



مؤسسه آموزش عالی غیر دولتی غیر انتفاعی انرژی

## بهینه سازی راندمان حرارتی و میزان انتشار آلودگی یک بویلر فایرتیوب با تغییر شرایط بهره برداری

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد « M.Sc »  
در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

نام دانشجو

عبدالصمد خاتمی

اساتید راهنما:

دکتر مجتبی میرزایی

دکتر حیدر مداح

آبان ۱۳۹۸

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

### باسمه تعالی

اینجانب **عبدالصمد خاتمی** به شماره دانشجویی **۹۶۱۳۵۲۸۰۱۲** دانشجوی رشته مکانیک - تبدیل انرژی مقطع تحصیلی **کارشناسی ارشد** تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه/رساله حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض درخصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسئولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذیصلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی: **عبدالصمد خاتمی**

امضا و تاریخ:

## مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط

استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ۹۸/۰۸/۱۲ ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

تاریخ:

امضا:

## تقدیم و قدردانی به

به مصداق ((لم یسکر المخلوق لم یسکر الخالق)) بسی شایسته است از استاد فریخته و فرزانه جناب آقای  
مجتبی میرزایی و جناب آقای حیدر مداح که با کرامتی چون خورشید سرزمین دل را روشنی بخشید و گلشن  
سرای علم و دانش را بارانهای نابی بباران ساختند و تقدیر و تشکر نمایم.

تقدیم بہ

مادر عزیزم کہ ہم پدر بود و ہم مادر

## چکیده

هدف از مطالعه حاضر، بررسی شرایط عملیاتی بهینه از نظر راندمان و میزان انتشار آلاینده ها برای دو دیگ بخار فایرتیوب سه مرحله ای است که به طور موازی به هم متصل شده اند سوخت مصرفی گازوئیل و در مقیاس مصارف خانگی و صنعتی کوچک است. داده ها با استفاده از یک دستگاه آنالایزر TESTO مدل M-I ۳۰۰ به طوری که پروب آن در خروجی دیگ بخار قرار گرفته است به دست آمده اند. متغیرهای عملیاتی در نظر گرفته شده، فشار تزریق و تعداد مشعل ها هستند. در انتها یک مدل ریاضی دقیق برای پیش بینی میزان راندمان و میزان آلاینده ها ارائه شد

نتیجه آزمایشات نشان داد که با افزایش نرخ انتشار کربن دی اکسید و توان اسمی دیگ بخار، تلفات ناشی از آنتالپی محسوس افزایش یافت. هنگامی که فشار تزریق زیاد می شود غلظت کربن مونوکسید کاهش می یابد. این تریدآف حداکثر راندمان را در محدوده دیگ بخار تعیین می کند. با توجه نتایج، افزایش تلفات ناشی از گرمای محسوس در دودهای خروجی اثر بیشتری روی راندمان دیگ بخار نسبت به کاهش تلفات برای گازهای سوخته نشده در دودهای خروجی دارد. حداکثر راندمان دیگ بخار برای یک مشعل در فشار  $12 \text{ kg cm}^{-2}$  برابر با ۹۵ درصد به دست آمده است. در مورد دو مشعل، بالاترین راندمان در فشار  $12 \text{ kg cm}^{-2}$  برابر با مقدار ۹۳ درصد به دست آمده است با افزایش فشار، نرخ جرمی جریان افزایش و در نتیجه درصد اکسیژن کاهش می یابد که به دلیل مصرف بیشتر مواد قابل احتراق در دیگ بخار می باشد. در دیگ بخار با یک شعله، تلفات مربوط به گازهای سوخته نشده با افزایش فشار تزریق کاهش می یابد. در مورد دو مشعل نیز همین اتفاق می افتد. این کاهش گازهای سوخته نشده ناشی از این واقعیت است که با افزایش فشار تزریق و بنابراین افزایش جریان سوخت، دما در محل آتش سوزی افزایش می یابد و باعث کاهش گازهای سوخته نشده در دود می شود. افزایش فشار و در نتیجه افزایش نرخ جرمی جریان باعث افزایش  $\text{CO}_2$  می شود که باعث افزایش دمای آتش می شود. متعاقباً احتراق کامل بیشتری رخ می دهد و مقدار  $\text{CO}$  و  $\text{CO}_2$  موجود در دود به ترتیب کاهش و افزایش می یابد.

**کلمات کلیدی:** بویلر فایر تیوب- راندمان حرارتی-میزان انتشار آلودگی-بهینه سازی

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول کلیات پژوهش.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- تعریف بویلر.....	۴
۱-۲-۱- بویلر یا دیگ بخار فشار بالا.....	۹
۲-۲-۱- بویلر یا دیگ بخار زیر بحرانی.....	۹
۳-۲-۱- بویلر یا دیگ بخار فوق بحرانی.....	۹
۳-۱- طبقه بندی بویلرهای فایر تیوب.....	۱۰
۱-۳-۱- بویلرهای فایر تیوب بر اساس شکل انتهای کوره.....	۱۰
۲-۳-۱- بویلرهای فایر تیوب بر اساس تعداد مسیر عبور گازهای داغ.....	۱۱
۴-۱- مزایای بویلر فایر تیوب.....	۱۲
۵-۱- محدودیت های بویلر فایر تیوب.....	۱۲
۶-۱- انواع بویلر:.....	۱۳
۱-۶-۱- بویلرها با سوخت هسته ای (راکتور).....	۱۴
۲-۶-۱- بویلرها با سوخت فسیلی.....	۱۴
۳-۶-۱- بویلرهای یکبار گذر (فوق بحرانی).....	۱۶
۷-۱- اجزاء بویلر:.....	۱۸
۸-۱- انتخاب نوع بویلر.....	۲۸
۹-۱- هدف تحقیق.....	۳۱
۱۰-۱- بیان مساله.....	۳۲
۱-۱۰-۱- بهینه سازی.....	۳۲
۱-۱۰-۱- تابع هدف.....	۳۲
۲-۱۰-۱- متغیرهای مستقل.....	۳۳
۱۱-۱- سوالات تحقیق.....	۳۴
۱۲-۱- لغات و اصطلاحات تخصصی.....	۳۴
۱-۱۲-۱- احتراق.....	۳۴
۱۳-۱- پیشینه تحقیق.....	۳۵
فصل دوم بویلرهای فایر تیوب.....	۳۶
۱-۲- مقدمه.....	۳۷
فصل سوم روش و تنظیمات آزمایشگاهی.....	۴۰



۴۱	۳-۱- مقدمه.....
۴۳	۳-۲- وابط و شاخص ها.....
۴۶	فصل چهارم تجزیه و تحلیل نتایج.....
۴۷	۴-۱- نتایج.....
۴۹	۴-۲- ارائه چند جمله ای برهم کنش خطی.....
۵۰	۴-۳- نتایج مدل برهم کنش خطی برای محتوای اکسیژن.....
۵۲	۴-۴- نتایج مدل برهم کنش خطی برای غلظت منواکسید.....
۵۶	۴-۵- نتایج مدل برهم کنش خطی برای محتوای دی اکسید کربن.....
۵۹	فصل پنجم جمع بندی ارائه پیشنهادات.....
۶۰	۵-۱- مقدمه.....
۶۰	۵-۲- جمع بندی.....
۶۱	۵-۳- پیشنهادات برای آینده.....
۶۲	مراجع.....

## فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱- متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (توابع هدف) مورد استفاده در این پژوهش.....	۳۳
جدول ۱-۳- جدول متغیرهای مورد استفاده در این پژوهش.....	۴۴
جدول ۱-۴- ضرایب معادله رگرسیونی چند جمله ای بر هم کنش خطی مربوط به محتوای اکسیژن.....	۵۰
جدول ۲-۴- ضرایب معادله رگرسیونی چند جمله ای بر هم کنش خطی مربوط به غلظت CO.....	۵۲
جدول ۳-۴- ضرایب معادله رگرسیونی چند جمله ای بر هم کنش خطی مربوط به محتوای دی اکسید کربن.....	۵۶

## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۳۲.....	شکل ۱-۱- بخش های اصلی هر نوع مساله بهینه سازی.....
۳۳.....	شکل ۱-۲- تابع هدف مورد بررسی در این پژوهش.....
۳۴.....	شکل ۱-۳- متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (تابع هدف) مورد استفاده در این پژوهش.....
۳۵.....	شکل ۱-۴- شمای کلی فرآیند احتراق.....
۴۱.....	شکل ۳-۱- طرح نصب دیگ بخار نوع Fire Tube.....
۴۷.....	شکل ۴-۱- محتوای اکسیژن در مقابل فشار تزریق.....
۴۸.....	شکل ۴-۲- غلظت CO بر حسب ppm در مقابل فشار تزریق.....
۴۹.....	شکل ۴-۳- محتوای CO <sub>2</sub> در مقابل فشار تزریق.....
۵۱.....	شکل ۴-۴- نتایج مدل برهم کنش خطی جهت پیش بینی محتوی اکسیژن به همراه خطای مدل.....
۵۲.....	شکل ۴-۵- رویه سطح مربوط به میزان محتوی اکسیژن بر حسب تعداد مشعل و فشار تزریق.....
۵۴.....	شکل ۴-۶- نتایج مدل برهم کنش خطی جهت پیش بینی غلظت CO به همراه خطای مدل.....
۵۵.....	شکل ۴-۷- رویه سطح مربوط به میزان غلظت CO بر حسب تعداد مشعل و فشار تزریق.....
۵۷.....	شکل ۴-۸- نتایج مدل برهم کنش خطی جهت پیش بینی محتوی CO <sub>2</sub> به همراه خطای مدل.....
۵۸.....	شکل ۴-۹- رویه سطح مربوط به میزانمحتوای CO <sub>2</sub> بر حسب تعداد مشعل و فشار تزریق.....

# **فصل اول**

## **کلیات پژوهش**

## ۱-۱- مقدمه

بویلر یا دیگ بخار مجموعه‌ای از لوله‌ها است که از آن‌ها برای انتقال گرمای تولیدی توسط فرایند احتراق به سیال استفاده می‌شود و در نهایت آب داغ یا بخار آب تولید می‌شود. در مرحله بعد، بخار یا آب داغ تولید شده، فشرده می‌شوند و برای کاربردهایی مانند گرمایش و تولید توان از آن استفاده می‌شود. بویلرها کاربرد بسیار زیادی در نیروگاه‌ها دارند.

همانطور که اشاره شد، بویلر، مجموعه‌ای از لوله‌ها است که در آن به آب و یا سایر سیالات گرما داده می‌شود و در نهایت بخار یا بخار آب تولید می‌شود. این فرایند نیاز به انرژی و حرارت دارد که این حرارت می‌تواند از طریق احتراق سوخت‌ها، انرژی برق و یا انرژی هسته‌ای تامین شود. همچنین بویلر یکی از اجزای اصلی نیروگاه بخار است و در کنار توربین، پمپ و سایر توربوماشین‌ها، نقش اساسی را برای تولید توان در نیروگاه ایفا می‌کند.

به صورت کلی می‌توان گفت که یک سیستم بویلر از سه بخش تشکیل شده است. بخش اول، سیستم آب تغذیه را نشان می‌دهد، بخش دوم سیستم بخار و بخش سوم نیز سیستم سوخت است.

یکی از اجزایی که در شکل بالا نشان داده شده، مخزن زیر آب<sup>۱</sup> است. شیر این مخزن، توسط اپراتور بویلر باز می‌شود و مقداری از آب پر از املاح از انتهای بویلر تخلیه می‌شود. در واقع هدف از اینکار این است که درصد املاح موجود در آب درون بویلر به اندازه‌ای که بویلر بر اساس آن طراحی شده، تنظیم شود تا وقتی تبخیر آب صورت می‌گیرد این املاح در بویلر ته نشین و باعث خرابی قسمت‌های مختلف آن نشود. در نهایت مقدار آب کاهش یافته توسط مخزن زیر آب، توسط آب ورودی که املاح کمتری دارد، تامین می‌گردد.

علاوه بر مواردی که در بالا بیان شد، تعداد زیادی از کنترل کننده‌ها در مسیر جریان دیگ بخار حضور دارند که وظیفه نمایش جریان آب و بخار، جریان سوخت و درصد ترکیب شیمیایی سوخت و هوا را بر عهده دارند. توجه شود که سیستم آب تغذیه از دو منبع تشکیل شده است. این دو منبع، آب را به سمت دیگ بخار هدایت می‌کنند تا به بخار تبدیل شود.

به صورت کلی سیستم آب تغذیه، آب مورد نیاز مجموعه را فراهم می‌کند و این آب را برای دستیابی به بخار کافی، به صورت خودکار تنظیم می‌کند. همانند بخش قبل، در این بخش نیز تعداد زیادی از شیرهای کنترل به منظور نمایش اطلاعات در هر لحظه و بهبود فرایند

---

1 Blowdown Tank

تعمیر و نگهداری تجهیزات، استفاده شد.

گرم‌کن‌های آب تغذیه، گرمای اضافی و خروجی بخار را برای پیش گرمایش آب تغذیه بویلر استفاده می‌کند. پیش گرمایش آب تغذیه بویلر، بازده مجموعه را از طریق کاهش انرژی مورد نیاز برای تبدیل آب به بخار، افزایش می‌دهد.

آب تغذیه بویلر معمولاً حاوی اکسیژن محلول است که از نشتی موجود درون کندانسور و پمپ ناشی می‌شود. این اکسیژن باعث ایجاد خوردگی و آسیب‌های بسیار زیادی در بخش‌های مختلف بویلر می‌شود. دی اریتور در واقع به صورت مکانیکی و با عبور دادن بخار از گرم‌کن آب تغذیه، اکسیژن را از محلول خارج می‌کند.

این فرایند یعنی پیش گرمایش و خارج ساختن اکسیژن در تعدادی از بویلرهای صنعتی با استفاده از مخزن condensate نیز انجام می‌شود. به صورت کلی می‌توان گفت که دی اریتور در سیستم‌های بزرگ کاربرد زیادی دارد. همچنین سیستم condensate که سیستم نسبتاً ارزان‌تری است، برای بویلرهایی مناسب است که بارها آب برای چگالش بازگردانده می‌شود. در واقع با توجه به اینکه آب بازگردانده شده درصد اکسیژن کمتری وجود دارد، استفاده از سیستم condensate اقتصادی‌تر است.

آخرین عضو سیستم آب تغذیه مجموعه بویلر یا دیگ بخار، اکونومایزر است. اکونومایزر یک ابزار بسیار مناسب برای افزایش بازدهی سیستم است. این اکونومایزر گرما را از گاز موجود در خروجی دریافت می‌کند و بخار را با استفاده از آن گرم می‌کند. این موضوع بازدهی بویلر را افزایش می‌دهد. آب تغذیه از طریق اکونومایزر وارد بویلر می‌شود و به شکل بخار به سمت «درام بخار»<sup>۱</sup> حرکت می‌کند.

به صورت کلی درام وظیفه جدا کردن آب و بخار از یکدیگر را به عهده دارد. درام پایین<sup>۲</sup>، نامیده می‌شود. این درام یک محفظه در پایین بویلر را تشکیل می‌دهد که آب را تنظیم می‌کند و رسوبات و یا محصولات خورده‌گی را جمع‌آوری می‌کند. این محصولات در مراحل بعدی جمع‌آوری می‌شود. توجه شود که فرایند انجام شده در درام پایین در بخش قبل با استفاده از نام مخزن زیر آب مورد بررسی قرار گرفت.

سیستم بخار وظیفه حرارت دادن به آب و تولید بخار از آب تغذیه را به عهده دارند. علاوه بر این، سیستم بخار، وظیفه کنترل کردن میزان بخار تولید شده در بویلر را نیز بر عهده دارد. بخار تولیدی، در نهایت از درون یک سیستم پاپینگ عبور می‌کند. در این مجموعه، فشار

---

1 Steam Drum

2 mud drum

بخار با استفاده از گیج‌های فشار بخار در زمان‌های متناوب کنترل می‌شوند. سیستم سوخت، شامل تمام ابزار و تجهیزاتی است که سوخت را برای تولید انرژی ضروری و مورد نیاز مجموعه فراهم می‌کنند. ابزاری که در این سیستم استفاده می‌شوند به نوع سوختی بستگی دارد که سیستم استفاده می‌کند. دیگهای بخار برای تولید بخار آب گرم بمنظور تولید برق، استفاده در پروسه‌های صنعتی و گرمایش بکار می‌روند. تقسیم بندی انواع بویلر بر اساس عملکرد آنهاست. صنایع شیمیایی، دارویی، غذایی، تولید کاغذ، قند و شکر و... از صنایعی هستند که هر یک به نحوی از بویلر استفاده می‌کنند. در یک نگاه اجمالی می‌توان مجموعه بویلر را به صورت زیر تشریح کرد. بطور کلی دیگهای بخار بر این اساس طراحی می‌شوند که انرژی را که معمولاً از احتراق سوختها بدست می‌آید به سیال درون دیگ انتقال می‌دهند و بخار یا آبگرم با فشار، درجه حرارت و کیفیت مورد نیاز تولید می‌کنند و در این روند بایستی ضایعات حرارتی تا حد ممکن کاهش یابد.

