094 923	109.277	0.180 72	0.173 74
300	0.101 90	113.729	0.186 66	0.179 53
320	0.108 29	117.997	0.192 21	0.186 63
340	0.114 26	122.143	0.197 46	0.192 27
360	0.119 92	126.205	0.202 47	0.197 57
380	0.125 33	130.207	0.207 30	0.202 62
400	0.130 54	134.166	0.211 96	0.207 46
420	0.135 59	138.096	0.216 48	0.212 13
440	0.140 51	142.004	0.220 87	0.216 64
			0.113 91	
				140.539

## جدول A-۱۷ خواص ترمودینامیکی هوا در فشار پایین (آحاد انگلیسی)

تراز مبنا: 1 atm و 0°R - آنتروپی مطلق می تواند از رابطه زیر محاسبه شود.

$$s^{\circ} = \phi - R \ln (p/p_0) + 1 \text{ Btu/lbm} \cdot ^{\circ}\text{R}$$

که  $p_0$  فشار مبنا 1 atm است

دما , °R	$h_f$ Btu/lbm	$P_r$	$u_f$ Btu/lbm	$v_f$	$\phi_f$ Btu/lbm·°R
200	47.67	0.043 20	33.96	1714.9	0.363 03
220	52.46	0.060 26	37.38	1352.5	0.385 84
240	57.25	0.081 65	40.80	1088.8	0.406 66
260	62.03	0.107 97	44.21	892.0	0.425 82
280	66.82	0.139 86	47.63	741.6	0.443 56
300	71.61	0.177 95	51.04	624.5	0.460 07
320	76.40	0.222 90	54.46	531.8	0.475 50
340	81.18	0.275 45	57.87	457.2	0.490 02
360	85.97	0.3363	61.29	396.6	0.503 69
380	90.75	0.4061	64.70	346.6	0.516 63
400	95.53	0.4858	68.11	305.0	0.528 90
420	100.32	0.5760	71.52	270.1	0.540 58
440	105.11	0.6776	74.93	240.6	0.551 72
460	109.90	0.7913	78.36	215.33	0.562 35
480	114.69	0.9182	81.77	193.65	0.572 55
500	119.48	1.0590	85.20	174.90	0.582 33
520	124.27	1.2147	88.62	158.58	0.591 73
540	129.06	1.3860	92.04	144.32	0.600 78
560	133.86	1.5742	95.47	131.78	0.609 50
580	138.66	1.7800	98.90	120.70	0.617 93
600	143.47	2.005	102.34	110.88	0.626 07
620	148.28	2.249	105.78	102.12	0.633 95
640	153.09	2.514	109.21	94.30	0.641 59
660	157.92	2.801	112.67	87.27	0.649 02
680	162.73	3.111	116.12	80.96	0.656 21
700	167.56	3.446	119.58	75.25	0.663 21
720	172.39	3.806	123.04	70.07	0.670 02
740	177.23	4.193	126.51	65.38	0.676 65
760	182.08	4.607	129.99	61.10	0.683 12
780	186.94	5.051	133.47	57.20	0.689 42
800	191.81	5.526	136.97	53.63	0.695 58
820	196.69	6.033	140.47	50.35	0.701 60
840	201.56	6.573	143.98	47.34	0.707 47
860	206.46	7.149	147.50	44.57	0.713 23
880	211.35	7.761	151.02	42.01	0.718 86
900	216.26	8.411	154.57	39.64	0.724 38
920	221.18	9.102	158.12	37.44	0.729 79
940	226.11	9.834	161.68	35.41	0.735 09
960	231.06	10.610	165.26	33.52	0.740 30

Source: Abridged from J. H. Keenan and J. Kaye, "Gas Tables," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1948, by permission.

جدول ۱۷ - A (ادامه)

$T, ^\circ R$	$h_f$ Btu/lbm	$P_f$	$u_f$ Btu/lbm	$v_f$	$\phi_f$ Btu/lbm- $^\circ R$
980	236.02	11.430	168.83	31.76	0.745 40
1000	240.98	12.298	172.43	30.12	0.750 42
1020	245.97	13.215	176.04	28.59	0.755 36
1040	250.95	14.182	179.66	27.17	0.760 19
1060	255.96	15.203	183.29	25.82	0.764 96
1080	260.97	16.278	186.93	24.58	0.769 64
1100	265.99	17.413	190.58	23.40	0.774 26
1120	271.03	18.604	194.25	22.30	0.778 80
1140	276.08	19.858	197.94	21.27	0.783 26
1160	281.14	21.18	201.63	20.293	0.787 67
1180	286.21	22.56	205.33	19.377	0.792 01
1200	291.30	24.01	209.05	18.514	0.796 28
1220	296.41	25.53	212.78	17.700	0.800 50
1240	301.52	27.13	216.53	16.932	0.804 66
1260	306.65	28.80	220.28	16.205	0.808 76
1280	311.79	30.55	224.05	15.518	0.812 80
1300	316.94	32.39	227.83	14.868	0.816 80
1320	322.11	34.31	231.63	14.253	0.820 75
1340	327.29	36.31	235.43	13.670	0.824 64
1360	332.48	38.41	239.25	13.118	0.828 48
1380	337.68	40.59	243.08	12.593	0.832 29
1400	342.90	42.88	246.93	12.095	0.836 04
1420	348.14	45.26	250.79	11.622	0.839 75
1440	353.37	47.75	254.66	11.172	0.843 41
1460	358.63	50.34	258.54	10.743	0.847 04
1480	363.89	53.04	262.44	10.336	0.850 62
1500	369.17	55.86	266.34	9.948	0.854 16
1520	374.47	58.78	270.26	9.578	0.857 67
1540	379.77	61.83	274.20	9.226	0.861 13
1560	385.08	65.00	278.13	8.890	0.864 56
1580	390.40	68.30	282.09	8.569	0.867 94
1600	395.74	71.73	286.06	8.263	0.871 30
1620	401.09	75.29	290.04	7.971	0.874 62
1640	406.45	78.99	294.03	7.691	0.877 91
1660	411.82	82.83	298.02	7.424	0.881 16
1680	417.20	86.82	302.04	7.168	0.884 39
1700	422.59	90.95	306.06	6.924	0.887 58
1720	428.00	95.24	310.09	6.690	0.890 74
1740	433.41	99.69	314.13	6.465	0.893 87
1760	438.83	104.30	318.18	6.251	0.896 97
1780	444.26	109.08	322.24	6.045	0.900 03
1800	449.71	114.03	326.32	5.847	0.903 08
1820	455.17	119.16	330.40	5.658	0.906 09
1840	460.63	124.47	334.50	5.476	0.909 08
1860	466.12	129.95	338.61	5.302	0.912 03
1880	471.60	135.64	342.73	5.134	0.914 97
1900	477.09	141.51	346.85	4.974	0.917 88
1920	482.60	147.59	350.98	4.819	0.920 76

جدول ۱۷- A (ادامه)

$\Delta$ , °R	$h$ , Btu/lbm	$P$ ,	$u$ , Btu/lbm	$v$ ,	$\phi$ , Btu/lbm·°R
1940	488.12	153.87	355.12	4.670	0.923 62
1960	493.64	160.37	359.28	4.527	0.926 45
1980	499.17	167.07	363.43	4.390	0.929 26
2000	504.71	174.00	367.61	4.258	0.932 05
2020	510.26	181.16	371.79	4.130	0.934 81
2040	515.82	188.54	375.98	4.008	0.937 56
2060	521.39	196.16	380.18	3.890	0.940 26
2080	526.97	204.02	384.39	3.777	0.942 96
2100	532.55	212.1	388.60	3.667	0.945 64
2120	538.15	220.5	392.83	3.561	0.948 29
2140	543.74	229.1	397.05	3.460	0.950 92
2160	549.35	238.0	401.29	3.362	0.953 52
2180	554.97	247.2	405.53	3.267	0.956 11
2200	560.59	256.6	409.78	3.176	0.958 68
2220	566.23	266.3	414.05	3.088	0.961 23
2240	571.86	276.3	418.31	3.003	0.963 76
2260	577.51	286.6	422.59	2.921	0.966 26
2280	583.16	297.2	426.87	2.841	0.968 76
2300	588.82	308.1	431.16	2.765	0.971 23
2320	594.49	319.4	435.46	2.691	0.973 69
2340	600.16	330.9	439.76	2.619	0.976 11
2360	605.84	342.8	444.07	2.550	0.978 53
2380	611.53	355.0	448.38	2.483	0.980 92
2400	617.22	367.6	452.70	2.419	0.983 31

جدول A-۱۷M خواص ترمودینامیکی هوا در فشار پایین (آحاد SI)

تراز مبنای 1 atm و 0 K - آنترپی مطلق می‌تواند از رابطه زیر محاسبه شود.

$$s^{\circ} = \phi - R \ln (p/p_0) + 4.1869 \text{ kJ/kg.K}$$

که  $p_0$  فشار مبنای 1 atm است

$T$ , K	$h$ , kJ/kg	$P$ ,	$u$ , kJ/kg	$v$ ,	$\phi$ kJ/kg.K
100	99.76	0.029 90	71.06	2230	1.4143
110	109.77	0.041 71	78.20	1758.4	1.5098
120	119.79	0.056 52	85.34	1415.7	1.5971
130	129.81	0.074 74	92.51	1159.8	1.6773
140	139.84	0.096 81	99.67	964.2	1.7515
150	149.86	0.123 18	106.81	812.0	1.8206
160	159.87	0.154 31	113.95	691.4	1.8853
170	169.89	0.190 68	121.11	594.5	1.9461
180	179.92	0.232 79	128.28	515.6	2.0033
190	189.94	0.281 14	135.40	450.6	2.0575
200	199.96	0.3363	142.56	396.6	2.1088
210	209.97	0.3987	149.70	351.2	2.1577
220	219.99	0.4690	156.84	312.8	2.2043
230	230.01	0.5477	163.98	280.0	2.2489
240	240.03	0.6355	171.15	251.8	2.2915
250	250.05	0.7329	178.29	227.45	2.3325
260	260.09	0.8405	185.45	206.26	2.3717
270	270.12	0.9590	192.59	187.74	2.4096
280	280.14	1.0889	199.78	171.45	2.4461
290	290.17	1.2311	206.92	157.07	2.4813
300	300.19	1.3860	214.09	144.32	2.5153
310	310.24	1.5546	221.27	132.96	2.5483
320	320.29	1.7375	228.45	122.81	2.5802
330	330.34	1.9352	235.65	113.70	2.6111
340	340.43	2.149	242.86	105.51	2.6412
350	350.48	2.379	250.05	98.11	2.6704
360	360.58	2.626	257.23	91.40	2.6987
370	370.67	2.892	264.47	85.31	2.7264
380	380.77	3.176	271.72	79.77	2.7534
390	390.88	3.481	278.96	74.71	2.7796
400	400.98	3.806	286.19	70.07	2.8052
410	411.12	4.153	293.45	65.83	2.8302
420	421.26	4.522	300.73	61.93	2.8547
430	431.43	4.915	308.03	58.34	2.8786
440	441.61	5.332	315.34	55.02	2.9020

Source: Adapted to SI units from H. Keenan and J. Kaye, "Gas Tables," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1948.

جدول ۱۷M-A (ادامه)

$T$ , K	$h$ , kJ/kg	$P$ ,	$u$ , kJ/kg	$v$ ,	$\phi$ kJ/kg-K
450	451.83	5.775	322.66	51.96	2.9249
460	462.01	6.245	329.99	49.11	2.9473
470	472.25	6.742	337.34	46.48	2.9693
480	482.48	7.268	344.74	44.04	2.9909
490	492.74	7.824	352.11	41.76	3.0120
500	503.02	8.411	359.53	39.64	3.0328
510	513.32	9.031	366.97	37.65	3.0532
520	523.63	9.684	374.39	35.80	3.0733
530	533.98	10.372	381.88	34.07	3.0930
540	544.35	11.097	389.40	32.45	3.1124
550	554.75	11.858	396.89	30.92	3.1314
560	565.17	12.659	404.44	29.50	3.1502
570	575.57	13.500	411.98	28.15	3.1686
580	586.04	14.382	419.56	26.89	3.1868
590	596.53	15.309	427.17	25.70	3.2047
600	607.02	16.278	434.80	24.58	3.2223
610	617.53	17.297	442.43	23.51	3.2397
620	628.07	18.360	450.13	22.52	3.2569
630	638.65	19.475	457.83	21.57	3.2738
640	649.21	20.64	465.55	20.674	3.2905
650	659.84	21.86	473.32	19.828	3.3069
660	670.47	23.13	481.06	19.026	3.3232
670	681.15	24.46	488.88	18.266	3.3392
680	691.82	25.85	496.65	17.543	3.3551
690	702.52	27.29	504.51	16.857	3.3707
700	713.27	28.80	512.37	16.205	3.3861
710	724.01	30.38	520.26	15.585	3.4014
720	734.20	31.92	527.72	15.027	3.4156
730	745.62	33.72	536.12	14.434	3.4314
740	756.44	35.50	544.05	13.900	3.4461
750	767.30	37.35	552.05	13.391	3.4607
760	778.21	39.27	560.08	12.905	3.4751
770	789.10	41.27	568.10	12.440	3.4894
780	800.03	43.35	576.15	11.998	3.5035
790	810.98	45.51	584.22	11.575	3.5174
800	821.94	47.75	592.34	11.172	3.5312
810	832.96	50.08	600.46	10.785	3.5449
820	843.97	52.49	608.62	10.416	3.5584
830	855.01	55.00	616.79	10.062	3.5718
840	866.09	57.60	624.97	9.724	3.5850
850	877.16	60.29	633.21	9.400	3.5981
860	888.28	63.09	641.44	9.090	3.6111
870	899.42	65.98	649.70	8.792	3.6240

جدول A-۱۷M (ادامه)

$T$ , K	$h$ , kJ/kg	$P_r$	$u$ , kJ/kg	$v_r$	$\phi$ kJ/kg·K
880	910.56	68.98	658.00	8.507	3.6367
890	921.75	72.08	666.31	8.233	3.6493
900	932.94	75.29	674.63	7.971	3.6619
910	944.15	78.61	682.98	7.718	3.6743
920	955.38	82.05	691.33	7.476	3.6865
930	966.64	85.60	699.73	7.244	3.6987
940	977.92	89.28	708.13	7.020	3.7108
950	989.22	93.08	716.57	6.805	3.7227
960	1000.53	97.00	725.01	6.599	3.7346
970	1011.88	101.06	733.48	6.400	3.7463
980	1023.25	105.24	741.99	6.209	3.7580
990	1034.63	109.57	750.48	6.025	3.7695
1000	1046.03	114.03	759.02	5.847	3.7810
1020	1068.89	123.12	775.67	5.521	3.8030
1040	1091.85	133.34	793.35	5.201	3.8259
1060	1114.85	143.91	810.61	4.911	3.8478
1080	1137.93	155.15	827.94	4.641	3.8694
1100	1161.07	167.07	845.34	4.390	3.8906
1120	1184.28	179.71	862.85	4.156	3.9116
1140	1207.54	193.07	880.37	3.937	3.9322
1160	1230.90	207.24	897.98	3.732	3.9525
1180	1254.34	222.2	915.68	3.541	3.9725
1200	1277.79	238.0	933.40	3.362	3.9922
1220	1301.33	254.7	951.19	3.194	4.0117
1240	1324.89	272.3	969.01	3.037	4.0308
1260	1348.55	290.8	986.92	2.889	4.0497
1280	1372.25	310.4	1004.88	2.750	4.0684
1300	1395.97	330.9	1022.88	2.619	4.0868
1320	1419.77	352.5	1040.93	2.497	4.1049
1340	1443.61	375.3	1059.03	2.381	4.1229
1360	1467.50	399.1	1077.17	2.272	4.1406
1380	1491.43	424.2	1095.36	2.169	4.1580
1400	1515.41	450.5	1113.62	2.072	4.1753
1420	1539.44	478.0	1131.90	1.9808	4.1923
1440	1563.49	506.9	1150.23	1.8942	4.2092
1460	1587.61	537.1	1168.61	1.8124	4.2258
1480	1611.80	568.8	1187.03	1.7350	4.2422
1500	1635.99	601.9	1205.47	1.6617	4.2585



جدول A-۱۸: خواص ترمودینامیکی گازها در فشار پایین (حالات انکلیسی)  
 ناز بنیا:  $0.101325 \text{ MPa}$ ؛  $h$  بر حسب  $[\text{Btu/lbmol}]$ ؛  $s$  بر حسب  $[\text{Btu/lbmol} \cdot \text{R}]$   
 آنژیروهای مطلق در فشارهای دیگر می‌توانند از رابطه زیر محاسبه شود.  

$$s(T, P) = s(T, P^0) - R \ln \left( \frac{P}{P^0} \right)$$
 که  $P^0$  فشار بنیاست ۱ می‌باشد.

دما	محتوالات احتراق %۴۰.۰		محتوالات احتراق %۲۰.۰		نیترژن		اکسیژن		په‌آر آب		دی‌اکسیدکربن		هیدروژن		مون‌اکسیدکربن	
	h	φ	h	φ	h	φ	h	φ	h	φ	h	φ	h	φ	h	φ
537	3746.8	46.318	1374.9	46.300	3729.5	45.755	4258.1	45.079	4030.2	51.032	3640.3	31.194	3729.5	47.272	48.044	49.120
600	4191.9	47.101	4236.3	47.094	4167.9	46.514	4168.3	49.762	4764.7	45.970	4660.9	31.959	3168.0	48.044	49.120	50.038
700	4901.7	48.195	4947.7	48.207	4864.9	47.984	4879.3	50.834	5575.4	47.219	5552.0	33.031	4864.0	49.120	50.038	50.892
800	5617.5	49.150	5676.3	49.179	5564.4	48.522	5607.0	51.821	6396.9	48.316	6352.9	34.839	5564.2	50.038	50.892	51.646
900	6340.3	50.002	6413.0	50.047	6264.1	49.352	6337.9	52.684	7230.9	49.298	7197.6	36.070	6340.3	50.892	51.646	52.337
1000	7072.1	50.773	7159.8	50.833	6977.9	50.099	7087.5	53.477	8078.9	50.191	8042.1	37.212	7072.1	51.646	52.337	52.976
1100	7812.9	51.479	7916.4	51.555	7695.0	50.783	7850.4	54.204	8942.0	51.013	8902.6	38.281	7812.9	52.337	52.976	53.571
1200	8563.4	52.132	8683.6	52.222	8420.0	51.413	8625.8	54.879	9820.4	51.777	9782.0	39.283	8563.4	52.976	53.571	54.129
1300	9324.1	52.741	9461.7	52.845	9153.9	52.001	9412.9	55.508	10714.5	52.494	10622.9	40.229	9324.1	53.571	54.129	54.655
1400	10095.0	53.312	10250.7	53.430	9986.9	52.551	10210.4	56.099	11624.8	53.168	11544.7	41.124	10095.0	54.129	54.655	54.922
1500	10875.6	53.851	11050.2	53.981	10648.9	53.071	11017.1	56.656	12551.4	53.808	12457.0	41.974	10875.6	54.655	54.922	55.154
1600	11665.6	54.360	11859.6	54.504	11408.7	53.561	11832.5	57.182	13493.9	54.418	13389.0	42.783	11665.6	55.154	55.154	55.350
1700	12464.3	54.844	12678.6	55.000	12178.9	54.038	12655.6	57.680	14435.4	54.999	14320.4	43.555	12464.3	55.350	55.350	55.528
1800	13271.7	55.306	13507.0	55.473	12956.3	54.472	13485.8	58.155	15431.0	55.559	15301.5	44.326	13271.7	55.528	55.528	55.678
1900	14087.2	55.747	14344.1	55.926	13741.6	54.886	14271.5	58.607	16427.5	56.097	16297.8	45.099	14087.2	55.678	55.678	55.809
2000	14910.3	56.169	15189.3	56.360	14534.4	55.303	15039.3	57.439	17439.0	56.617	17318.7	45.867	14910.3	55.809	55.809	55.922
2100	15740.5	56.574	16042.4	56.777	15340.5	55.694	15846.9	57.941	18469.9	57.119	18352.7	46.632	15740.5	55.922	55.922	56.037
2200	16577.1	56.964	16902.5	57.177	16139.8	56.068	16686.6	58.448	19510.8	57.605	19399.0	47.393	16577.1	56.037	56.037	56.145
2300	17419.8	57.338	17769.3	57.562	16951.2	56.429	17718.8	60.228	20710.6	58.077	20566.3	48.145	17419.8	56.145	56.145	56.247
2400	18268.0	57.699	18642.1	57.933	17767.9	56.777	18379.2	60.994	21645.7	58.535	21524.0	48.889	18268.0	56.247	56.247	56.349
2500	19121.4	58.048	19520.7	58.292	18589.5	57.112	19244.4	60.946	22735.4	59.046	22601.2	49.624	19121.4	56.349	56.349	56.441
2600	19979.7	58.384	20404.6	58.639	19415.8	57.436	20031.4	61.287	23839.5	59.414	23697.7	50.345	19979.7	56.441	56.441	56.533
2700	20842.8	58.710	21293.8	58.974	20246.4	57.750	20861.6	61.616	24957.2	59.837	24812.2	51.056	20842.8	56.533	56.533	56.625
2800	21709.8	59.026	22187.5	59.300	21091.5	58.045	21697.8	62.057	26088.8	60.248	25941.8	51.752	21709.8	56.625	56.625	56.717
2900	22581.4	59.331	23086.0	59.615	21910.5	58.348	22536.1	62.424	27231.2	60.650	27091.5	52.427	22581.4	56.717	56.717	56.809
3000	23456.6	59.628	23985.5	59.921	22761.5	58.632	23381.7	62.840	28386.3	61.043	28206.6	53.146	23456.6	56.809	56.809	56.901
3100	24335.5	59.916	24893.3	60.218	23635.0	58.910	24202.5	62.811	29552.8	61.426	29377.7	53.874	24335.5	56.901	56.901	57.000
3200	25217.8	60.196	25805.6	60.507	24535.0	59.179	25072.5	62.955	30722.2	61.801	30547.7	54.576	25217.8	57.000	57.000	57.100
3300	26102.9	60.469	26719.2	60.789	25460.0	59.442	26018.6	63.186	31918.2	62.167	31866.7	55.273	26102.9	57.100	57.100	57.200

جدول ۸-۱۸ (داده)

دما	محتوالات اجزائی		محتوالات اجزائی		نیترژن	اکسیژن		پتاسیم		دیسکسیدکربن		هیدروژن		مونوکسیدکربن	
	هواي تئوري	%۲۰۰	هواي تئوري	%۲۰۰		اکسیژن	%۲۰۰	پتاسیم	%۲۰۰	دیسکسیدکربن	%۲۰۰	هیدروژن	%۲۰۰	مونوکسیدکربن	%۲۰۰
3400	26 991.4	60.734	27 616.4	61.063	26 159.7	59.697	27 375.9	63.654	33 116.0	62.526	40 523.6	73.045	24 771.9	44.513	26 399.3
3500			28 556.8	61.329	27 015.9	59.944	28 273.3	63.914	34 323.5	62.876	41 965.2	73.462	25 582.9	44.748	27 261.8
3600			29 479.9	61.590	27 874.4	60.186	29 173.9	64.168	35 540.1	63.221	43 411.0	73.870	26 398.5	44.978	28 126.6
3700			30 406.0	61.843	28 735.1	60.432	30 077.5	64.415	36 765.4	63.557	44 860.6	74.267	27 218.5	45.203	28 993.5
3800			31 334.8	62.091	29 597.9	60.652	30 984.1	64.657	37 998.9	63.887	46 314.0	74.655	28 042.8	45.423	29 862.3
3900			32 266.2	62.333	30 462.8	60.877	31 893.6	64.893	39 240.2	64.210	47 771.0	75.033	28 871.1	45.638	30 732.9
4000					31 329.4	61.097	32 806.1	65.123	40 489.1	64.528	49 231.4	75.404	29 703.5	45.849	31 603.2
4100					32 196.0	61.310	33 721.6	65.349	41 745.4	64.839	50 695.1	75.765	30 539.8	46.056	32 479.1
4200					33 068.1	61.520	34 639.9	65.571	43 008.4	65.144	52 162.0	76.119	31 379.8	46.257	33 354.4
4300					33 939.9	61.726	35 561.1	65.788	44 278.0	65.444	53 632.1	76.464	32 223.5	46.456	34 231.2
4400					34 813.1	61.927	36 485.0	66.000	45 553.9	65.738	55 105.1	76.803	33 070.9	46.651	35 109.2
4500					35 687.8	62.123	37 411.8	66.208	46 835.9	66.028	56 581.0	77.135	33 921.6	46.842	35 986.6
4600					36 563.8	62.316	38 341.4	66.413	48 123.6	66.312	58 079.7	77.460	34 775.7	47 030	36 869.3
4700					37 441.1	62.504	39 273.6	66.613	49 416.9	66.591	59 541.1	77.779	35 633.0	47 215	37 751.0
4800					38 319.5	62.689	40 208.6	66.809	50 715.5	66.866	61 024.9	78.091	36 493.4	47 396	38 633.9
4900					39 199.1	62.870	41 146.3	67.003	52 019.0	67.135	62 511.3	78.398	37 356.9	47 574	39 517.8
5000					40 079.8	63.049	42 086.3	67.193	53 317.4	67.401	64 000.0	78.698	38 223.3	47 749	40 402.7
5100					40 961.6	63.223	43 029.1	67.380	54 640.3	67.662	65 490.9	78.994	39 092.8	47 921	41 288.6
5200					41 844.4	63.395	43 974.3	67.562	55 975.4	67.918	66 984.0	79 284	39 965.1	48 090	42 175.5
5300					42 728.3	63.563	44 922.2	67.743	57 278.7	68 172	68 479.1	79 569	40 840.2	48 257	43 063.2

Source: Abridged from J. H. Keenan and J. Kaye, "Gas Tables," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1948

## جدول A-۱۸M خواص ترمودینامیکی گازها در فشارهای پایین (آحاد SI)

تراز مبنا: انتالپی و انرژی داخلی در ۲۹۸ K، آنترپی در ۰ K و ۱ MPa،

$$\bar{h} \text{ و } \bar{u} \text{ بر حسب [kJ/kg mol]} \text{ و } \bar{s}_0 \text{ بر حسب [kJ/kg mol.K]}$$

آنترپی‌های مطلق در فشارهای دیگر می‌تواند از رابطه زیر محاسبه شود.

$$\bar{s} = \bar{s}_0 - R \ln(p/p_0) \text{ kJ/kg. mol.K}$$

که  $p_0$  فشار مبنا ۱ MPa و  $\bar{s}_0$  مقدار داده شده در جدول است

T, K	H <sub>2</sub> O, بخار آب			CO <sub>2</sub> , دی‌اکسیدکربن		
	$\bar{h} - \bar{h}_{298}$	$\bar{u} - \bar{u}_{298}$	$\bar{s}^\circ$	$\bar{h} - \bar{h}_{298}$	$\bar{u} - \bar{u}_{298}$	$\bar{s}^\circ$
0	-9 904	-7 425	0.0	-9 364	-6 885	0.0
100	-6 615	-4 939	152.390	-6 456	-4 666	179.109
200	-3 280	-2 453	175.486	-3 414	-2 447	199.975
250	-1 610	-1 210	182.940	-1 737	-1 337	207.446
298	0.0	0.0	188.833	0.0	0.0	213.795
300	63	47	189.038	67	54	214.025
350	1 748	1 317	194.234	1 987	1 554	219.940
400	3 452	2 605	198.783	4 008	3 161	225.334
450	5 176	3 914	202.843	6 119	4 857	230.303
500	6 920	5 246	206.523	8 314	6 636	234.924
550	8 697	6 603	209.904	10 581	8 487	239.244
600	10 498	7 988	213.037	12 916	10 406	243.309
650	12 326	9 401	215.965	15 310	12 385	247.141
700	14 184	10 843	218.719	17 761	14 420	250.773
750	16 073	12 316	221.324	20 265	16 508	254.226
800	17 991	13 820	223.803	22 815	18 642	257.517
850	19 942	15 354	226.166	25 409	20 821	260.660
900	21 924	16 920	228.430	28 041	23 037	263.668
950	23 937	18 518	230.608	30 706	25 286	266.553
1000	25 978	20 143	232.706	33 405	27 570	269.325
1050	28 057	21 806	234.731	36 138	29 887	271.986
1100	30 167	23 500	236.694	38 894	32 227	274.555
1150	32 307	25 224	238.594	41 679	32 118	277.023
1200	34 476	26 978	240.443	44 484	36 986	279.417
1250	36 676	28 762	242.237	47 312	39 399	281.721
1300	38 903	30 575	243.986	50 158	41 828	283.956
1350	41 163	32 417	245.688	53 024	44 279	286.122
1400	43 447	34 286	247.350	55 907	46 746	288.216
1450	45 759	36 183	248.973	58 803	49 227	290.252
1500	48 095	38 103	250.560	61 714	51 721	292.224
1550	50 459	40 051	252.108	64 640	54 232	293.642
1600	52 844	42 020	253.622	67 580	56 856	296.010
1650	55 255	44 015	255.106	70 531	59 245	297.823
1700	57 685	46 030	256.559	73 492	61 836	299.592
1750	60 139	48 068	257.979	76 462	64 391	301.312
1800	62 609	50 122	259.371	79 442	66 955	302.993
1850	65 102	52 200	260.737	82 431	69 528	304.631
1900	67 613	54 295	262.078	85 429	72 111	306.232
1950	70 144	55 986	263.391	88 435	74 701	307.792
2000	72 689	58 540	264.681	91 450	77 300	309.320