## ۱-۲- تعریف بویلر

بویلر مجموعه ای است شامل اجزائی نظیر درام، سیستم چرخه طبیعی، سیستم چرخه اجباری، کوره، سوپر هیتر، ری هیتر، اکونومایزر، علاوه بر اجزای فوق هر بویلر شامل دو فن کشش اجباری، دو فن تزریق، دو گرمکن هوا، چهار گرمکن هوا به وسیله بخار هم چنین تجهیزات اشتعال سوخت و سیستم شستشو دهنده اتوماتیک می‌باشد. کوره و ناحیه HRA (بازیابی حرارتی) از دیگر قسمت های یک بویلر است که عمل احتراق در ناحیه کوره صورت می‌گیرد.

### اشتعال سوخت

محصولات احتراق با گذشتن از ناحیه بازیابی حرارت بخار را سوپر هیت کرده و همچنین تجهیزاتی که صرفه های اقتصادی را موجب می‌شوند نظیر اکونومایزر را حرارت دهی می‌کنند.

قسمت های کف، سقف، جلو و دیواره های کناری بویلر که ناحیه کوره HRA را تشکیل می‌دهند از لوله هایی ساخته شده که آب در آنها جریان داشته و به دیواره های

آبی<sup>۱</sup> معروفند در دیوار بویلر ۱۶ مشعل و در دیواره عقب کوره ۸ مشعل دیگر در ردیف های چهار تایی بصورت عمودی جا سازی می شوند که عمل اشتعال سوخت را به عهده دارند. دیگهای بخار از دیدگاههای مختلف مانند، ساختمان، ظرفیت، کارکرد، نوع سوخت و غیره قابل دسته بندی می باشند.

۱. دیگهای تهیه آبگرم

۲. دیگهای تهیه بخار

1-دیگهای آبگرم دارای ظرفیت های نسبتاً پایین می باشند و آبگرم را برای مصارف و پروسه های صنعتی و نیز بمنظور استفاده در گرمایش صنعتی و خانگی، تهیه می کنند. ظرفیت این دیگها را معمولاً بصورت مقدار انرژی حرارتی منتقل شده به آب (KW یا MW) نشان میدهند در حالیکه ظرفیت دیگهای بخار را با مقدار تناژ بخار تولیدی بیان می شود. بعنوان مثال یک دیگ آبگرم بظرفیت 1 MW با احتساب راندمانی حدود ۸۰٪ قادر است قریب ۷ تن آب را در ساعت از دمای ۲۰۰°C به دمای ۱۲۰ گرم کند. دیگهای بخار بازیافت حرارتی براساس کاربردهای موردنظر به دودسته کلی تقسیم میشوند:

الف: دیگهایی که بازیابی حرارت در آنها بعنوان هدف ثانویه مطرح بوده و هدف اصلی سرد کردن سیال گرم در یک فرایند صنعتی می باشد. با توجه به کاربرد مورد نظر دمای سیال خروجی باید در یک محدوده مشخص کنترل گردد که این کار با روشهای گوناگونی انجام می گیرد و رایج ترین روش بای پس کردن بسیاری از کارخانجات شیمیایی از جمله واحدهای تولید هیدروژن و اسید سولفوریک از این نوع دیگها استفاده می نمایند.

ب: دسته دوم دیگهایی می باشند که به هدف بیشترین بازیابی حرارت از گازگرم و با توجه به مطالعات اقتصادی و فنی (خوردگی و ...) طراحی می شوند. دیگ های بخار بازیافت حرارتی براساس قرارگیری سیال گرم و سردنسبت به دیگ به دو دسته کلی تقسیم می شوند

فشار این دیگها معمولاً ۶ اتمسفر و کمتر می باشد و با اطمینان خوب قادر به تهیه آبگرم تا دمای ۱۲۰ درجه می باشند، بدون اینکه مشکل ایجاد بخار در سیستم وجود داشته باشد. **دیگهای بخار لوله دودی<sup>۲</sup>:**

این نوع دیگها به طور وسیعی در واحدهای شیمیایی، پالایشگاهها و دیگر مصارف

---

1 WATER WALL

2Fire Tube boilers



صنعتی مورد استفاده قرار می گیرند. در این نمونه گازهای داغ که میتوانند در فشارهای بالا باشند در داخل لوله جریان یافته و باعث تولید بخار اشباع در فشار کم در خارج لوله ها می گردند. دیگهای بخار لوله دودی در انواع یک مسیره<sup>۱</sup> و یا چند مسیره<sup>۲</sup> طراحی میشوند.

در مدل اول گازهای داغ از یک طرف وارد شده و از طرف دیگر خارج می شوند و مدل دوم در مواردی بکار میرود که با توجه به کاربرد مورد نظر طول دیگ بخار محدود باشد. این نوع دیگها عموماً برای تناژها و فشارهای پائین اقتصادی تر از دیگهای لوله آبی می باشند افت فشار در آنها در ظرفیتهای مساوی بیش از دیگهای لوله آبی می باشد

دیگهای بخار لوله دودی در انواع ساده و یا با درام مجزا ساخته می شوند که نوع ساده آن ارزاتر از نوع دوم است و نوع دوم در مواردی که فلوی حرارتی در جلوی دیگ در اثر دمای بالای گازها و یا ضرائب بالای انتقال حرارت زیاد می باشد و همینطور زمانیکه تولید بخار با کیفیت بالا مورد نظر است استفاده می شود. شکل A نمونه دیگ بخار لوله دودی نوع ساده که فاقد درام مجزا می باشد را نشان میدهد.

یک درام مجزا به طراح این امکان را می دهد که با بکار گیری جدا کننده ها<sup>۳</sup> امکان تولید بخار با کیفیت بالا صورت گیرد. در صورتیکه در مدلهای ساده بعلت اینکه فضای اشغال شده بوسیله بخار در داخل دیگ کم می باشد امکان نصب جدا کننده ها نبوده و در نتیجه فقط می توان با این دیگها بخار مرطوب یا خالص 3-2 ppm تولید کرد.

دیگهای لوله دودی فقط برای تولید بخار در فشار پائین ( تا حدود 1400 psig مناسب می باشند که این موضوع به علت آنستکه برای یک فشار مساوی ضخامت مورد نیاز برای لوله هایی که تحت فشار خارجی قرار گرفته است به مراتب بیش از لوله هایی است که تحت فشار داخلی قرار میگیرند.

علاوه بر این ضخامت مورد نیاز پوسته دیگ ، با افزایش فشار به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. در نتیجه استفاده از این نوع دیگ در فشارهای بالا اقتصادی نمی باشد. در تناژهای بالا<sup>۴</sup> یا کم ، بیشتر دیگهای بازیافت حرارتی که در سیکلهای ترکیبی مورد استفاده قرار می گیرند سطح مورد نیاز بسیار بالا می باشد که این باعث افزایش طول مورد نیاز و افزایش افت فشار می گردد.

تاکنون طراحی های بسیار گوناگونی از بویلرها انجام شده است و به صورت کلی

---

1 Single pass

2 multi pass

3 Separators

4 Pinch Point

می‌توان، بویلرها را بر اساس معیارهای مختلف تقسیم‌بندی کرد. یکی از این معیارها، دسته‌بندی بویلرها بر اساس مسیر عبور آب و گاز داغ است. یکی دیگر از انواع مختلف تقسیم‌بندی بویلرها، تقسیم‌بندی آن‌ها بر اساس مسیر چرخش آب است. انواع دیگری از تقسیم‌بندی‌ها نیز موجود هستند که در ادامه مطلب به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود.

این دسته‌بندی، مهم‌ترین نوع دسته‌بندی در یک بویلر یا دیگ بخار است. بر این اساس، بویلر یا دیگ بخار به دو دسته «بویلر واتر تیوب<sup>۱</sup>» و «بویلر فایر تیوب<sup>۲</sup>» تقسیم می‌شوند. بویلر یا دیگ بخار واتر تیوب را بویلر آب در لوله نیز می‌نامند و بویلر فایر تیوب نیز بویلر آتش در لوله نامیده می‌شود.