جدول A-۱۸M (ادامه)

$T, K$	بخار آب, $H_2O$			دی اکسید کربن, $CO_2$		
	$h - \bar{h}_{298}$	$\bar{u} - \bar{u}_{298}$	$\bar{s}^\circ$	$\bar{h} - \bar{h}_{298}$	$\bar{u} - \bar{u}_{298}$	$\bar{s}^\circ$
2050	75 252	60 686	265.947	94 471	79 906	310.810
2100	77 831	62 850	267.191	97 500	82 519	312.269
2150	80 426	65 029	268.410	100 534	85 138	313.698
2200	83 036	67 224	269.609	103 575	87 763	315.098
2250	85 658	69 430	270.788	106 620	90 392	316.465
2300	88 295	71 651	271.948	109 671	93 027	317.805
2350	90 942	73 883	273.087	112 727	95 667	319.120
2400	93 604	76 128	274.207	115 788	98 312	320.411
2450	96 279	78 386	275.310	118 855	100 964	321.675
2500	98 964	80 657	276.396	121 926	103 619	322.918
2550	101 661	82 939	277.463	125 004	106 281	324.135
2600	104 370	85 231	278.517	128 085	108 947	325.332
2650	107 087	87 533	279.550	131 169	111 615	326.505
2700	109 813	89 844	280.571	134 256	114 287	327.658
2750	112 549	92 163	281.573	137 349	116 964	328.793
2800	115 294	94 492	282.563	140 444	119 643	329.909
2850	118 048	96 831	283.538	143 544	122 327	331.005
2900	120 813	99 180	284.500	146 645	125 013	332.085
2950	123 582	101 534	285.447	149 753	127 704	333.146
3000	126 361	103 896	286.383	152 862	130 398	334.193
3050	129 147	106 267	287.303	155 977	133 097	335.223
3100	131 942	108 647	288.211	159 092	135 796	336.235
3150	134 744	111 033	289.108	162 212	138 500	337.233
3200	137 553	113 426	289.994	165 331	141 204	338.218
3250	140 368	115 825	290.865	168 458	143 916	339.178
3300	143 197	118 224	291.715	171 588	146 628	340.123

جدول ۱۸A- (ادامہ)

T, K	H <sub>2</sub> , ہیدروژن			CO , منوآکسیدکربن		
	$\bar{h} - \bar{h}_{298}$	$\bar{u} - \bar{u}_{298}$	$\bar{s}^\circ$	$\bar{h} - \bar{h}_{298}$	$\bar{u} - \bar{u}_{298}$	$\bar{s}^\circ$
0	-8 468	-5 989	0.0	-8 669	-6 190	0.0
100	-5 293	-3 979	102.145	-5 770	-4 115	165.850
200	-2 770	-1 969	119.437	-2 858	-2 040	186.025
250	-1 357	-965	125.175	-1 403	-1 002	192.520
298	0.0	0.0	130.684	0.0	0.0	197.653
300	54	38	130.864	54	39	197.833
350	1 503	1 072	135.318	1 512	1 081	202.326
400	2 958	2 111	139.215	2 975	2 129	206.234
450	4 419	3 157	142.647	4 447	3 185	209.701
500	5 883	4 204	145.738	5 929	4 253	212.828
550	7 346	5 252	148.512	7 428	5 334	215.681
600	8 812	6 302	151.077	8 941	6 432	218.313
650	10 279	7 355	153.418	10 472	7 546	220.765
700	11 749	8 410	155.608	12 021	8 680	223.062
750	13 225	9 468	157.633	13 589	9 832	225.224
800	14 703	10 531	159.549	15 175	11 003	227.271
850	16 189	11 601	161.347	16 777	12 189	229.215
900	17 682	12 678	163.060	18 397	13 393	231.066
950	19 180	13 760	164.674	20 034	14 615	232.836
1000	20 686	14 850	166.223	21 686	15 851	234.531
1050	22 200	15 949	167.696	23 354	17 103	236.155
1100	23 723	17 057	169.118	25 033	18 367	237.719
1150	25 254	18 172	170.476	26 725	19 642	239.221
1200	26 794	19 295	171.792	28 426	20 928	240.673
1250	28 346	20 432	173.054	30 141	22 362	242.070
1300	29 907	21 578	174.281	31 865	23 535	243.426
1350	31 480	22 734	175.467	33 597	24 852	244.732
1400	33 062	23 900	176.620	35 338	26 177	245.999
1450	34 661	25 084	177.739	37 090	27 513	247.227
1500	36 267	26 277	178.833	38 848	28 856	248.421
1550	37 890	27 482	179.894	40 613	30 205	249.577
1600	39 522	28 698	180.929	42 384	31 560	250.702
1650	41 165	29 926	181.940	44 159	32 920	251.795
1700	42 815	31 161	182.929	45 940	34 284	252.861
1750	44 478	32 406	183.891	47 729	35 658	253.896
1800	46 150	33 663	184.833	49 522	37 035	254.907
1850	47 831	34 928	185.754	51 321	38 419	255.891
1900	49 522	36 204	186.657	53 124	39 807	256.852
1950	51 222	37 489	187.540	54 931	41 197	257.792
2000	52 932	38 782	188.406	56 739	42 590	258.710
2050	54 651	40 085	189.257	58 555	43 989	259.603
2100	56 379	41 397	190.088	60 375	45 394	260.480
2150	58 116	42 719	190.905	62 195	46 798	261.335
2200	59 860	44 048	191.707	64 019	48 206	262.174
2250	61 612	45 384	192.494	65 847	49 619	262.996
2300	63 371	46 727	193.268	67 676	51 032	263.802
2350	65 140	48 080	194.030	69 509	52 450	264.589

جدول A-۱۸M (ادامه)

$T, K$	هیدروژن, $H_2$			مونواکسید کربن, $CO$		
	$\bar{h} - \bar{h}_{298}$	$\bar{u} - \bar{u}_{298}$	$\bar{s}^\circ$	$\bar{h} - \bar{h}_{298}$	$\bar{u} - \bar{u}_{298}$	$\bar{s}^\circ$
2400	66 915	49 440	194.778	71 346	53 870	265.362
2450	68 700	50 809	195.512	73 183	55 292	266.121
2500	70 492	52 186	196.234	75 023	56 716	266.865
2550	72 287	53 565	196.946	76 868	58 145	267.594
2600	74 090	54 952	197.649	78 714	59 576	268.312
2650	75 900	56 346	198.338	80 561	61 007	269.014
2700	77 718	57 748	199.017	82 408	62 438	269.705
2750	79 540	59 155	199.684	84 261	63 876	270.394
2800	81 370	60 569	200.343	86 115	65 314	271.053
2850	83 203	61 987	200.994	87 970	66 755	271.711
2900	85 044	63 412	201.636	89 826	68 193	272.358
2950	86 890	64 842	202.266	91 683	69 635	272.993
3000	88 743	66 279	202.887	93 542	71 077	273.618
3050	90 597	67 718	203.500	95 404	72 525	274.232
3100	92 458	69 163	204.104	97 270	73 974	274.839
3150	94 325	70 615	204.701	99 133	75 422	275.435
3200	96 199	72 072	205.293	100 998	76 871	276.023
3250	98 077	73 534	205.874	102 865	78 323	276.603
3300	99 964	74 996	206.442	104 736	79 775	277.166

$T, K$	نیتروژن, $N_2$			اکسیژن, $O_2$		
	$\bar{h} - \bar{h}_{298}$	$\bar{u} - \bar{u}_{298}$	$\bar{s}^\circ$	$\bar{h} - \bar{h}_{298}$	$\bar{u} - \bar{u}_{298}$	$\bar{s}^\circ$
0	-8 669	-6 190	0.0	-8 682	-6 203	0.0
100	-5 770	-4 115	159.813	-5 778	-4 124	173.306
200	-2 858	-2 040	179.988	-2 866	-2 045	193.486
250	-1 403	-1 002	186.479	-1 407	-1 006	199.994
298	0.0	0.0	191.611	0.0	0.0	205.142
300	54	39	191.791	54	39	205.322
350	1 511	1 080	196.282	1 531	1 100	209.874
400	2 971	2 124	200.180	3 029	2 181	213.874
450	4 436	3 173	203.632	4 546	3 284	217.451
500	5 912	4 233	206.739	6 088	4 411	220.698
550	7 395	5 302	209.570	7 656	5 562	223.685
600	8 891	6 384	212.175	9 247	6 737	226.455
650	10 406	7 481	214.598	10 862	7 937	229.041
700	11 937	8 594	216.865	12 502	9 161	231.272
750	13 480	9 723	218.998	14 162	10 404	233.758
800	15 046	10 871	221.016	15 841	11 669	235.924
850	16 623	12 034	222.931	17 536	12 947	237.973
900	18 221	13 217	224.756	19 246	14 242	239.936

جدول A-۱AM (ادامہ)

T, K	نیٹروژن , N <sub>2</sub>			اکسیجن , O <sub>2</sub>		
	$\bar{h} - \bar{h}_{298}$	$\bar{u} - \bar{u}_{298}$	$s^\circ$	$\bar{h} - \bar{h}_{298}$	$\bar{u} - \bar{u}_{298}$	$s^\circ$
950	19 832	14 413	226.498	20 970	15 551	241.798
1000	21 460	15 625	228.166	22 707	16 872	243.585
1050	23 103	16 852	229.768	24 458	18 207	245.288
1100	24 757	18 090	231.308	26 217	19 550	246.928
1150	26 426	19 344	232.791	27 987	20 905	248.499
1200	28 108	20 609	234.264	29 765	22 266	250.016
1250	29 799	21 885	235.604	31 554	23 640	251.475
1300	31 501	23 171	236.940	33 351	25 021	252.886
1350	33 214	24 469	238.231	35 155	26 410	254.245
1400	34 936	25 774	239.484	36 966	27 805	255.564
1450	36 666	27 089	240.698	38 785	29 208	256.836
1500	38 405	28 411	241.877	40 610	30 618	258.078
1550	40 150	29 741	243.022	42 441	32 033	259.274
1600	41 903	31 078	244.137	44 279	33 455	260.446
1650	43 664	32 424	245.219	46 121	34 882	261.575
1700	45 430	33 775	246.275	47 970	36 314	262.685
1750	47 203	35 132	247.302	49 826	37 755	263.757
1800	48 982	36 495	248.304	51 689	39 202	264.810
1850	50 764	37 861	249.281	53 559	40 657	265.832
1900	52 551	39 233	250.237	55 434	42 116	266.835
1950	54 349	40 610	251.167	57 315	43 581	267.807
2000	56 141	41 991	252.078	59 199	45 050	268.764
2050	57 943	43 377	252.967	61 090	46 524	269.697
2100	59 748	44 767	253.836	62 986	48 005	270.613
2150	61 557	46 161	254.687	64 891	49 494	271.508
2200	63 371	47 559	255.522	66 802	50 898	272.387
2250	65 187	48 959	256.336	68 715	52 487	273.245
2300	67 007	50 363	257.137	70 634	53 990	274.090
2350	68 827	51 768	257.919	72 561	55 501	274.918
2400	70 651	53 176	258.689	74 492	57 016	275.735
2450	72 480	54 589	259.441	76 430	58 539	276.533
2500	74 312	56 005	260.183	78 375	60 068	277.316
2550	76 145	57 423	260.908	80 322	61 599	278.088
2600	77 973	58 843	261.622	82 274	63 136	278.848
2650	79 819	60 265	262.322	84 234	64 680	279.594
2700	81 659	61 690	263.011	86 199	66 230	280.329
2750	83 502	63 116	263.686	88 170	67 784	281.051
2800	85 345	64 544	264.350	90 144	69 343	281.764
2850	87 190	65 973	265.004	92 126	70 909	282.466
2900	89 036	67 403	265.647	94 111	72 479	283.157
2950	90 887	68 838	266.279	96 103	74 055	283.837
3000	92 738	70 274	266.902	98 098	75 634	284.508
3050	94 591	71 712	267.513	100 096	77 216	285.169
3100	96 446	73 151	268.116	102 102	78 806	285.822
3150	98 303	74 592	268.710	104 113	80 398	286.464
3200	100 161	76 034	269.295	106 127	82 000	287.098
3250	102 021	77 478	269.872	108 145	83 601	287.723
3300	103 883	78 922	270.433	110 174	85 202	288.333

جدول ۱۹-A توابع جریان تراکم‌پذیر آنتروپی ثابت یک بعدی  
برای یک گاز ایده‌آل با گرمای مخصوص و وزن مولکولی ثابت و  $\gamma = 1/4$