در برخی از بویلرها، آب از داخل تعدادی از لوله‌های کوچک در حال جریان است و گرما از طریق احتراق گازهای اطراف این لوله به آب داخل لوله داده می‌شود. بنابراین این نوع از بویلرها، بویلرهای واتر تیوب یا آب در لوله نامیده می‌شوند. توجه کنید که بویلرهای آب در لوله نیز با توجه به جهت قرارگیری لوله‌ها، انواع مختلفی را در بر می‌گیرند. شکل زیر نمونه‌ای از بویلرهای واتر تیوب را به تصویر کشیده است.

نوع دیگری نیز از بویلرها موجود هستند که در آن‌ها گاز داغ از داخل لوله‌های موجود در سیستم عبور می‌کند و همزمان این لوله‌ها توسط آب، احاطه شده‌اند. این بویلرها آتش در لوله نامیده می‌شوند. البته به صورت رایج در صنایع مختلف، این بویلرها را فایر تیوب می‌نامند و همانند بویلرهای واتر تیوب، انواع گوناگونی دارند. شکل زیر نمونه‌ای از بویلرهای فایر تیوب را نشان داده است. مسیر قرار گرفتن آب و گازهای داغ در این شکل کاملاً واضح هستند.

از آنجایی که آب، سیال اصلی حاضر در بویلر یا دیگ بخار است، مسیر گردش و جریان آن اهمیت بسیار زیادی دارد و یکی از دسته‌بندی‌های بسیار مهم در بویلرها دسته‌بندی بویلرها بر اساس مسیر حرکت جریان و گردش آب است.

گردش و جریان آب در بویلرهای گردش طبیعی، ناشی از متفاوت بودن چگالی آب است. این تفاوت چگالی به دلیل گرم شدن آب به وقوع می‌پیوندد. در بویلرهای بخار گردش طبیعی، سیال مورد نظر فرایند جابه‌جایی را طی می‌کند. شکل زیر فرایند گردش طبیعی را به صورت شماتیک به تصویر کشیده است.

نوع دیگری از بویلرها نیز موجود هستند که در آن‌ها یک پمپ آب، باعث جریان یافتن آب در طول مسیر آن می‌شود. تحت این شرایط، نرخ تولید بخار افزایش می‌یابد. در واقع پمپ

---

1 Water Tube Boiler

2 Fire-tube Boiler

آب تغذیه، فشار آب تغذیه را تا مقدار مطلوبی افزایش می دهد و اندازه این فشار در یک بویلر گردش اجباری به گونه ای تنظیم می شود که بخار در ناحیه زیر بحرانی به صورت پایا حضور داشته باشد. شکل زیر نمایی از یک بویلر گردش اجباری را به تصویر کشیده است.

بویلر یا دیگ بخار کاربرد بسیار زیادی دارد و در صنایع مختلفی مورد استفاده قرار می گیرد. این ابزار را می توان با توجه به نوع استفاده ای که از آن می شود، به دسته های گوناگون تقسیم کرد. این نوع دسته بندی در این بخش مورد بررسی قرار می گیرد.

این بویلرها به صورت رایج در نیروگاه ها مورد استفاده قرار می گیرند. در واقع یک نیروگاه تولید توان در یک مکان احداث می شود و سال ها برق تولید می کند و بویلری که استفاده می کند از نوع بویلرهای ساکن است.

بویلرهای قابل حمل، اندازه کوچکی دارند و به صورت سیار قابل استفاده هستند. این بویلرها در کارگاه ها مورد استفاه قرار می گیرد. به کمک این بویلرها آب موجود در اتوها نیز گرم و آماده مصرف می شود. نوع دیگری نیز از بویلرها موجود هستند که به صورت رایج در کشتی ها استفاده می شوند. این بویلرها با توجه به نوع خاص و کاربردی که دارند، به بویلرهای دریایی معروف هستند.

بویلرها را می توان بر اساس مکان قرارگیری آن ها به سه دسته افقی، شیب دار و عمودی تقسیم بندی کرد. در واقع، اگر محور قرارگیری بویلر به صورت افقی باشد، بویلر را بویلر افقی می نامند. به صورت مشابه می توان بیان کرد که اگر محور قرارگیری بویلر به صورت عمودی باشد، بویلر را بویلر عمودی و اگر محور بویلر شیب دار باشد، بویلر را بویلر شیب دار می نامند. شکل های زیر به ترتیب یک بویلر افقی، عمودی و شیب دار را نشان می دهند.

بویلرها را می توان بر اساس نحوه قرار گرفتن و مکان کوره ها به دو دسته کلی تقسیم بندی کرد. دسته اول این بویلرها، بویلرهایی هستند که در آن ها کوره در داخل پوسته قرار گرفته است. این بویلرها به بویلرهای «درون سوز»<sup>۱</sup> یا بویلرهای با کوره در درون معروف هستند.

نوع دیگری نیز از بویلرها موجود است که کوره در بیرون پوسته قرار گرفته است. این بویلرها را بویلرهای «برون سوز»<sup>۲</sup> یا بویلرهای با کوره در بیرون می نامند.

همانطور که اشاره شد، بویلرها وظیفه تولید آب داغ یا بخار آب داغ را بر عهده دارند. این بویلرها بر اساس فشار بخاری که تولید می کنند به پنج دسته کلی تقسیم می شوند. دسته

---

1 Internally Fired

2 Externally Fired

اول بویلرهای فشار پایین هستند و دسته دوم بویلرهایی با فشار متوسط را شامل می‌شوند. دسته سوم نیز بویلرهایی با فشار بالا هستند. دو دسته دیگر بویلرها با توجه به فشار بحرانی تعریف می‌شوند و شامل دو دسته بویلر زیر بحرانی و بویلر فوق بحرانی هستند.

بویلر یا دیگ بخار فشار پایین

بویلری که بخار را در فشار محدوده ۲۰-۱۵ بار (bar) تولید می‌کند را در دسته بویلرهای فشار پایین<sup>۱</sup> قرار می‌دهند. در این حالت از بخار برای فرایند گرمایش استفاده می‌شود.

بویلر یا دیگ بخار فشار متوسط

بویلر یا دیگ بخار فشار متوسط<sup>۲</sup>، بویلری است که فشار کاری بخار آن در محدوده بین ۲۰ تا ۸۰ بار تغییر کند. این بویلر را می‌توان برای تولید توان در نیروگاه استفاده کرد. همچنین به صورت ترکیبی برای تولید توان و گرمایش نیز از آن استفاده می‌شود.

### ۱-۲-۱- بویلر یا دیگ بخار فشار بالا

همانطور که اشاره شد، دسته‌ای از بویلرها هستند که به آن‌ها بویلرهای فشار بالا<sup>۳</sup> گفته می‌شود. این بویلرها، بخار را در فشار بالاتر از ۸۰ بار تولید می‌کنند.

### ۱-۲-۲- بویلر یا دیگ بخار زیر بحرانی

اگر یک بویلر، بخار را در فشار پایین‌تر از فشار بحرانی تولید کند، بویلر زیر بحرانی<sup>۴</sup> نامیده می‌شود. در واقع بویلرها با توجه به کاربردی که دارند بخار با فشارهای مختلفی را تولید می‌کنند و بسیاری از نیروگاه‌های توان پیشرفته از بویلر فوق بحرانی<sup>۵</sup> استفاده می‌کنند که در قسمت بعد معرفی می‌شود.

### ۱-۲-۳- بویلر یا دیگ بخار فوق بحرانی

این بویلرها، بخار را در فشاری بالاتر از فشار بحرانی تولید می‌کنند. بویلرهای فوق بحرانی، اواپراتور یا تبخیر کننده<sup>۶</sup> ندارند و آب به صورت مستقیم و با فرایند فلشینگ<sup>۷</sup> به بخار تبدیل می‌شود.

---

1 Low Pressure Boilers

2 Medium Pressure Boiler

3 High Pressure Boiler

4 Subcritical Boiler

5 Supercritical Boiler

6 Evaporator

7 Flashing

بویلرهای فایر تیوب یا لوله آتشی به دیگ هایی ( بخار ، آب گرم ) اطلاق می گردد که حرارت ناشی از احتراق سوخت توسط مشعل در محفظه کوره و سپس در لوله های جابجایی دیگ در جریان می باشد. آب در جداره بیرونی کوره، لوله ها و در داخل محفظه شل (مخزن بویلر) ذخیره می گردد. در دیگ های بخار پس از انتقال حرارت، آب به فاز بخار تبدیل شده و به بالای محفظه شل هدایت می شود ( ۴/۱ بالای حجم مخزن ) و در دیگ های آب گرم یا آب داغ در یک مدار بسته توسط پمپ های سیرکوله جهت گرمایش در سیستم به گردش در می آید.

این نوع دیگ در دو نوع افقی (خوابیده) و عمودی (ایستاده) ساخته می شود که نوع ایستاده آن دارای ظرفیت و راندمان پایین و اغلب به صورت ۲ پاس و در مکان هایی که محدودیت فضای نصب را دارند مانند کارواش، و .... مورد استفاده قرار می گیرد و نوع افقی آن که دارای راندمان و ظرفیت بالاتری می باشد. در اکثر صنایع که نیاز به فشار بخار بالایی ندارند مورد استفاده قرار می گیرد، مانند صنایع غذایی، لبنی، نساجی و ...

### **۱-۳- طبقه بندی بویلرهای فایر تیوب**

#### **۱-۳-۱- بویلرهای فایر تیوب بر اساس شکل انتهای کوره**

عقب خیس : در بویلرهای نوع عقب خیس گازهای داغ، که در مسیر انتهای کوره در حال حرکت می باشند، در منطقه ای با قطر بزرگ تر از کوره ( محفظه راپر ) که فضای پشت آن را آب احاطه کرده است محبوس شده، و ضمن انتقال حرارت و کاهش دما وارد لوله های پاس ۲ می شود. این نوع چرخش هم باعث افزایش راندمان شده و هم از بروز تنش های حرارتی به سرلوله ها جلوگیری می کند.

عقب خشک : در این نوع بویلر گازهای داغ خروجی از کوره در محوطه ای پشت درب انتهای دیگ و هم سطح با لوله های پاس ۲ و ۳ که با طاقچه از هم جدا شده اند محبوس شده و با درجه حرارت بالایی وارد لوله های پاس ۲ می شود. لذا این نوع چرخش باعث کاهش راندمان و آسیب رسیدن به سر لوله ها، طاقچه و درب انتهای دیگ می شود. هزینه تولید این نوع بویلر پایین می باشد اما به دلیل معایب ذکر شده و لزوم تعمیرات اساسی متعدد تولید این محصول در حال کاهش می باشد.

### ۱-۳-۲- بویلرهای فایر تیوب بر اساس تعداد مسیر عبور گازهای داغ

تک پاس نسل اول بویلرها هستند که عمدتاً ذغال سنگ سوز بوده و امروزه تولید آنها متوقف شده است. در این نوع بویلرها گازهای ناشی از احتراق مسیر دیگ را یک بار طی نموده و بعد وارد دودکش می‌شوند. این مدل از بویلرها راندمان بسیار پایینی دارند و دیگر ساخته نمی‌شوند.

۲ پاس که دارای راندمان بسیار پایین می‌باشد و در دو نوع عقب خیس و عقب خشک ساخته می‌شود. عملکرد این دیگ‌ها به این صورت می‌باشد که گازهای داغ بعد از پیمایش کوره و پس از برخورد به محفظه راپر یا درب انتهای دیگ توسط یک سری لوله‌های جابجایی مجدداً طول مسیر دیگ را طی نموده و پس از برخورد به درب جلو دیگ نهایتاً از اگزوز خارج می‌شود.

کوره برگشتی در این نوع بویلر گازهای داغ پس از برخورد به انتهای کوره که توسط دریچه‌ای لولائی از جعبه دود عقب جدا شده است، مجدداً این مسیر را باز می‌گردد و پس از برخورد به درب جلو دیگ توسط یک سری لوله‌های جابجایی مجدداً طول مسیر دیگ را طی نموده و به سمت درب انتهای دیگ هدایت شده و نهایتاً از اگزوز خارج می‌شود. راندمان این مدل از دیگ‌ها از نوع ۲ پاس بیشتر می‌باشد.

۳ پاس که از محبوبیت و تیراژ تولید خوبی نزد مصرف کنندگان و تولید کنندگان این نوع بویلر برخوردار است دارای راندمان بالایی می‌باشد و در دو نوع عقب خیس و عقب خشک ساخته می‌شود، گازهای داغ به مانند دیگ‌های بخار ۲ پاس پس از برخورد به درب جلو دیگ ( جعبه دود جلو ) توسط لوله‌های جابجایی پاس ۳ مجدداً به درب انتهای دیگ ( جعبه دود عقب ) برخورد کرده و بعد از انتقال حرارت توسط اگزوز خارج می‌شود.

۴ پاس که در آن یک پاس اضافی برای بالا رفتن سطح حرارتی تعبیه شده است و اگزوز آن در جلو دیگ و سمت مشعل قرار دارد، با توجه به افت فشار و کاهش دمای حرارت ناشی از محصولات احتراق و نزدیک شدن آن به دمای نقطه شبنم و احتمال خوردگی گازهای خروجی که باعث کاهش عمر مفید دیگ بخار می‌شود و مستلزم صرف هزینه و انجام تعمیرات اساسی بر روی بویلر می‌باشد، بر این اساس از محبوبیت چندانی نزد مصرف کنندگان و تولید کنندگان بویلر برخوردار نیست.

## ۴-۱- مزایای بویلر فایر تیوب

از مزایای بویلرهای فایر تیوب می توان به قیمت مناسب، تیراژ تولید بالا، دسترسی آسان و اپراتوری ساده آن اشاره کرد. این بویلرها ( دیگ بخار ) در ظرفیت های مختلف از ۵۰ کیلو گرم تا ۳۰ تن بخار در ساعت و تا فشار کاری ۲۵ بار به تولید می رسند. مدت زمان بازسازی و هزینه تعمیرات آن نسبت به بویلرهای واتر تیوب کمتر می باشد. راندمان حرارتی بویلرهای فایر تیوب به ۸۰٪ نیز می رسد که با نصب اکونومایزر - دی اریتور - سختی گیر - منبع کندانس و دیگر تجهیزات جانبی دیگ بخار به افزایش راندمان و عمر مفید دیگ کمک بسزایی می شود.

## ۵-۱- محدودیت های بویلر فایر تیوب

یکی از محدودیت های استفاده از بویلرهای فایر تیوب این است که استفاده از سوخت های جامد در آن ها با مشکلات فراوانی همراه است و معمولاً برای استفاده از سوخت های جامد از بویلرهای واتر تیوب استفاده می شود. ضریب انتقال حرارت به وسیله ی جریان گاز درون لوله، کمتر از زمانی است که گاز در بیرون لوله ها جریان دارد. لذا بویلرهای فایر تیوب در ظرفیت مشابه، بزرگ تر از بویلرهای واتر تیوب هستند. به دلیل حجم زیاد آب اطراف لوله های آتش در این بویلرها، راه اندازی و بهره برداری از آن ها بیشتر از بویلرهای واتر تیوب به طول می کشد. در این سیستم ها کیفیت بخار تولیدی پایین است، زیرا در آنها از درام استفاده نمی شود. درام محفظه ای است که از آن برای جدا کردن آب و بخار از یکدیگر استفاده می شود. لذا این بویلرها در مواقعی استفاده می شوند که از بخار آن برای مصارف حساس استفاده نشود. زمانی که قصد داریم بخار سوپر هیت تولید کنیم، بویلرهای واتر تیوب برای این کار مناسب تر هستند. در بویلرهای فایر تیوب نیز امکان نصب سوپر هیتور وجود دارد اما در این حالت، فضای در دسترس برای نصب سوپر هیتورها محدود شده و امکان نصب آن ها تنها در بین پاس های لوله های آتش خوار فراهم می باشد که در این حالت یا دمای گازها خیلی بالاست و یا خیلی پایین و نمی توان یک سوپر هیتور ایده آل را طراحی نمود. لذا در این بویلرها نصب سوپر هیتور دشوار بوده و آن ها معمولاً بخار اشباع تولید می کنند. در فشارهای بالا، ضخامت جداره کوره ( کروگیت )، باید افزایش یابد که با بالا رفتن

ضخامت، ایجاد موج روی بدنه ی آن ها دشوار می شود. این موج ها باعث کنترل انبساط حرارتی بین کوره، شبکه و لوله های جابجایی می شود. لازم به ذکر است که صفحه در بر گیرنده لوله ها ( تیوب پلیت )، در انتهای کوره ثابت شده است و بدون این انعطاف پذیری، در زمان انبساط و انقباض، تنش های زیادی به آن ها وارد می شود.