$M$	$M^*$	$\frac{A}{A^*}$	$\frac{p}{p_0}$	$\frac{\rho}{\rho_0}$	$\frac{T}{T_0}$
0	0	$\infty$	1.000 00	1.000 00	1.000 00
0.10	0.109 43	5.8218	0.993 03	0.995 02	0.998 00
0.20	0.218 22	2.9635	0.972 50	0.980 27	0.992 06
0.30	0.325 72	2.0351	0.939 47	0.956 38	0.982 32
0.40	0.431 33	1.5901	0.895 62	0.924 28	0.968 99
0.50	0.534 52	1.3398	0.843 02	0.885 17	0.952 38
0.60	0.634 80	1.1882	0.784 00	0.840 45	0.932 84
0.70	0.731 79	1.094 37	0.720 92	0.791 58	0.910 75
0.80	0.825 14	1.038 23	0.656 02	0.740 00	0.886 52
0.90	0.914 60	1.008 86	0.591 26	0.687 04	0.860 58
1.00	1.000 00	1.000 00	0.528 28	0.633 94	0.833 33
1.10	1.081 24	1.007 93	0.468 35	0.581 69	0.805 15
1.20	1.1583	1.030 44	0.412 38	0.531 14	0.776 40
1.30	1.2311	1.066 31	0.360 92	0.482 91	0.747 38
1.40	1.2999	1.1149	0.314 24	0.437 42	0.718 39
1.50	1.3646	1.1762	0.272 40	0.394 98	0.689 65
1.60	1.4254	1.2502	0.235 27	0.355 73	0.661 38
1.70	1.4825	1.3376	0.202 59	0.319 69	0.633 72
1.80	1.5360	1.4390	0.174 04	0.286 82	0.606 80
1.90	1.5861	1.5552	0.149 24	0.256 99	0.580 72
2.00	1.6330	1.6875	0.127 80	0.230 05	0.555 56
2.10	1.6769	1.8369	0.109 35	0.205 80	0.531 35
2.20	1.7179	2.0050	0.093 52	0.184 05	0.508 13
2.30	1.7563	2.1931	0.079 97	0.164 58	0.485 91
2.40	1.7922	2.4031	0.068 40	0.147 20	0.464 68
2.50	1.8258	2.6367	0.058 53	0.131 69	0.444 44
2.60	1.8572	2.8960	0.050 12	0.117 87	0.425 17
2.70	1.8865	3.1830	0.042 95	0.105 57	0.406 84
2.80	1.9140	3.5001	0.036 85	0.094 62	0.389 41
2.90	1.9398	3.8498	0.031 65	0.084 89	0.372 86
3.00	1.9640	4.2346	0.027 22	0.076 23	0.357 14
3.50	2.0642	6.7896	0.013 11	0.045 23	0.289 86
4.00	2.1381	10.719	0.006 58	0.027 66	0.238 10
4.50	2.1936	16.562	0.003 46	0.017 45	0.198 02
5.00	2.2361	25.000	$189(10)^{-5}$	0.011 34	0.166 67
6.00	2.2953	53.180	$633(10)^{-6}$	0.005 19	0.121 95
7.00	2.3333	104.143	$242(10)^{-6}$	0.002 61	0.092 59
8.00	2.3591	190.109	$102(10)^{-6}$	0.001 41	0.072 46
9.00	2.3772	327.189	$474(10)^{-7}$	0.000 815	0.058 14
10.00	2.3904	535.938	$236(10)^{-7}$	0.000 495	0.047 62
$\infty$	2.4495	$\infty$	0	0	0

Source: Abridged from J. H. Keenan and J. Kaye, "Gas Tables," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1948.

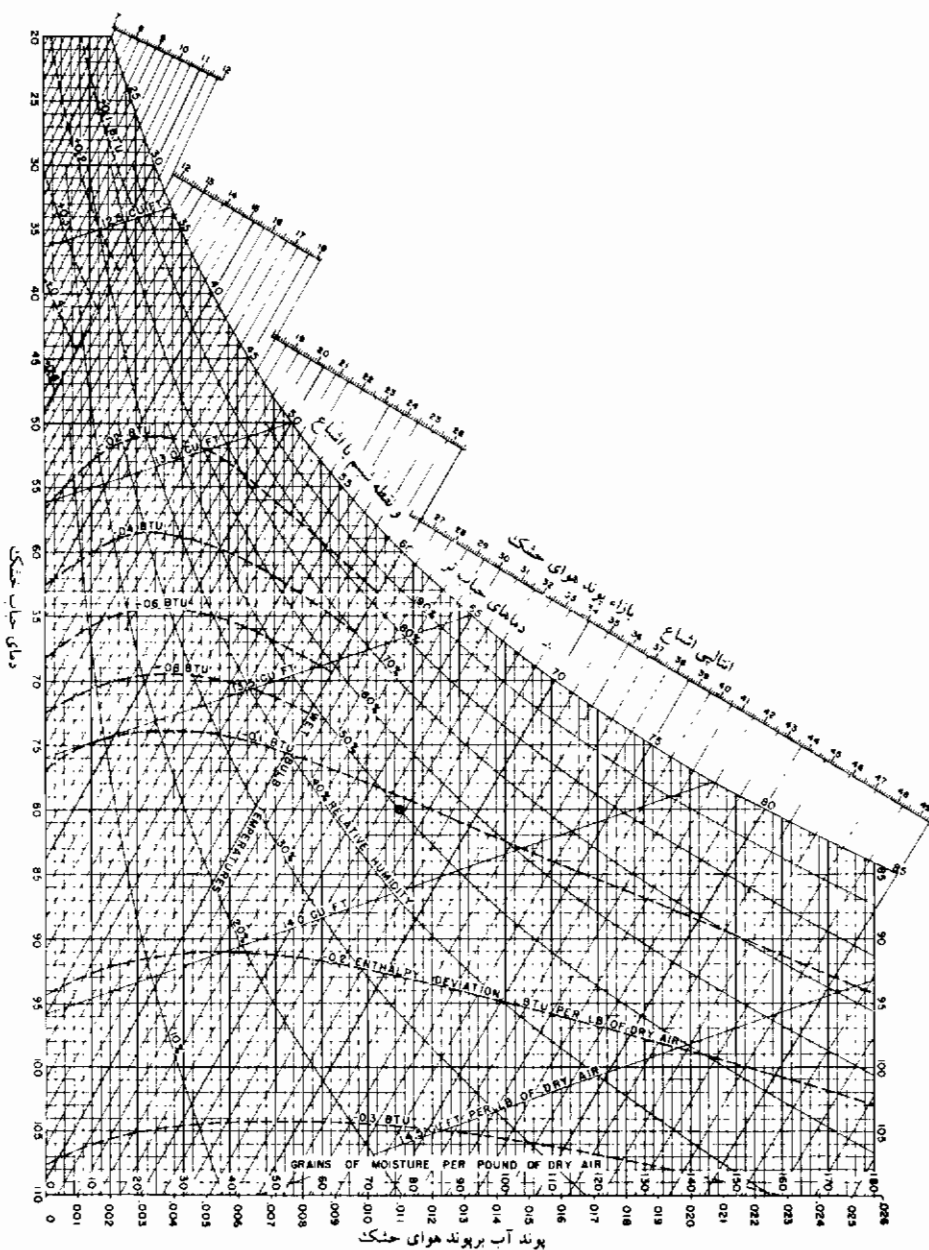


جدول A-۲۰ توابع ضربه قائم یک بعدی برای یک گاز ایده آل  
با گرمای مخصوص و وزن مولکولی ثابت و  $\gamma = 1/4$

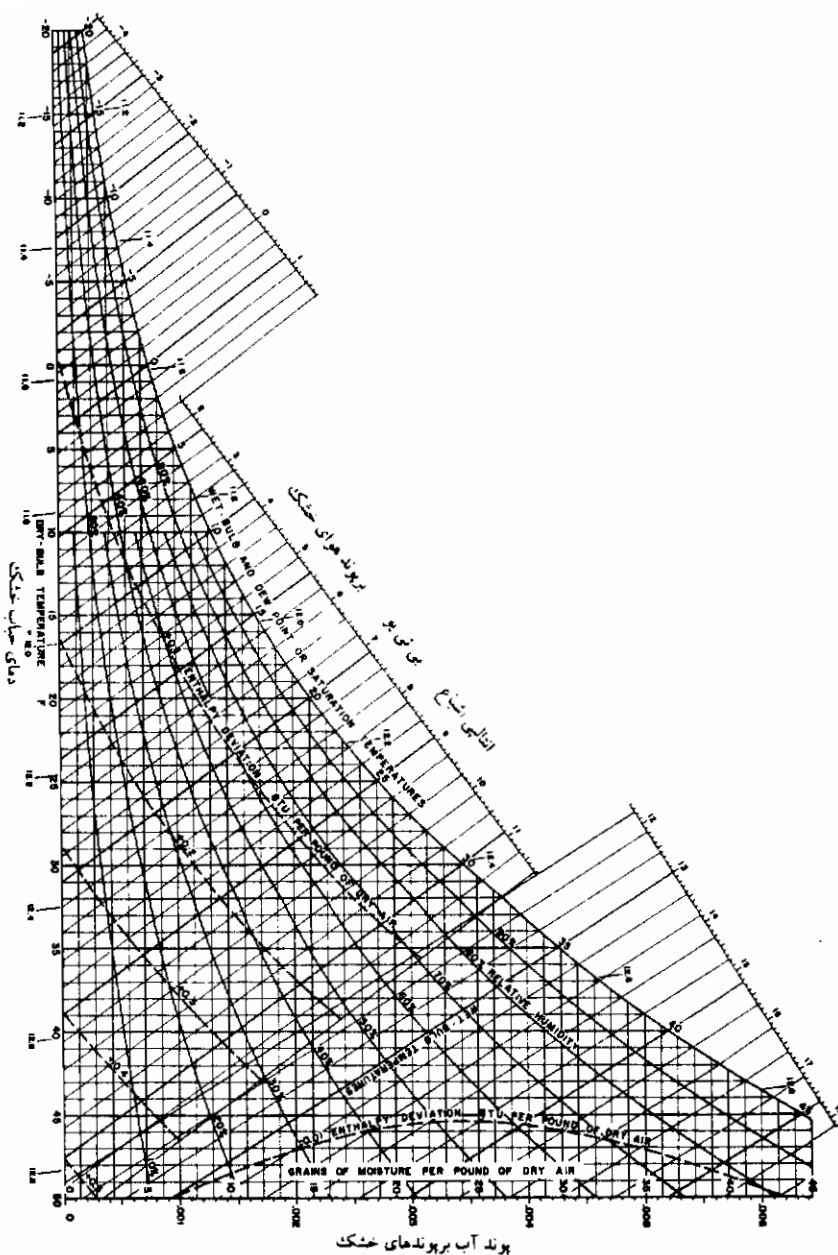
$M_x$	$M_y$	$\frac{p_y}{p_x}$	$\frac{p_z}{p_x}$	$\frac{T_y}{T_x}$	$\frac{p_{0y}}{p_{0x}}$	$\frac{p_{0z}}{p_x}$
1.00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.8929
1.10	0.911 77	1.245 0	1.169 1	1.064 94	0.998 92	2.1328
1.20	0.842 17	1.513 3	1.341 6	1.128 0	0.992 80	2.4075
1.30	0.785 96	1.805 0	1.515 7	1.190 9	0.979 35	2.7135
1.40	0.739 71	2.120 0	1.689 6	1.254 7	0.958 19	3.0493
1.50	0.701 09	2.458 3	1.862 1	1.320 2	0.929 78	3.4133
1.60	0.668 44	2.820 1	2.031 7	1.388 0	0.895 20	3.8049
1.70	0.640 55	3.205 0	2.197 7	1.458 3	0.855 73	4.2238
1.80	0.616 50	3.613 3	2.359 2	1.531 6	0.812 68	4.6695
1.90	0.595 62	4.045 0	2.515 7	1.607 9	0.767 35	5.1417
2.00	0.577 35	4.500 0	2.666 6	1.687 5	0.720 88	5.6405
2.10	0.561 28	4.978 4	2.811 9	1.770 4	0.674 22	6.1655
2.20	0.547 06	5.480 0	2.951 2	1.856 9	0.628 12	6.7163
2.30	0.534 41	6.005 0	3.084 6	1.946 8	0.583 31	7.2937
2.40	0.523 12	6.553 3	3.211 9	2.040 3	0.540 15	7.8969
2.50	0.512 99	7.125 0	3.333 3	2.137 5	0.499 02	8.5262
2.60	0.503 87	7.720 0	3.448 9	2.238 3	0.460 12	9.1813
2.70	0.495 63	8.338 3	3.559 0	2.342 9	0.423 59	9.8625
2.80	0.488 17	8.980 0	3.663 5	2.451 2	0.389 46	10.569
2.90	0.481 38	9.645 0	3.762 9	2.563 2	0.357 73	11.302
3.00	0.475 19	10.333	3.857 1	2.679 0	0.328 34	12.061
4.00	0.434 96	18.500	4.571 4	4.046 9	0.138 76	21.068
5.00	0.415 23	29.000	5.000 0	5.800 0	0.061 72	32.654
10.00	0.387 57	116.50	5.714 3	20.388	0.003 04	129.217
$\infty$	0.377 96	$\infty$	6.000	$\infty$	0	$\infty$

Source: Abridged from J. H. Keenan and J. Kaye, "Gas Tables," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1948.

شکل A-1 نمودار رطوبت نسبی، آحاد انگلیسی،  $p = 1 \text{ atm}$  (انبرکت کوپ)



شکل A-۲ نمودار رطوبت نسبی، دماهای پایین، آحاد انجلیسی،  $P = 1 \text{ atm.}$  (شوکت کوب)