با گذشت زمان مشخص گردید که تنها شکل عملی استفاده از دیگ بخاری مدور ساختن آنهاست که در سال ۱۷۹۵ با بوجود آمدن صفحات نوردی دیگ بخار بصورت مدور ساخته شد. از سال ۱۸۷۳ دیگهای بخار بصورت لوله آبی طراحی گردید (شکل-۱). در لوله های مایل این نوع دیگ آب جریان پیدا کرده و توسط جداره لوله ها حرارت جذب می شود. با توجه به افزایش سطحی انتقال حرارت به بهترین وجه صورت می گیرد.

با افزودن اجزایی چون سوپر هیتر، دی هیتر، اکونومایزر و گرمکنهای هوا و ... ، صورت اولیه دیگهای بخار به تدریج بصورت بویلرهای با ظرفیت بیشتر امروزی تبدیل شد. سیر پیشرفت و تکامل بویلر به صورت زیر بوده است:

- ۱- افزایش درجه حرارت
- ۲- افزایش فشار
- ۳- افزایش تناژ بخار خروجی از بویلر
- ۴- افزایش راندمان
- ۵- سهولت کنترل
- ۶- کاهش هزینه های ساخت، بهره برداری و تعمیرات
- ۷- افزایش طول عمر بویلر

## ۱-۶- انواع بویلر:

وظیفه بویلر تبدیل مایع (آب) زیر اشباع به بخار فوق اشباع می باشد و ولی در صنعت به کلیه وسایل تولید بخار از مرحله مایع اشباع تا بخار سوپر هیت، بویلر گفته می شود. بویلرها به واحدهای تولید بخار جهت مصارف همگانی، برق و مصارف صنعتی تقسیم می شوند که بسته به نوع طراحی، می توانند سوخت هسته ای، ذغال سنگ، نفت کوره (مازوت) نفت گاز و گاز طبیعی مصرف کنند.

بویلرها بر اساس پارامترهای مختلف تقسیم بندی می شوند که بطور کلی عبارتند از:



## ۱-۶-۱- بویلرها با سوخت هسته ای (راکتور)

استفاده از سوخت هسته ای برای تولید بخار فاقد عواقب نامطلوب سوخت فسیلی می باشد، ولی نیروگاههای هسته ای مقداری پرتو رادیو اکتیو در محیط آزاد می کنند که با این حال این امر قابل کنترل بوده و برای کارکرد عادی نیروگاههای هسته ای، مقدار این مواد بسیار پایینتر از حدی است که برای انسان و محیط زیان آور باشد. علاوه بر این نفت و گاز را می توان برای تولید مواد پتروشیمی و بسیاری از فراورده های صنعتی دیگر به کار برد و نباید این ماده را تنها بعنوان سوخت مصرف کرد. نیروگاههای هسته ای از راندمان بالایی برای تولید انرژی حرارتی برخوردارند. انرژی که می توان برای تولید برق از آن استفاده کرد. در تاسیسات نیروگاههای هسته ای، یک سیال ثانویه بین راکتور و بویلر جریان می یابد و در بویلر، حرارت از سیال ثانویه به آب منتقل می شود. بخار حاصل نیز در یک سیکل بخار معمولی جریان می یابد.

بویلرهای نیروگاههای هسته ای در انواع مختلف طراحی می گردند که مهمترین آنها راکتور آب سبک تحت فشار (راکتور آب جوشان<sup>۱</sup>) و راکتور با آب سنگین می باشد.

## ۱-۶-۲- بویلرها با سوخت فسیلی

در تمام بویلرهای صنعتی از سوخت فسیلی استفاده می شود. همچنین اکثر برق تولیدی در نیروگاههای کشورمان از سوخت فسیلی بخصوص مواد نفتی حاصل می گردد. استفاده از سوخت فسیلی برای تولید برق، گازکربنیک زیادی تولید می کند. دلیل این امر آن است که مقدار گرمایی که از سوختن سوخت فسیلی حاصل می شود، بیش از سه برابر انرژی الکتریکی تولیدی است. مقدار گازکربنیک که از نیروگاههای فسیلی آزاد می شود متناسب با مقدار گرمایی است که در اثر احتراق حاصل می شود. بنابر این تولید برق در نیروگاههای با سوخت فسیلی یکی از منابعی است که سبب تولید می شود. با توجه به تاثیرات منفی سوخت فسیلی در زندگی بشر و محیط زیستی لازم است به هر وسیله ممکن در کاهش استفاده از آن برای تولید برق اقدام شود. انواع بویلرهای فسیلی عبارتند از:

---

1 Boiling Water Reactor

## ۱- بویلرهای مخزنی:

این نوع بویلرها شامل یک مخزن سربسته می باشند که انتقال حرارت در خارج از آنها صورت گرفته و آب در داخل مخزن به بخار تبدیل می شود. راندمان بویلرهای مخزنی بسیار کم بوده و در حدود ۳۰٪ است و فقط در مصارف صنعتی با میزان بخار کم استفاده می شوند.

## ۲- بویلرها با لوله های آتش<sup>۱</sup>:

در این نوع بویلرها اطراف لوله ها از آب پوشانیده شده است و گازهای حاصل از احتراق از داخل لوله ها عبور کرده و انتقال حرارت مابین آب و محصولات انجام می گیرد. محفظه احتراق (کوره) می تواند در داخل یا در خارج بویلر قرار گیرد. راندمان بویلرهای Fire Tube حدود ۷۰٪ می باشد که جهت تولید بخار در واحدهایی با ظرفیت و فشار کم بکار برده می شود.

## ۳- بویلرها با لوله های آب جداری<sup>۲</sup>:

در انواع مختلف این نوع بویلرها (شکل ۲-۲)، انتقال حرارت بر اثر برخورد گازهای حاصل از احتراق با سطح خارجی لوله های محتوی آب و بخار به روشهای تشعشعی، جابجایی و هدایت صورت می گیرد. مزیت آنها نسبت به بویلرهای فایرتیوب، کم بودن قطر لوله های آب و بخار می باشد که باعث می شود تنشهای حرارتی کمتری به سطح لوله ها وارد شده و در نتیجه می توان این بویلرها را برای فشارها و ظرفیتهای بالا مورد استفاده قرار داد. راندمان این نوع بویلرها در حدود ۸۵ الی ۹۵ درصد می باشد.

یک بویلر از نوع دیواره آبی شامل یک اتاق احتراق همراه لوله های آب، هدرها و درامهای بخار و آب می باشد. علاوه بر این اجزاء دارای سوپر هیترها، گرمکنهای هوا، اکونومایزر و نگهدارنده ها می باشد که همه اینها اجزاء بویلر را تشکیل می دهد.

در این نوع بویلرها معمولا از لوله های عمودی دارای فین بصورت دیواره یکپارچه استفاده می شود. ساختمان این دیواره ها از یک سری لوله های عمودی تشکیل شده است که توسط جوش دادن یک نوار فلزی بنام Fin به هم متصل شده اند و دیواره ای پیوسته ایجاد می کنند. لوله های دیواره آبی از آنجاییکه تحت تاثیر شار حرارتی بسیار بالایی قرار دارند و از نوسانات فشار و درجه حرارت، بخصوص هنگام راه اندازی از حالت سرد برخوردار می باشند، نیاز به طراحی دقیق دارند. معمولا لوله های آبی در محفظه احتراق بطور عمودی قرار می

---

1 Fire tube

2 Water Tube Boiler

گیرند. این لوله‌ها در بالا و پایین روی هدرها<sup>۱</sup> به قسمتهایی بنام Stub که تواما با هدر ساخته شده و یا در عمل به آن جوش داده می شوند، وصل شده اند. وجود هدرها در بویلر از تعداد لوله‌هایی که مستقیماً به درام<sup>۲</sup> وصل می شوند، می‌کاهد. توزیع دما در لوله‌های دیوار آبی به عواملی نظیر ضریب انتقال حرارت جابجایی در داخل لوله‌ها، مقدار شار حرارتی در داخل محفظه احتراق، ضریب هدایت حرارتی و ابعاد و ساختار هندسی لوله و فین بستگی دارد. وجود فین باعث توزیع نسبی یکنواخت شار حرارتی در جداره داخلی لوله می‌گردد و افت حرارتی بویلر را کاهش می‌دهد. همچنین فینها سطح تبادل حرارت را افزایش داده سبب تبادل بیشتر حرارت می‌شوند.