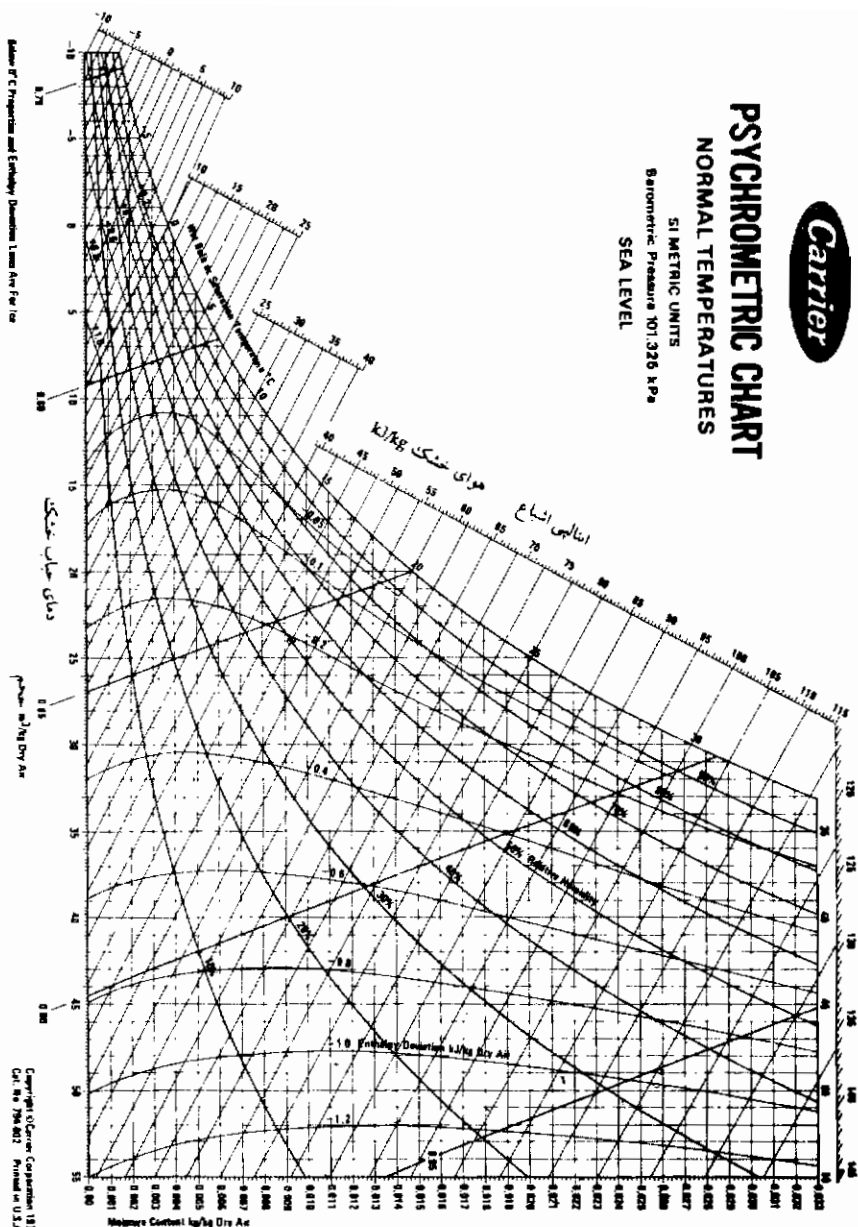
# PSYCHROMETRIC CHART

## NORMAL TEMPERATURES

SI METRIC UNITS

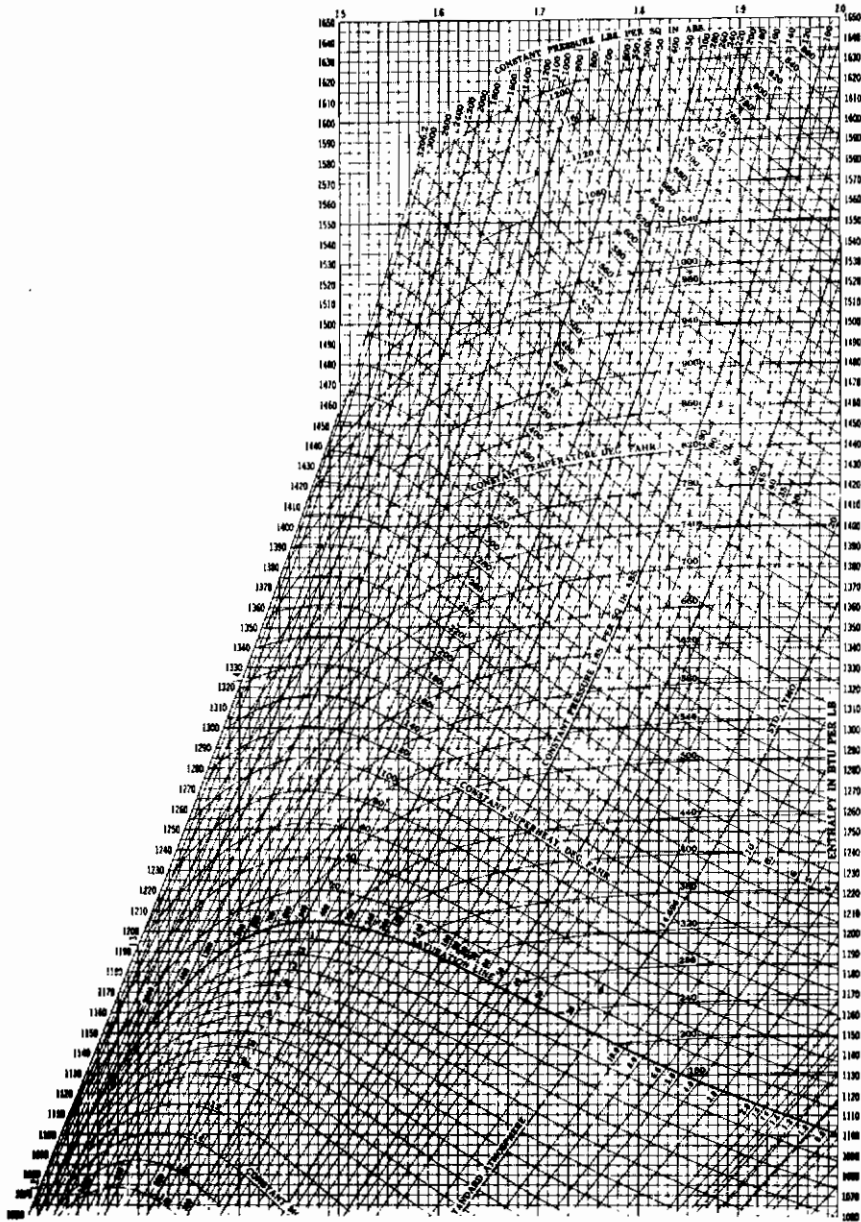
Barometric Pressure 101.326 kPa

SEA LEVEL

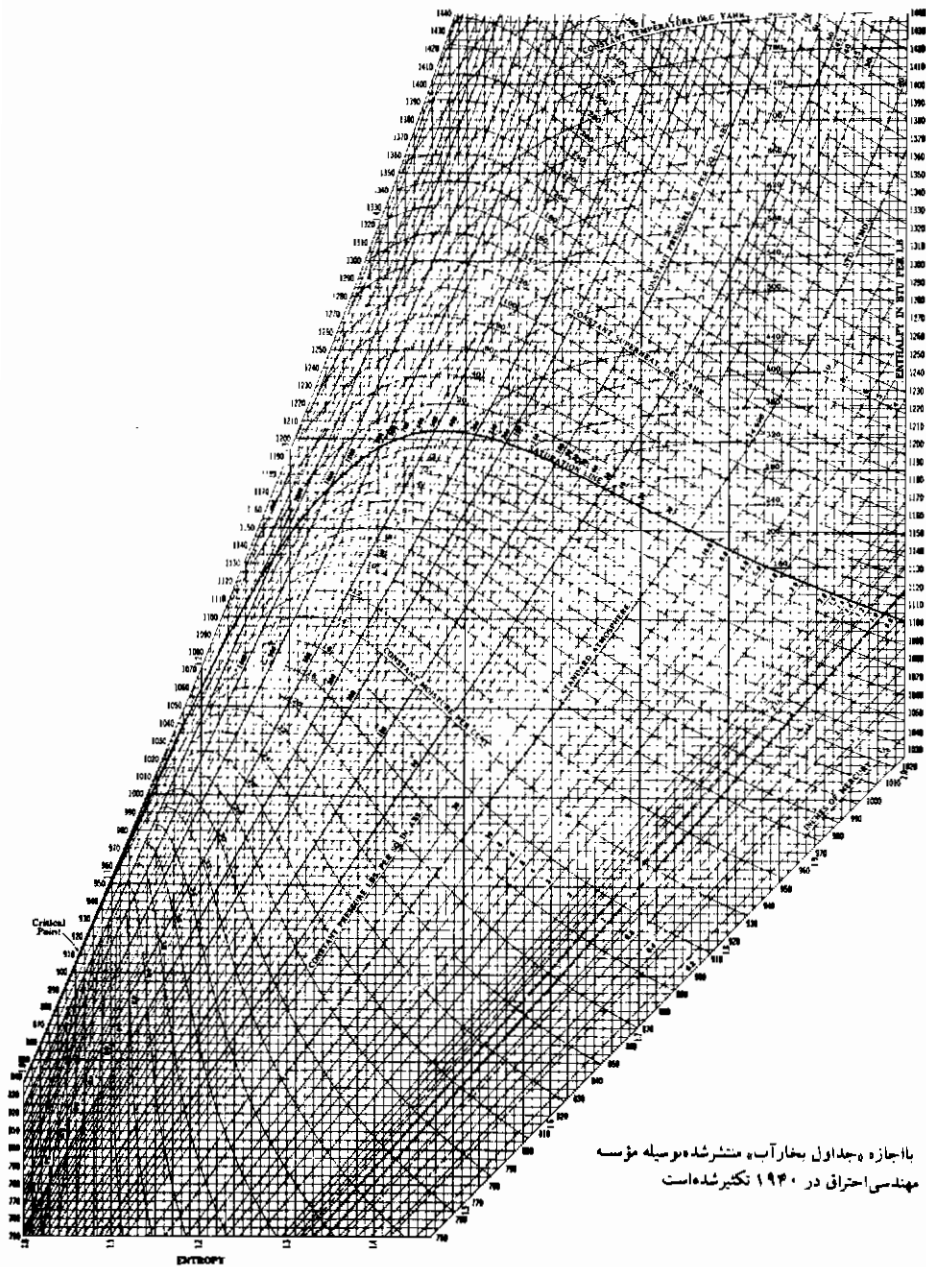


شکل A-3 نمودار رطوبت نسبی، دماهای مطلق، آحاد SI،  $p = 1 \text{ atm}$  (شرکت کربن)

آب و هوا



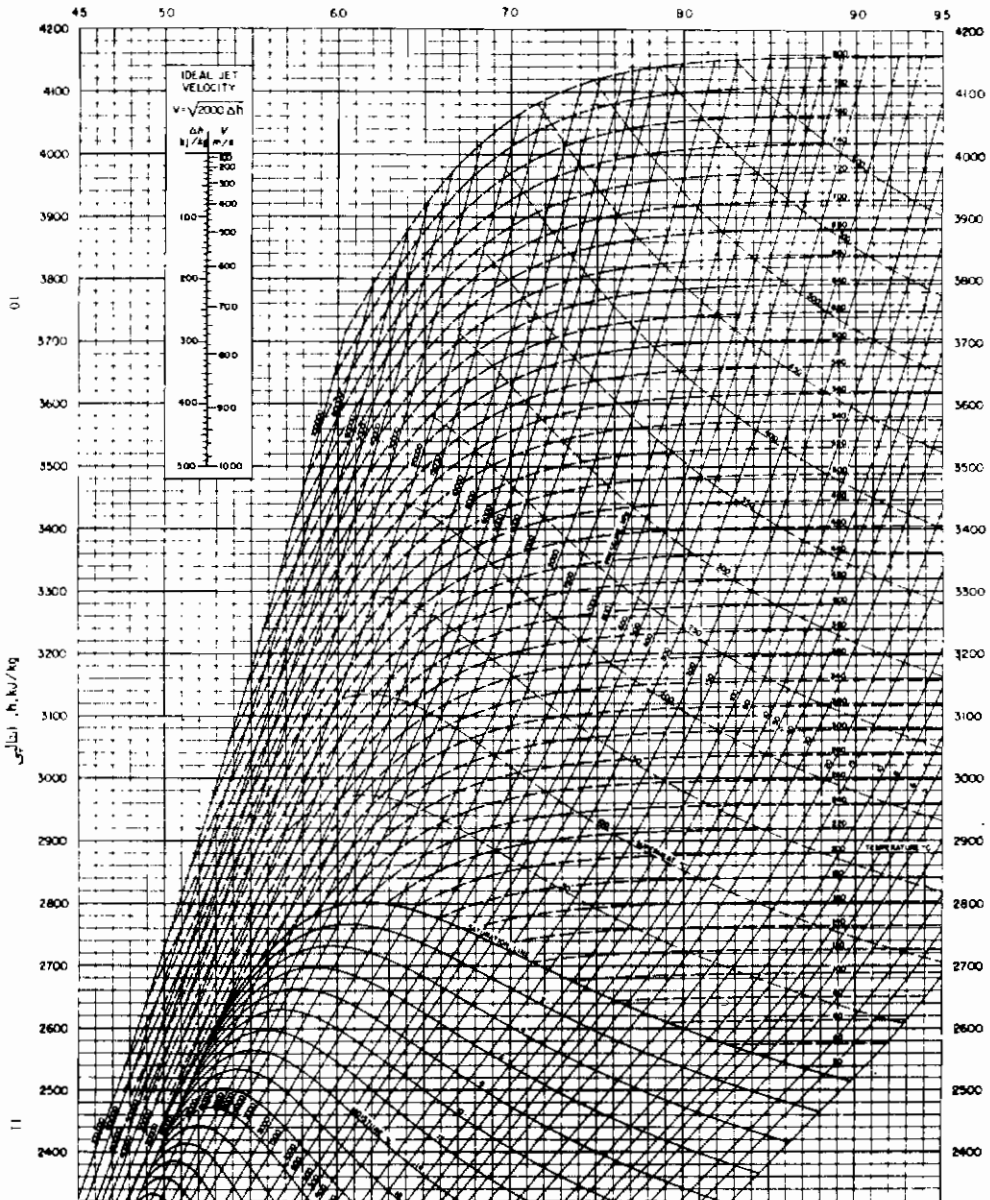
شکل ۲-۸ نمودار مولیر برای بهایر آب، اتحاد انگلیسی



با اجازه جداول بخار آب منتشر شده وسیله مؤسسه  
مهندسی احتراقی در ۱۹۴۰ تکثیر شده است

شکل ۲-۸ (ادامه)

$s$ , kJ/kgK, آنترופی



جدول A-۲M نمودار مولیر برای بخار آب، واحدها SI، (با اجازه انجمن مهندسين مکانیک آمریکا)

جدول B-۲ ضریب هدایت حرارتی چند غیرفلز

ماده	$T, ^\circ\text{C}$	$k, \text{W/m.K}$
مواد ساختمانی و مقاوم حرارتی		
اسفالت:	20-55	0.74
آجر:		
آجر ساختمانی (معمولی)	20	0.69
آجر ساختمانی (نما)	...	1.31
خاک دیاتمی	200	0.24
قالب گرفته و حرارت داده شده	870	0.31
آجر از خاک نسوز، پخته شده در $2426^\circ\text{F}$	500	1.04
	800	1.07
	1100	1.09
سیمان، پورتلند	...	0.29
بتون، مخلوط سنگ ۱-۲-۴	20	1.37
شیشه، پنجره	20	0.78
روکش، سنگ گچ	21	0.48
روکش، توفال فلزی	21	0.47
روکش، توفال چوبی	21	0.28
سنگ:		
گرانیت	...	1.73-3.98
سنگ آهک	100-300	1.26-1.33
چوب، در عرض بافت:		
بالسا، $1/8 \text{ lb/ft}^3$	30	0.055
کاج یا صنوبر زرد	24	0.147
کاج یا صنوبر سفید	30	0.112
مواد عایق:		
ماده نسوز		
صفحه سیمان نسوز	20	0.744
لایه های نسوز	50	0.166
سیمان نسوز	...	2.07
ماده نسوز،	-45	0.148
	0	0.154
	100	0.160
صفحه چوب پنه ای، $10 \text{ lb/ft}^3$	30	0.043
خاک دیاتمی (Sil-o-cel)	0	0.061
صفحه عایق فیبری	21	0.048
پشم شیشه، $1/5 \text{ lb/ft}^3$	24	0.038
کاپوک (الیافی شیشه ابریشم)	30	0.035
اکسید منیزیم، ۸۵%	38	0.067
	93	0.071
	150	0.074
	204	0.080
	23	0.059
خاک اره	32	0.040
پشم سنگ، $10 \text{ lb/ft}^3$		



## جدول B-۳ خواص هوا در فشار آتمسفر

مقادیر  $\mu$ ,  $k$ ,  $c_p$  و  $Pr$  تابع شدید فشار نمی باشند و می توانند برای محدوده وسیعی از فشارها به کار روند.

$T, K$	$\rho, \text{kg/m}^3$	$c_p, \text{kJ/kg}^\circ\text{C}$	$\mu, \text{kg/m}\cdot\text{s} \times 10^5$	$\nu, \text{m}^2/\text{s} \times 10^6$	$k, \text{W/m}^\circ\text{C}$	$\alpha, \text{m}^2/\text{s} \times 10^4$	$Pr$
100	3.6010	1.0266	0.6924	1.923	0.009 246	0.025 01	0.770
150	2.3675	1.0099	1.0283	4.343	0.013 735	0.057 45	0.753
200	1.7684	1.0061	1.3289	7.490	0.01809	0.101 65	0.739
250	1.4128	1.0053	1.5990	11.31	0.02227	0.156 75	0.722
300	1.1774	1.0057	1.8462	15.69	0.02624	0.221 60	0.708
350	0.9980	1.0090	2.075	20.76	0.03003	0.2983	0.697
400	0.8826	1.0140	2.286	25.90	0.03365	0.3760	0.689
450	0.7833	1.0207	2.484	31.71	0.03707	0.4222	0.683
500	0.7048	1.0295	2.671	37.90	0.04038	0.5564	0.680
550	0.6423	1.0392	2.848	44.34	0.04360	0.6532	0.680
600	0.5879	1.0551	3.018	51.34	0.04659	0.7512	0.680
650	0.5430	1.0635	3.177	58.51	0.04953	0.8578	0.682
700	0.5030	1.0752	3.332	66.25	0.05230	0.9672	0.684
750	0.4709	1.0856	3.481	73.91	0.05509	1.0774	0.686
800	0.4405	1.0978	3.625	82.29	0.05779	1.1951	0.689
850	0.4149	1.1095	3.765	90.75	0.06028	1.3097	0.692
900	0.3925	1.1212	3.899	99.3	0.06279	1.4271	0.696
950	0.3716	1.1321	4.023	108.2	0.06525	1.5510	0.699
1000	0.3524	1.1417	4.152	117.8	0.06752	1.6779	0.702
1100	0.3204	1.160	4.44	138.6	0.0732	1.969	0.704
1200	0.2947	1.179	4.69	159.1	0.0782	2.251	0.707
1300	0.2707	1.197	4.93	182.1	0.0837	2.583	0.705
1400	0.2515	1.214	5.17	205.5	0.0891	2.920	0.705
1500	0.2355	1.230	5.40	229.1	0.0946	3.262	0.705
1600	0.2211	1.248	5.63	254.5	0.100	3.609	0.705
1700	0.2082	1.267	5.85	280.5	0.105	3.977	0.705
1800	0.1970	1.287	6.07	308.1	0.111	4.379	0.704
1900	0.1858	1.309	6.29	338.5	0.117	4.811	0.704
2000	0.1762	1.338	6.50	369.0	0.124	5.260	0.702
2100	0.1682	1.372	6.72	399.6	0.131	5.715	0.700
2200	0.1602	1.419	6.93	432.6	0.139	6.120	0.707
2300	0.1538	1.482	7.14	464.0	0.149	6.540	0.710
2400	0.1458	1.574	7.35	504.0	0.161	7.020	0.718
2500	0.1394	1.688	7.57	543.5	0.175	7.441	0.730

Source: From Natl. Bur. Stand. (U.S.) Circ. 564, 1955.

جدول ۲-B خواص آب (مایع اشباع)

°F	°C	$c_p$ , kJ/kg·°C	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$\mu$ , kg/m·s	$k$ , W/m·°C	Pr	$\frac{g\beta\rho^2c_p}{\mu k}$ , 1/m <sup>3</sup> ·°C
32	0	4.225	999.8	$1.79 \times 10^{-3}$	0.566	13.25	
40	4.44	4.208	999.8	1.55	0.575	11.35	$1.91 \times 10^9$
50	10	4.195	999.2	1.31	0.585	9.40	$6.34 \times 10^9$
60	15.56	4.186	998.6	1.12	0.595	7.88	$1.08 \times 10^{10}$
70	21.11	4.179	997.4	$9.8 \times 10^{-4}$	0.604	6.78	$1.46 \times 10^{10}$
80	26.67	4.179	995.8	8.6	0.614	5.85	$1.91 \times 10^{10}$
90	32.22	4.174	994.9	7.65	0.623	5.12	$2.48 \times 10^{10}$
100	37.78	4.174	993.0	6.82	0.630	4.53	$3.3 \times 10^{10}$
110	43.33	4.174	990.6	6.16	0.637	4.04	$4.19 \times 10^{10}$
120	48.89	4.174	988.8	5.62	0.644	3.64	$4.89 \times 10^{10}$
130	54.44	4.179	985.7	5.13	0.649	3.30	$5.66 \times 10^{10}$
140	60	4.179	983.3	4.71	0.654	3.01	$6.48 \times 10^{10}$
150	65.55	4.183	980.3	4.3	0.659	2.73	$7.62 \times 10^{10}$
160	71.11	4.186	977.3	4.01	0.665	2.53	$8.84 \times 10^{10}$
170	76.67	4.191	973.7	3.72	0.668	2.33	$9.85 \times 10^{10}$
180	82.22	4.195	970.2	3.47	0.673	2.16	$1.09 \times 10^{11}$
190	87.78	4.199	966.7	3.27	0.675	2.03	
200	93.33	4.204	963.2	3.06	0.678	1.90	
220	104.4	4.216	955.1	2.67	0.684	1.66	
240	115.6	4.229	946.7	2.44	0.685	1.51	
260	126.7	4.250	937.2	2.19	0.685	1.36	
280	137.8	4.271	928.1	1.98	0.685	1.24	
300	148.9	4.296	918.0	1.86	0.684	1.17	
350	176.7	4.371	890.4	1.57	0.677	1.02	
400	204.4	4.467	859.4	1.36	0.665	1.00	
450	232.2	4.585	825.7	1.20	0.646	0.85	
500	260	4.731	785.2	1.07	0.616	0.83	
550	287.7	5.024	735.5	$9.51 \times 10^{-5}$			
600	315.6	5.703	678.7	8.68			

Source: Adapted from A. I. Brown and S. M. Marco, "Introduction to Heat Transfer," 3d ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1958.

## فرهنگ لغات علمی

(A)	نقطه مرگ پایین (bdc) Bottom dead center
Absolute pressure فشار مطلق	مرز سیستم Boundary of system
Absorption refrigeration cycle	دمای توده Bulk temperature
سیکل تبرید جذبی	
Absorptivity ضریب جذب	(C)
Adiabatic آدیاباتیک، بی دررو	مجموعه متعارفی Canonical ensemble
Air/fuel ratio نسبت هوا به سوخت	Centrifugal Compressor
Availability دسترس پذیری - قابلیت کاردهی	کمپرسور گریز از مرکز
Available Energy	دمای مشخصه Characteristic temperature
انرژی دسترس پذیر - انرژی مفید	تبادل شیمیائی Chemical equilibrium
Axial compressor کمپرسور محوری	جریان خفه شده (اختناقی) Choked flow
	حجم مرده Clearence volume
(B)	سیستم بسته Closed system
Blackbody radiation تابش جسم سیاه	ذغال سنگ Coal
Boiler دیگ بخار - بویلر	ضریب تخلیه Coefficient of discharge
Bose-Einstein Statistics آمار بوز - اینشتین	ضریب انبساط Coefficient of expansion

Coefficient of performance	ضریب عملکرد	Curie substance	ماده کوری
Combinations	ترکیبات	Cut-off ratio	نسبت قطع - سوخت
Combustion	احتراق	Cycle	سیکل - چرخه
Compressed liquid	مایع تراکم شده		
Compressibility factor	ضریب تراکم پذیری	(D)	
Compression ratio	نسبت تراکم	Debye temperature	دمای دبی
Condensate	حاصل تقطیر	Degeneracy	تبهنگی، چندگانگی
Condenser	چگالنده - کندانسور	Degree of reation	درجه واکنش
Conduction	هدایت	Dehumidification	رطوبت زدایی
Conduction band	نوار هدایت	Detached	مجزاً
Conduction shape factor		Deviation	انحراف
	ضریب شکل هدایت	Dew point	نقطه شبنم
Conservation of energy	بقای انرژی	Diesel cycle	سیکل دیزل
Continuum	(محیط) پیوسته، یکپارچه	Diffuser	پخش کن
Control volume	حجم کنترل، حجم معیار	Dimension	بُعد - مختصات
Convection	جابجایی	Discrete quanta	کوانتاهای (پیمانه‌های) مجزاً
Converging-diverging nozzle		Dissociation	تجزیه، تفکیک
	شیپوره همگرا-واگرا	Divergent	واگرا
Conversion factors	ضرایب تبدیل	Double-pipe heat exchange	
Cooling towers	برج‌های خنک کن		مبدل حرارتی دو لوله
Corresponding states principle		Downstream	پایین دست جریان
	قانون حالات متشابه	Dry-bulb temperature	دمای حباب خشک
Counterflow	ناهمسو		
Critical point	نقطه بحرانی	(E)	
Cross flow	جریان عمودی	Economizer	صرفه جو

Effectiveness	ضریب سودمندی	Feed water heater	گرمکن آب تغذیه
Efficiency	بازده	Fermi-Dirac distribution	
Emissive power	توان تابشی		توزیع فرمی - دیراک
Emissivity	ضریب صدور تشعشعی	Fermi level	تراز فرمی
Endothermic reaction	واکنش گرماگیر	Fins	فینها - پره‌ها
Ensemble	مجموعه	Flow work	کار جریان
Environment	محیط	Flux	شار
Enthalpy deparature	انحراف انتالپی	Fluid	سیال
Entbalpy of formation	انتالپی تشکیل	Forced convection	جابجایی اجباری
Entropy	آنتروپی	Four-cycle engine	موتور چهار زمانه
Equations of state	معادلات حالت	Fractional populations	تجمعات جزئی
Equilibruium constant	ثابت تعادل	Free convection	جابجایی آزاد
Equipartition of energy	هم افراز انرژی	Fuel injection	تزریق سوخت
Evaporative cooling	سرمایش تبخیری	Fusion	ذوب، جوش
Evaporator	تبخیر کننده - اواپراتور		
Exact differential	دifferansiel دقیق	(G)	
Exothermic reaction	واکنش گرمازا	Gage pressure	فشارنسبی، فشار اندازه گیری شده بوسیله فشار سنج
Excess air	هوای اضافی	Gas turbine cycle	سیکل توربین گازی
Expansion valve	شیر انبساطی	Generalized charts	نمودارهای عمومی
Extensive property	خاصیت گسترده	Gibbs phase rule	قانون فاز گیبس
Extraction	برداشت	Grand canonical ensemble	
Extrapolate	برون یابی		مجموعه متعارفی بزرگ
	(F)	Gravitational Constant	ثابت جاذبه (ثقلی)
Fanno line	خط فانو	Gray body	جسم خاکستری

(H)		Information theory	تئوری اطلاعات
Heat capacity	ظرفیت حرارتی	Intensive property	خاصیت متمرکز
Heat of formation	حرارت تشکیل	Intercooler	میان سردکن
Heat exchangers	مبدل‌های حرارتی	Internal combustion engines	موتورهای احتراق داخلی
Heat pump	پمپ حرارتی	Intrinsic semiconductor	نیمه هادی ذاتی
Heisenberg uncertainty principle	اصل عدم قطعیت هایزنبرگ	Inversion curve	منحنی معکوس
Heterogenous	ناهمگن	Ionization	یونیزاسیون
Higher heating values	ارزش حرارتی بالایی	Irradiation	تابش حرارتی
Holes in semiconductors	حفره‌ها در نیمه هادیها	Irreversibility	برگشت ناپذیری
Homogeneous	همگن	Isenthalpic	انتالپی ثابت
Hot well	چاه گرم	Isentropic	آنتروپی ثابت - آیزنتروپیک
Humidification	رطوبت زنی	Isobaric	فشار ثابت
Hybrid cycles	سیکلهای پیوندی	Isochoric	حجم ثابت
Hydrocarbon	هیدروکربن	Isolated system	سیستم منزوی - سینم ایزوله
Hyperbolic functions	توابع هپربولیک	Isothermal	دما ثابت
(I)		(J)	
Ice point	نقطه انجماد آب - نقطه یخ	Jet propulsion	محرک جت
Ideal gas	گاز ایده‌آل	Joule	ژول (واحد انرژی)
Incremental displacement	جاب‌جایی نموی	(K)	
Inequality of clausius	ناابرابری کلاسیوس	Kay's rule for mixtures	روش کی برای مخلوطها
Inexact differential	دیفرانسیل غیر تحقیق	Kilopond force	کیلو پوند نیرو
Inflection point	نقطه عطف		