### ۱-۶-۳- بویلرهای یکبار گذر (فوق بحرانی)<sup>۳</sup>

بویلرهای بدون درام که دارای فشار فوق بحرانی می‌باشند به بویلرهای بنسون معروفند. در این نوع بویلر طراحی مجموعه محوطه احتراق و لوله‌های دیواره‌ای به نحوی است که کلیه آب تغذیه‌کننده موجود در لوله‌های دیواره‌ای پس از طی محوطه احتراق و لوله‌های دیواره‌ای به بخار تبدیل شده و مستقیماً به سمت سوپرهیترها هدایت می‌گردند، لذا این بویلرها بدون درام هستند. از آنجاییکه بویلرهای بنسون دارای فشار بالایی هستند، تکنولوژی پیشرفته‌ای برای ساخت آنها مورد نیاز است، ولی به علت عدم وجود درام، وزن کمتری نسبت به بویلرهای زیر فشار بحرانی (درام دار) دارند. در بویلرهای بنسون حجم مشخصی از آب تغذیه با یکبار گردش در بویلر باید به بخار تبدیل شود. به عبارت دیگر عدد سیرکولاسیون، یک می‌باشد. ولی از آنجا که این بویلرها بالای فشار بحرانی کار می‌کنند، برای افزایش طول لوله‌های دیواره‌ای، بر خلاف بویلرهای درام دار لوله‌ها را بصورت مورب در روی دیواره‌ها طراحی می‌کنند تا ارتفاع بویلر کاهش یابد. همچنین ضخامت لوله‌های دیواره‌ای به علت بالا بودن فشار، بیشتر از ضخامت لوله‌های بویلرهای درام دار است. در ابتدای راه اندازی بویلرهای بنسون برای جداسازی آب و بخار از هم از سیکلون استفاده می‌کنند که با استفاده از خاصیت گریز از مرکز، آب و بخار را از هم جدا می‌کند و در حالت کارکرد دائم بویلر، از مدار خارج می‌گردند. همچنین به علت پایین بودن عدد سیرکولاسیون کنترل آنها نسبت به بویلرهای درام دار دشوارتر است و به دلیل نداشتن درام در شرایط

---

1 Header

2 Drum

3 Once Through Boiler

اضطراری ذخیره آب و بخار نخواهند داشت.

انواع مختلف بویلرهای مورد استفاده در صنعت:

#### ۱-هیتراهای گازی غیر مستقیم<sup>۱</sup>:

از نوع fire tube میباشند و یکی از موارد استفاده آنها گرم نمودن گاز طبیعی پس از فشارشکن (گاز شهری) است.

#### ۲-هیتراهای گازی مستقیم<sup>۲</sup>:

که به کوره پالایشگاهی نیز معروف بوده و از نوع Water Tube هستند. لوله ها بطور مستقیم در معرض شعله و حرارت هستند (تشعشع صورت می گیرد) و بخش کوئل گونه که در معرض انتقال حرارت جابجایی می باشند.

#### ۳-بویلرهای واکنش شیمیایی (راکتور):

بویلر بازیاب حرارتی<sup>۳</sup> و استوانه ای شکل می باشند که در مجتمع های پتروشیمی مورد استفاده قرار می گیرند و کویل های حرارتی آنها بصورت مارپیچی در صفحه می باشند.

#### ۴-بویلرهای سیکل ترکیبی<sup>۴</sup>:

این بویلرها از نوع بازیاب می باشند و جهت استفاده از انرژی گازهای خروجی نیروگاه گازی (توربین گازی) استفاده میشوند (شکل-۳). نیروگاه سیکل ترکیبی در واقع ترکیبی است بین نیروگاه بخار و توربین گاز جهت افزایش راندمان کلی سیستم، در این نوع، بخش توربین گاز می تواند از سیستم جدا شده و خود مستقل کار کند.

#### ۵-بویلرهای بازیافت<sup>۵</sup>:

که در بخش کوره های ذوب مورد استفاده قرار میگیرند. این بویلرها در مجتمع های ذوب فلزات در مسیر مستقیم مدار ذوب نصب می شوند و امکان جدایش آنها از سیستم در حال کار وجود ندارد.

#### ۶-بویلرهای زباله سوز<sup>۶</sup>:

هدف اصلی از بین بردن زباله های شهری و خانگی می باشد ضمن اینکه با این عمل برق نیز تولید میشود. این بویلرها به تجهیزات اضافی قبل و بعد از بویلر نیاز دارند (جهت انباشت زباله و تخلیه خاکستر).

---

1 Indirect Heater

2 Direct Heater

3 Recovery Boiler

4 Heat Recovery Steam Generator

5 Recovery Boiler

6 Incinerator Boiler

## ۷- بویلرهای ذغال سنگ سوز<sup>۱</sup>:

دراین بویلرها نیز به دلیل استفاده از ذغال سنگ به عنوان سوخت به تجهیزات جانبی قبل و پس از بویلر نیاز می باشد.

### ۱-۷- اجزاء بویلر:

هر بویلر از اجزاء گوناگونی تشکیل شده است که هرکدام جهت هدفی خاص در بویلر نصب می شوند. قسمتهای مختلف بویلر با توجه به نوع کارکرد به چند دسته کلی تقسیم می شوند که عبارتند از:

#### اجزا تحت فشار<sup>۲</sup>:

به تمام قسمتهایی که از داخل آنها آب یا بخار عبور می کند (مثل لوله ها و هدرها) و فشار داخل آنها نسبت به محیط اطراف بسیار بیشتر است اجزاء تحت فشار می گویند (شکل-۴). بطور کلی مسیر آب از پمپ تغذیه آب بویلر<sup>۳</sup> تا خروجی سوپرهیترها<sup>۴</sup> به اجزاء تحت فشار معروفند که به ترتیب عبارتند از:

#### لوله اصلی تغذیه آب<sup>۵</sup>:

انتقال دهنده آب از خروجی پمپ تغذیه بویلر تا هدر ورودی اکونومایزر می باشند.

#### هدر ورودی اکونومایزر<sup>۶</sup>:

به طور کلی وظیفه هر هدر توزیع یا جمع نمودن سیال (آب یا بخار) می باشد.  
الف) هدر توزیع کننده: اگر تعداد خروجی های هدر نسبت به ورودیهای آن بیشتر باشد، هدر توزیع کننده است. به عبارتی هدر ورودی می باشد.  
ب) هدر جمع کننده: اگر تعداد ورودیهای هدر نسبت به خروجی های آن بیشتر باشد هدر از نوع جمع کننده یا هدر خروجی می باشد.

#### لوله های اکونومایزر<sup>۷</sup>:

هدف از ساخت اکونومایزر افزایش راندمان بویلر می باشد. زیرا هرچه میزان جذب انرژی گرمایی حاصل از گازهای احتراق توسط آب بیشتر باشد موجب می شود که راندمان

---

1 Coal Boiler

2 Pressure Part

3 Boiler Feed Water

4 Super Heater

5 Main Feed Water Pipe

6 Economizer Inlet Header

7 Economizer tube

بویلر نیز افزایش یابد چرا که حداکثر راندمان حرارتی چیزی جز حداکثر انتقال حرارت بین دو سیال سرد و گرم نیست. به عبارت دیگر وظیفه اکونومایزر افزایش درجه حرارت آب ورودی تا نزدیکی دمای اشباع (حدود کمتر از دمای اشباع آب) می باشد و موجب جلوگیری از کاهش دمای آب موجود در درام می شود و نیز محل نصب آن در محل خروجی گازهای حاصل از احتراق است.

جهت انتقال حرارت بیشتر، به سطوح حرارتی زیادتری نیاز می باشد. لذا بدین علت است که لوله های اکونومایزر را بصورت فین دار می سازند (وجود فین در اطراف لوله سبب افزایش سطوح حرارتی می شوند). وجود یا عدم وجود فین در اطراف لوله های اکونومایزر بستگی به نوع سوخت مصرفی بویلر دارد. اگر سوخت مصرفی از نوع سوخت سبک باشد (مانند گاز طبیعی) از لوله های فین دار استفاده میشود زیرا افت فشار گازهای حاصل از این نوع سوخت کم می باشد. ولی اگر سوخت مصرفی از نوع سنگین (مانند مازوت) باشد از لوله های بدون فین در اکونومایزر استفاده می شود. بطور کلی اگر افت فشار گازهای حاصل از احتراق کم باشد لوله های اکونومایزر فین دار هستند در غیر این صورت بدون فین هستند.