Kinetic energy انرژی جنبشی

## (L)

Lattice energy انرژی شبکه

Law of corresponding states

اصل حالات مشابه

Lifting action عمل خیزش

Liquid مایع

Lithium bromides برومید لیتیم

Lost work کار از دست رفته - کار تلف شده

Lower heating value ارزش حرارتی پایینی

Lumped capacity ظرفیت توده

## (M)

Mach cone مخروط ماخ

Mach number عدد ماخ

Macrostate حالت ماکروسکوپی

Magnetism مغناطیس

Magnetization مغناطیس کردن

Magnetocaloric اثر ماگنتو کالریک

Mass action law قانون فعالیت جرم

Mass conservation principle اصل بقای جرم

Maximum work کار حداکثر

Maxwell-Boltzmann Statistics

آمار ماکسول - بولتزمن

Maxwell relations روابط ماکسول

Maxwell's demon شیطانک ماکسول

Metastable equilibrium تعادل موقتی

Microcanonical ensemble

مجموعه متعارفی جزئی

Mixture مخلوط

Moisture رطوبت

Mole fraction نسبت مولی

Molecular weight وزن ملکولی

Mollier diagram نمودار مولیر

Momentum flux شار معتموم

Monatomic gas گاز تک اتمی

Multiplier effect اثر تکبیری

## (N)

Nelson-Obert calculation chart

منحنیهای محاسباتی نلسون - اوبرت

Newton's law of cooling

قانون سرمایشی نیوتن

Normal shock wave موج ضربه‌ای قائم

Nozzle شپوره

## (O)

Oblique shock ضربه مایل

Open system سیستم باز

Optimum	بهینه، اَپتیمم	ضریب بازیافت فشار
Otto cycle	سیکل اتو	احتمال
Overall heat-transfer coefficient		محصولات احتراق
	ضریب انتقال حرارت کلی	خواص
		نیروی محرکه
	(P)	Pseudo-critical constants
Partial pressure	فشار جزئی	ثوابت شبه بحرانی
Partition function	تابع افزایش - تابع تقسیم	نمودار رطوبت سنجی
Perfect gas	گاز کامل	کار پمپ
Permutations	تبدیلات	ماده خالص
Perpetual motion machine of second kind		
	ماشین حرکت دائم از نوع دوم	(Q)
Phase equilibrium	تعادل فازی	کیفیت
Photon gas	گاز فوتون	کمیت
Physical constants	ثوابت فیزیکی	شبه تعادلی
Point function	تابع نقطه‌ای	
Polytropic process	فرایند پلی تروپیک	(R)
Population	تجمع	چگالی تابش
Porous plug experiment		انتقال حرارت تابشی
	آزمایش تویی متخلخل	رادیوسیتی
Potential energy	انرژی پتانسیل	خط رایلی
Power cycles	سیکلهای قدرت	رام جت
Prandtl number	عدد پранتل	معادله شدت
Preheater	پیش گرمکن	واکنش کننده‌ها
Pressure recovery factor		گاز حقیقی



Reduced pressure	فشار کاهش یافته	Shock waves	امواج ضربه‌ای
Reflectivity	ضریب انعکاس	Specific heat	گرمای ویژه - حرارت مخصوص
Refrigeration cycle	سیکل تبرید	Specific humidity	رطوبت مخصوص
Refrigerant	مبرد - ماده سرمازا	Specific impulse	ضربه مخصوص
Reference level	تراز مبنا	Squirrel cage blower	دمندهٔ فنس سنجابی
Regeneration	بازیابی	Stagnation properties	خواص سکون
Regenerator	بازیاب	Stagnation state	حالت سکون
Reheat	بازگرم	State principle	اصل حالت
Relative humidity	رطوبت نسبی	Static properties	خواص استاتیک
Relative pressure	فشار نسبی	Steady flow	جریان دائم
Reversible adiabatic process	فرآیند آدیاباتیک برگشت پذیر	Steam trap	نله بخار
Rocket	راکت	Stirling cycle	سیکل استرلینگ
Rotational characteristic temperature	دمای مشخصهٔ چرخشی	Stirling's approximation	تقریب استرلینگ
Rule of corresponding states	قانون حالات متقابل	Subcooled liquid	مایع مادون سرد
(S)		Sublimation	تصعید
Saturated liquid	مایع اشباع	Subsonic flow	جریان مادون صوت
Saturated vapor	بخار اشباع	Superheat	داغ - فوق گرم
Semiconductors	نیمه هادیها	Supersaturation	فوق اشباع
Sequence	دنباله	Supersonic flow	جریان مافوق صوت
Shape factor	ضریب شکل	Surroundings	محیط
Shear force	نیروی برشی	System	سیستم
		(T)	
		Temperature	دما
		Theoretical air	هوای تئوری

Thermal conductivity ضریب هدایت گرمایی

Thermodynamic probability

احتمال ترمودینامیکی

Thermometer دماسنج

Throat in sonic flow

گلوگاه در جریان صوتی

Throttling process فرآیند خفگی (اختناقی)

Thrust نیروی پیش برنده

Top dead center (t.d.c.) نقطه مرگ بالا

Transmissivity ضریب عبور

Trap تله

Triple point نقطه سه گانه

Turbojet engine موتور توربوجت

Two-cycle engine موتور دوزمانه

(U)

Undetermined multipliers ضرایب نامعین

Uniform یکسان - یکنواخت

Units واحدها

Universal gas constant

ثابت عمومی (همگانی) گازها

Upstream بالا دست جریان

(V)

Vacuum pressure فشار خلاء

Valence band نوار والانس

Vapor refrigeration cycle

سیکل تبرید بخار

Vaporization line خط تبخیر

Vibrational characteristic temperature

دمای مشخصه ارتعاشی

Virial equation of state معادله ویرال حالت

Viscosity لزجت - گران روی

Volume coefficient of expansion

ضریب انبساط حجمی

Volume fraction نسبت حجمی

Volumetric efficiency بازده حجمی

(W)

Water آب

Water vapor بخار آب

Weight وزن

Wet-bulb Temperature دمای حباب تر

Work modes حالات کار

Working fluid سیال عامل

(Z)

Zeroth law of thermodynamics

قانون صفرم ترمودینامیک

Zone of silence ناحیه سکوت

## واژه‌یاب فارسی

آب:	«آ»
- بعنوان مبرد، ۶۹۵	- گاز حقیقی، ۳۸۸
- تراکم دما ثابت، ۱۷۵	- مطلق، ۵۱۵
- خواص، ۹۵۹	- آیزنتروپیک:
- آحاد، ۴۴	- تعریف فرآیند، ۲۷۳
- الکتریکی و مغناطیسی، ۵۴	- حالت سکون، ۷۲۹
- انرژی حرارتی، ۴۹	- اینشتین، دما، ۹۱۸
- ضرایب تبدیل، ۹۵۲	«الف»
- SI، پیشوندها، ۵۱	- اتو، سیکل، ۶۴۱
- آزمایش تویی متخلخل، ۲۳۰	- بازده، ۶۴۱
- آماگات - لدوک، قانون جمع حجمها، ۴۲۰	- احتراق، خواص محصولات، ۵۱۱
- آمونیاک:	- احتراق، عمومی:
- بعنوان مبرد، ۶۸۵	- محصولات، ۵۰۸
- خواص، ۹۷۸	- نسبت‌های استوکیومتری، ۵۰۸
- آنتروپی:	- واکنش کننده‌ها، ۵۰۷
- اصل افزایش، ۲۷۱	- هوای اضافی، ۵۰۸
- تعریف ماکروسکپی، ۲۷۰	- هیدروکربن‌ها، ۵۰۹
- در ترمودینامیک آماری، ۸۸۴	- احتمال، ۸۵۵
	- احتمال ترمودینامیکی، ۸۶۵

- ارزش حرارتی : انتقال حرارت، ۷۸۵
- بالایی، ۵۲۰
- پائینی، ۵۲۰
- استاتیک، خواص، ۷۳۱
- استرلینگ :
- تقریب سازی، ۸۷۴
- سیکل، ۶۴۹
- استفان - بولتزمن، قانون، ۸۱۱، ۹۴۰
- اشباع :
- بخار، ۱۵۴
- مایع، ۱۵۴
- نواحی، ۱۵۴
- اشباع آدیاباتیک، ۴۳۱
- مربوط به دمای حباب تر، ۴۳۳
- اطلاعات، تئوری، ۳۱۷
- افراز، تابع :
- تعریف، ۸۸۶
- مربوط به خواص ترمودینامیکی، ۸۹۸
- اصل انحصار پاولی، ۹۲۳
- اصل حالات متشابه، ۳۷۶
- اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، ۸۶۰
- امواج ضربه‌ای، ۷۴۸
- در گذرگاههای همگرا - واگرا، ۷۵۳
- انبساط گاز تا سرعتهای بالا، ۲۱۵
- انتالپی :
- تشکیل، ۵۱۳
- تعریف، ۱۰۰
- سکون، ۷۳۰
- گاز ایده‌آل، ۱۰۴
- گاز حقیقی، ۳۸۷
- انتقال حرارت، ۷۸۵
- تابشی، ۷۸۶، ۸۱۱
- جابجایی، ۷۸۶، ۷۹۸
- هدایت، ۷۸۶، ۷۸۷
- انرژی آزاد، ۵۵۲
- انرژی پتانسیل، ۹۱
- انرژی جنبشی، ۹۱
- انرژی داخلی، ۹۱
- حرارتی، ۹۷
- رابطه عمومی، ۳۴۸
- گاز ایده‌آل، ۱۰۴
- مخلوطها، ۴۲۳
- انرژی دسترس پذیر، ۲۸۹
- انرژی شبکه، ۹۲۴
- انرژی شیمیایی، ترازهای مبنا، ۵۱۵
- انرژی مفید، ۲۸۹
- «ب»
- بازده، ۵۹۸
- بازیاب، ۶۵۵
- پمپ، ۶۱۴
- توربین، ۶۱۴
- سیلکهای اتو و دیزل، ۶۴۵
- کمپرسور، ۶۳۱
- بازده حجمی، ۶۳۴
- برگشت پذیر، فرآیند :
- آدیاباتیک، ۲۷۴
- تعریف، ۲۶۰
- برگشت ناپذیری :
- در دیگ بخار، ۶۶۸

- در توربین بخار، ۳۱۱  
 - در جریان دائم، ۲۹۶  
 - در مشعل، ۵۳۶  
 - در واکنش احتراق، ۵۴۰  
 بازیاب برای توربین گاز، ۶۵۴  
 - بازده، ۶۵۵  
 بتی بریجمن، معادله، ۳۷۱  
 بحرانی:  
 - ثابتها، ۳۷۰، ۹۵۶  
 - نقطه، ۱۵۴  
 - خواص، در جریان شیپوره، ۷۴۰  
 بخار:  
 - اشباع، ۱۵۴  
 - جریان در شیپوره، ۷۶۴  
 - رطوبت، ۱۵۵  
 - داغ (فوق گرم)، ۱۵۷  
 - کیفیت، ۱۵۵  
 بخار آب، خواص:  
 - در فشار پایین، ۴۳۴  
 - در دماهای پایین، ۴۳۴  
 بخار، سیکل تبرید، ۶۸۵  
 بخار، سیکل‌های قدرت، ۵۹۹  
 برج‌های خنک‌کن، ۴۶۴  
 برومید لیتیم بعنوان جذب کننده، ۶۹۵  
 برنولی، معادله، ۷۳۷  
 بقاء، اصل:  
 - انرژی، ۷۹، ۱۹۳  
 - جرم، ۱۹۳  
 بوز-اینشتین، مدل آماری، ۸۷۲، ۸۷۵  
 - بکار گرفته در گاز فتون، ۹۳۷  
 برایتون، سیکل، ۶۵۱  
 «پ»  
 پتانسیل شیمیایی، تعریف، ۵۷۰  
 پخش کن:  
 - بازده، ۷۷۱  
 - جریان مافوق صوت، ۷۳۸  
 - ضریب بازیافت فشار، ۷۷۰  
 پراشتل، عدد، ۸۰۱  
 پلی تروپیک، فرآیند، ۱۲۰  
 - کار، ۱۲۲  
 پمپ:  
 - آدیاباتیک، کار، ۲۰۱  
 - حرارتی، ۶۸۸  
 پیوسته، محیط، ۵۹  
 پیوندی، سیکل‌ها، ۶۷۶  
 «ت»  
 تابش:  
 - انتقال حرارت، ۸۱۱  
 - جسم سیاه، ۹۳۶  
 - چگالی  
 - روش شبکه، ۸۱۷  
 - ضریب شکل، ۸۱۴  
 - فرمول پلانک، ۹۴۰  
 - حرارتی، ۸۱۵  
 تبخیر، ۱۵۳  
 تبرید، سیکل‌ها، ۶۸۵  
 - جذبی، ۶۹۳  
 تبهگنی، ۸۶۲

تجزیه، ۵۴۹

- ثابتهای تعادلی برای، ۵۵۲  
- ترمودینامیک:

- قانون اول، ۴۰، ۹۵

- قانون دوم، ۴۰، ۲۵۷

- قانون سوم، ۵۷۷

- قانون صفرم، ۳۰

- کاربردها، ۴۱

- تزریق سوخت، ۶۴۶

- تصعید، ۱۵۳

- تعادل:

- بحث عمومی، ۲۹

- در واکنشهای چندتایی، ۵۶۳

- در واکنشهای شیمیایی، ۵۴۸

- شیمیایی گازهای ایده آل، ۵۵۳

- فازی، ۵۷۰

- مربوط به ترمودینامیک آماری، ۸۸۰

- تله بخار، ۶۰۹

- توان تابشی، ۸۱۲، ۹۴۰

- توربین گازی:

- سیکل، ۶۵۱

- بابازایب، ۶۵۴

- برای توربوجت، ۶۷۸

- توربوجت، موتور، ۶۷۸

- تئوری:

- اطلاعات، ۳۱۶

- کالریک، ۹۸

ثابت تعادل، ۵۵۲

- مربوط به حرارت واکنش، ۵۶۸

- ثابت ثقلی (جاذبه)، ۵۳

- ثابت گاز:

- برای مخلوط، ۴۱۸

- تعریف، ۶۳

- عمومی، ۶۳

- مربوط به گرماهای ویژه، ۱۰۵

- ثابتهای بحرانی، ۳۷۰، ۹۵۶

- ثابتهای شبه بحرانی، ۴۷۰

- ثابتهای فیزیکی، ۹۵۱

«ج»

- جابجایی:

- آزاد، ۷۹۸

- ضریب انتقال حرارت، ۷۸۶

- مکانیزم، ۷۹۸

- جداول گاز، ۳۵۴

- جریان خفه شده (اختناقی)، ۷۴۱

- جریان دائمی:

- تابع کاردهی، ۲۹۸

- مقدار کاردهی در، ۲۹۶

- معادله انرژی، ۱۹۷

- جریان شیپوره، خواص بحرانی، ۷۴۰

- جریان مافوق صوت، ۷۳۷

- جسم خاکستری، ۸۱۲

ح

«ح»

- حالات کار، ۱۵۲

«ث»

- ثابت بولتزمن در توزیعهای آماری، ۸۸۹

حالات متشابه، قانون، ۳۷۶

- تأیید آزمایشی، ۳۷۸

حالت:

- اصل، ۱۵۱

- بحث عمومی، ۲۷

- سکون، ۷۲۹

- معادلات، ۳۶۷

حجم ثابت، فرآیند، ۱۲۰

حجم کنترل، ۱۹۳

- انباشت در، ۱۹۳

- تحلیل قانون دوم، ۲۹۴

حجم مرده، ۶۲۵

حرارت:

- تابع مسیری، ۹۸

- تشکیل، جداول، ۹۵۸

- قرار داد علامت، ۹۸

- واکنش، ۵۱۹

- مربوط به ثابت تعادل، ۵۶۹

حفره‌ها در نیمه هادیها، ۹۳۳

«خ»

خفگی، فرآیند، ۲۲۹

- خطوط انتالی ثابت در، ۲۳۰

خنک‌کن میانی، ۶۳۱

خواص:

- ساخت جداول، ۳۶۴

- سکون، ۷۳۱

- تعداد لازم برای ماده، ۱۱

- گسترده، ۳۹، ۱۵۰

- متمرکز، ۳۹، ۱۵۰

- مربوط به حالت، ۳۵

«د»

دالتون، قانون جمع فشارها، ۴۶۸

درجه آزادی، ۵۷۵

- برای واکنشهای شیمیایی، ۵۷۶

درجه اشباع، ۴۳۱

درجه واکنش، ۵۴۹

دما:

- بحث عمومی، ۳۰

- ترمودینامیکی، ۲۶۴

- حباب تر، ۴۲۸

- حباب خشک، ۴۲۸

- سکون، ۷۳۱

- نقطه شبنم، ۴۲۸

دما ثابت:

- ضریب، ۲۳۱

- ضریب تراکم پذیری، ۱۷۴

- فرآیند، کارگاز ایده‌آل، ۱۱۶

دماسنج، گاز ایده‌آل، ۶۶

دمای اینشتین، ۹۱۸

دمای توده (انبوه)، ۸۰۰

دمای دبای، ۹۲۰

دمای آدیاباتیک شعله، ۵۲۷

دمای فیلم، ۸۰۰

دمای مشخصه:

- برای ارتعاش، ۹۰۹

- برای حرکت، ۷۷

دمای، ۳۷۱

دیزل، سیکل، ۶۴۴

- بازده، ۶۴۵

- «ر»  
 رادیو سیتی، ۸۱۵  
 راکت، ۶۸۳  
 رام جت، ۶۸۱  
 رانکین، سیکل، ۶۰۰  
 - با بازگرم، ۶۰۳  
 - با بازیاب، ۶۰۶  
 رایلی، خط، ۷۵۰  
 رطوبت (moisture)، ۱۵۵  
 رطوبت (humidity)، ۷۲۹  
 رطوبت زدایی، ۴۴۳  
 رطوبت زنی، ۴۴۷  
 رطوبت سنجی، نمودار، ۴۴۱  
 - برای مقاصد محاسباتی، ۱۰۰۲  
 رطوبت مخصوص، ۷۲۹  
 رطوبت نسبی، ۷۲۹  
 رینولدز، عدد، ۸۰۰
- «س»  
 سرعت صدا، ۷۳۵  
 سرعت صوت، ۷۳۱  
 سرمایش تبخیری، ۴۴۵  
 سکون:  
 - انتالی، ۷۳۰  
 - حالت، ۷۲۹  
 - خواص، ۷۳۱  
 - دما، ۷۳۱
- سیستم، ۲۷  
 - باز، ۱۹۱  
 - بسته، ۱۹۱  
 - ترمودینامیکی، ۲۷  
 - واحد SI، ۵۶  
 سیستم باز، حالات خاص، ۱۹۹
- «ش»  
 شیپوره:  
 - انبساط، ۷۳۷  
 - بازده، ۷۶۹  
 - جریان فوق اشباع در، ۷۶۵  
 - جریان ما فوق صوت در، ۷۳۷  
 - ضریب تخلیه، ۷۷۰  
 - ضریب سرعت، ۷۷۰  
 شیپوره همگرا-واگرا، ۷۳۸  
 شیر انبساطی، ۶۸۶
- «ض»  
 ضربه مخصوص، ۶۸۴  
 ضرایب تبدیل، ۹۵۲  
 ضریب انبساط حجمی، ۱۷۴  
 - جدول بندی شده، ۱۷۷  
 ضریب انتقال حرارت:  
 - جابجایی، ۷۸۶  
 - کلی، ۸۳۱  
 ضریب انعکاس، ۸۱۳  
 ضریب تراکم پذیری:  
 - دما ثابت، ۱۷۴  
 - عمومی، ۳۷۵



- ضریب جذب، ۸۱۳  
 ضریب دما ثابت، ۲۳۱  
 ضریب ژول - تامسون، ۲۳۰  
 ضریب سودمندی مبدل حرارتی، ۸۳۲  
 ضریب صدور تشعشی، ۸۱۲  
 ضریب عبور، ۸۱۳  
 ضریب عملکرد، ۵۹۹  
 ضریب شکل :  
 - تابش، ۸۱۴  
 - جدول، ۷۹۲  
 - هدایت، ۷۹۱
- «ظ»  
 ظرفیت توده، ۷۹۶
- «ف»  
 فاز :  
 - تعادل، ۵۷۰  
 - فضا، ۸۵۷  
 فاز، قانون، ۵۷۴  
 - برای واکنشهای شیمیایی، ۵۷۶  
 فانو، خط، ۷۵۰  
 فتون، گاز، ۹۳۶  
 فرمی، تابع، ۹۲۶  
 فرمی، تراز، ۹۲۵  
 - مربوط به نوار ممنوع، ۹۳۲  
 فرمی - دیراک :  
 - توزیع، ۹۲۴  
 - مدل آماری، ۸۷۲، ۸۷۸  
 فریون بعنوان مبرد، ۶۸۵
- فریون ۱۲، خواص، ۹۸۲  
 فشار :  
 - آحاد، ۶۰  
 - استاتیک، ۷۳۱  
 - تعریف، ۵۹  
 - جزئی، ۴۱۹  
 - خلاء، ۶۰  
 - سکون، ۷۳۱  
 - مطلق، ۶۰  
 - نسبی (relative)، ۳۵۶  
 - نسبی (gage)، ۶۰  
 فشار ثابت، فرآیند، ۱۲۰  
 فعالیت جرم، قانون، ۵۵۲  
 فوق گرم (داغ)، ۱۵۷  
 فینها، ۸۲۵  
 - بازده، ۸۲۵
- «ق»  
 قابلیت کاردهی، ۲۸۹  
 قانون اول ترمودینامیک، ۴۰  
 - برای سیستم باز، ۱۹۷  
 - برای سیستم بسته، ۱۹۱  
 قانون دوم ترمودینامیک، ۴۰  
 - بیان کلاسیوس، ۲۵۹  
 - بیان کلوین - پلانک، ۲۵۹  
 قانون سوم ترمودینامیک، ۵۷۷  
 قانون صفرم ترمودینامیک، ۳۰  
 قدرت، سیکلها :  
 - بحث عمومی، ۵۹۸  
 - تحلیل قانون دوم، ۶۶۷

## «ک»

کار:

- الکتریکی، ۸۵

- انبساط، ۸۱

- تعریف، ۸۰

- جریانی، ۱۹۶

- خارجی، در فرآیند جریانی، ۱۹۶

- قرارداد علامت، ۸۱

- مغناطیسی، ۸۷

- کاردهی، مقدار:

- در جریان دائمی، ۲۹۶

- در سیکل توربین گازی، ۶۶۹

- ملاحظات کاربردی، ۳۰۰

- کار ماکزیمم، ۵۷۸

- مربوط به تابع هلمهولتز، ۵۸۰

- کارنو، سیکل:

- تعریف، ۲۸۱

- مربوط به سیکل‌های قدرت، ۵۹۹

- کاریر، معادله، ۴۳۴

- کالریک، تئوری، ۹۸

- کسر مولی، ۴۱۸

- کلاپیرون، رابطه، ۳۶۲

- کلاسیوس - کلاپیرون، معادله، ۳۶۲

- کلاسیوس، نابرابری، ۲۶۸

- کمپرسور:

- در سیکل تبرید، ۶۸۵

- گازی، ۶۲۵

- گریز از مرکز، ۶۲۷

- محوری، ۶۲۸

- کمپرسور هوا، ۶۳۵

- چند مرحله‌ای، ۶۳۵

- کوری، ماده، ۴۰۳

- کی، روش برای مخلوطها، ۴۷۰

- کیفیت، ۱۵۵

- کیلوپوند نیرو، ۴۸

## «گ»

- گاز الکترون، ۹۲۳

- گاز تک اتمی، خواص، ۹۰۰

- گاز حقیقی، خواص، ۳۸۷

- گاز دو اتمی، خواص، ۹۰۵

- گاز کامل، ۱۰۴

- گاز فتون، ۹۳۶

- گاز واندروالز، ۳۶۷

- گاز(های) ایده‌آل:

- آنتروپی تغییر، ۲۷۹

- انرژی داخلی، ۱۰۰

- تعادل شیمیایی، ۵۴۸

- تعریف، ۶۳

- فرآیندها در، ۱۱۹

- گرماهای ویژه، ۱۰۳

- گرماهای ویژه تک اتمی، ۹۰۵

- گرماهای ویژه دو اتمی، ۹۱۲

- مدل میکروسکپی، ۹۰۰

- معادله حالت، ۶۳

- گرافش، عدد، ۸۰۱

- گرمازا، واکنش، ۵۱۴

- گرماگیر، واکنش، ۵۱۴

- گرمای ویژه:

- تعریف، ۱۷۳

- جامدات، ۹۲۰  
- حجم ثابت، ۱۷۳  
- روابط عمومی، ۳۵۳  
- فشار ثابت، ۱۷۳  
- گاز ایده آل، ۱۰۶  
- مخلوطها، ۴۲۴  
- مشارکت الکترون در، ۹۳۴  
- گرمکن آب تغذیه، ۶۰۷  
- باز، ۶۰۸  
- بسته، ۶۰۹  
- گلوگاه در جریان صوتی، ۷۴۱  
- گیس، تابع:  
- تعریف، ۳۴۷  
- مربوط به تعادل، ۵۴۷  
- گیس، قانون فاز، ۵۷۵  
- گیس - دالتون، قانون، ۴۱۷
- «ل»  
لایه مرزی، ۷۹۸
- «م»  
ماخ، عدد، ۷۳۴  
ماخ، مخروط، ۷۶۲  
ماده تراکم پذیر ساده، ۱۵۱  
ماده خالص، ۱۵۱  
ماده کوری، ۴۰۳  
ماده مغناطیسی ساده، ۴۰۴  
ماشین حرکت دائم از نوع دوم، ۲۶۱  
ماکروسکپی، حالت، ۸۶۳  
ماکسول:
- روابط، ۳۴۸  
- شیطانک، ۳۱۶  
ماکسول - بولتزمن، مدل آماری، ۸۷۲، ۸۷۹  
ماگنتو کالریک، اثر، ۴۰۴  
مایع:  
- اشباع، ۱۵۴  
- مادون سرد، ۱۵۷  
- متراکم شده، ۱۵۷  
مبدل‌های حرارتی، ۸۲۹  
- جریان عمودی، ۸۳۲  
- دولوله، ۸۳۰  
- ضریب سودمندی، ۸۳۲  
مجموعه متعارفی، ۹۴۲  
- بزرگ، ۹۴۳  
- جزئی، ۹۴۴  
محیط، ۲۷  
مخلوطها:  
- اشباع، ۴۳۱  
- گازهای ایده آل، ۴۱۷  
- گازهای حقیقی، ۴۶۷  
- گرماهای ویژه، ۴۲۳  
- هوا - بخار آب، ۴۲۷  
مخلوطهای هوا - بخار آب  
- روابط خاصیت برای، ۴۳۳  
- مخلوط شدن آدیاباتیک، ۴۴۸  
مرز سیستم، ۲۷  
مغناطیس، اثرات، ترمودینامیک، ۴۰۱  
مقیاس بین المللی دما، ۳۳  
ممتوم، معادله برای حجم کنترل، ۷۴۴  
منحنی معکوس، ۲۳۰

## موتور:

- احتراق داخلی، سیکلها، ۶۳۹
- چهار زمانه، ۶۳۹
- دو زمانه، ۶۴۰
- توربوجت، ۶۷۸
- وانکل، ۶۴۸
- موج ضربه‌ای قائم، ۷۵۱
- فشار عرضی، ۷۵۲
- مول، تعریف، ۶۱
- مولیر، نمودار، ۲۷۸
- برای آب، ۱۰۰۵
- میکروسکوپی، حالت، ۸۶۳

## «ن»

- نابرابری کلاسیوس، ۲۷۰
- ناحیه سکوت در جریان مافوق صوت، ۷۶۳
- نرخ حرارتی، ۶۰۴
- نسبت تراکم، ۶۴۱
- نسبت هوا به سوخت، ۵۱۲
- نقطه:
- بحرانی، ۱۵۴
- سه گانه، ۱۵۴
- شبنم، ۴۲۸
- نلسون-اوبرت، منحنیهای محاسباتی، ۳۷۹
- نمودار دما-آنتروپی، ۲۷۷
- نوار والانس، ۹۳۲
- نوار هدایت، ۹۳۲
- نیمه هادی ذاتی، ۹۳۳
- نیمه هادیها، ۹۳۲
- نیوتن، قانون سرمایش، ۸۰۰

## «و»

- وانت هوف، معادله، ۵۶۹
- واندروالز، معادله، ۳۶۷
- وانکل، موتور، ۶۴۸
- وزن ملکولی، ۶۱
- برای مخلوط، ۴۱۸
- ویریا، معادله حالت، ۳۷۴

## «ه»

- هاینزبرگ، اصل عدم قطعیت، ۸۶۰
- هدایت:
- حالت دائم، ۷۸۷
- حالت گذرا، ۷۹۵
- هدایت حرارتی:
- تعریف، ۷۸۷
- مقادیر نمونه، ۷۸۸
- هلمهولتز، تابع:
- تعریف، ۳۴۷
- مربوط به تعادل، ۵۴۶
- هم افراز انرژی، ۹۱۶
- هوا، خواص، ۹۸۷، ۱۰۱۱
- هوای اضافی، ۵۰۸
- هوای ثوری، ۵۰۹
- هیدروکربن، احتراق عمومی، ۵۰۹
- یخ، خواص:
- یونیزاسیون، ۵۶۰
- اثر گازهای بی اثر، ۵۶۱
- ثابتهای تعادلی برای، ۵۵۲

## «ی»





Ferdowsi University of Mashhad

Publication, No. 165

# ***THERMODYNAMICS***

*Fourth Edition*

**J. P. HOLMAN**

Translated by

**M.R. MODARRES - RAZAVI**

*Ferdowsi University Press*

**1995**