آرایش لوله های اکونومایزر به دو صورت است:

۱. آرایش مربعی<sup>۱</sup>

۲. آرایش مثلثی<sup>۲</sup>

**هدرهای خروجی اکونومایزر<sup>۳</sup>:**

بعنوان جمع کننده آب از حلقه های اکونومایزر و هدایت آن به سمت درام بخار می باشد.

لوله های ارتباطی بین خروجی اکونومایزر و درام بخار<sup>۴</sup>:

آب را از خروجی اکونومایزر تا ورودی درام بخار انتقال می دهد.

**درام بخار<sup>۵</sup>:**

وظیفه درام جداسازی آب و بخار از یکدیگر می باشد. تجهیزاتی که توسط شرکتهای مختلف برای جداسازی بخار بکار می رود متفاوت بوده ولی اساس کار آنها یکی است. در کلیه این تجهیزات مخلوط آب و بخار وارد جداکننده آب و بخار<sup>۶</sup> شده و با حرکت چرخشی

---

1 Iin Line

2 Stager

3 Economizer Outlet Header

4 Economizer Outlet Pipe to Steam Drum

5 Steam Drum

6 Separator

که به سیال (آب و بخار) داده می شود بدلیل نیروی گریز از مرکز که ایجاد می شود و قطرات آب بعلت سنگینی وزن از بخار جدا می گردند. سپس بخار پس از عبور از صفحات خشک کننده<sup>۱</sup> آخرین قطرات آب خود را نیز از دست داده و به سمت لوله های سوپر هیترو هدایت می شود و آب بدون ذرات بخار توسط لوله های پایین آورنده<sup>۲</sup> به سمت لوله های دیوارهای<sup>۳</sup> هدایت می شوند.

دومین وظیفه درام عمل نمودن به عنوان یک مخزن و ذخیره ای برای بویلر است. درام می تواند با ذخیره آب یا بخار در خود، در شرایط بحرانی بهره برداری از بویلر مقداری از نیازهای آب یا بخار را تامین نماید. در درام تقسیم یکنواخت آب ورودی از اکونومایزر و تزریق بعضی از محلولهای شیمیایی به بویلر انجام می گیرد. از آنجا که فشار داخل درام زیاد است لذا آنرا به شکل استوانه ای که از قوانین مخازن تحت فشار جدار ضخیم تبعیت می کند، طراحی می نمایند.

درام بخار از اجزاء مختلفی تشکیل شده است که به دو قسمت داخلی<sup>۴</sup> و خارجی<sup>۵</sup> تقسیم می شوند. از آنجاییکه شرح وظایف هریک از اجزا درام بسیار گسترده است لذا فقط به اسامی اجزا اصلی آن اشاره می شود:

۱- جدا کننده آب و بخار<sup>۶</sup>

۲- خشک کننده آب و بخار<sup>۷</sup>

۳- رطوبت گیر

۴- لوله های داخلی

درام آب<sup>۸</sup> یا درام پایین<sup>۹</sup>:

این درام در پایین ترین قسمت بویلر قرار گرفته و به شکل یک مخزن استوانه ای افقی می باشد و در حقیقت بصورت یک هدر عمل می کند. پس از جدا شدن آب و بخار در درام، آب به سمت لوله های پایین رونده هدایت شده و وارد درام پایین می گردد. وظیفه این درام تقسیم یکنواخت آب تغذیه به لوله های دیواره ها و Bank Tube می باشد.

---

1 Drier  
2 Down Comer  
3 Water Wall  
4 Internal  
5 External  
6 Separator  
7 Chevron Drier  
8 Water Drum  
9 Lower Drum

## Bank Tube

دسته‌ای از لوله‌ها هستند که درام بالا را به درام پایین وصل می‌کنند بطوریکه قسمتی از آنها به صورت لوله‌های پایین رونده و قسمتی از آنها بصورت Riser عمل می‌کنند.

### لوله‌های بدنه اصلی بویلر (لوله‌های دیواره‌ای)<sup>۱</sup>

در بویلرهای مدرن هر سه نوع انتقال حرارت جابجایی، هدایت و تشعشع صورت می‌گیرد. که حاصل آن تبدیل آب به بخار در لوله‌های دیواره‌ای است. در این بویلرها معمولاً از لوله‌های عمودی بصورت دیوار یکپارچه استفاده می‌شود. آب درون لوله‌ها با جذب انرژی حرارتی، عمل خنک کاری دیواره‌ها را نیز انجام می‌دهند. بین لوله‌های دیواره‌ای یک نوع نوار فلزی که به فین موسوم است، قرار داده شده است. این فین‌ها رابط بین لوله‌ها بوده که علاوه بر یکپارچه ساختن دیواره‌ها، لوله‌های بکار رفته در آن، خود دارای فین بوده و با کنار هم قرار دادن دیواره یکپارچه بوجود می‌آید.

نحوه ساختمان دیواره آبی بستگی به احتراق، شرایط بخار و اندازه بویلر دارد. ترکیب قرار گرفتن لوله‌های واتروال در بویلرهای مختلف به شرح زیر است:

a) لوله‌های ساده که در داخل بلوک قرار گرفته‌اند و معمولاً به آنها Boiling Wall می‌گویند.

b) لوله‌های ساده که نزدیک هم قرار گرفته‌اند و بنام لوله‌های مماسی معروفند.

c) لوله‌های فین دار

نقش دیواره آبی در جذب حرارت مورد نیاز برای تولید بخار و مزایای فراوان لوله و فین در این فرآیند، عبارتند از:

توزیع متعادل شار حرارتی در امتداد سطح داخلی لوله‌ها

وجود سطوح گسترده فین که باعث کاهش فلز لوله برای جذب حرارت می‌شود.

عدم نشت محصولات احتراق به خارج از بویلر که علاوه بر کاهش آلودگی محیط بویلر، باعث می‌شود که از I.D. Fan با قدرت کمتری استفاده گردد.

استحکام زیاد دیواره‌ها و لوله‌ها، که باعث می‌شود در اثر تنشهای حرارتی، دچار خمیدگی نشود.

کاهش زمان نصب

کاهش وزن دیواره‌ها و راه اندازی ساده‌تر بویلر

---

1 Water Wall Tube



به دلیل عدم تماس بین عایق کوره‌ها و محصولات احتراق به عمر عایق‌ها افزوده شده، و جنس آنها نیز از لحاظ اقتصادی مناسبتر خواهد شد. علاوه بر هزینه، تعمیر و نگهداری نیز در این زمینه کاهش می‌یابد.

لوله‌ها می‌توانند به گونه‌ای طراحی شوند که سرعت سیال داخل آن با میزان انتقال حرارت متناسب باشد.

از معایب این نوع دیواره‌ها، گران بودن تولید آنها، نیاز به تخصص زیاد جهت جوشکاری و اتصال لوله‌ها به فین و پرهزینه بودن تعمیرات و تعویض قسمت آسیب دیده دیوار می‌باشد. در لوله‌های دیواره‌ای همواره جریان آب در داخل لوله از پایین بطرف بالا می‌باشد. و هرچه آب بطرف بالا حرکت می‌کند حرارت بیشتری جذب نموده و در نتیجه بخار بیشتری تولید می‌گردد. در بویلرهای گردش طبیعی<sup>۱</sup> این حرکت بصورت طبیعی و بواسطه اختلاف دانسیته آب و مخلوط آب و بخار در لوله پایین آورنده<sup>۲</sup> با توجه به کم بودن اختلاف دانسیته برای چرخش آب از پمپهای گردش اجباری<sup>۳</sup> استفاده می‌کنند.

لازم به ذکر است که تمام آب خروجی از لوله به بخار تبدیل نمی‌شود بلکه درصدی از آن به بخار تبدیل می‌شود. این درصد بخار بستگی به عدد چرخش<sup>۴</sup> بویلر دارد. بطوریکه هرچه عدد چرخش بویلر کمتر باشد میزان درصد بخار خروجی از لوله‌های دیواره‌ای بیشتر است. پس می‌توان بیان کرد:

عدد چرخش آب در بویلر/1=درصد بخار خروجی از لوله‌های دیواره‌ها یا کیفیت بخار)  
مثلاً وقتی که می‌گوییم عدد چرخش یک بویلر ۴ است یعنی اینکه اگر یک کیلوگرم آب در بویلر به بخار تبدیل شود باید ۴ بار در لوله‌های دیواره‌ای و Down Comer به حرکت درآید یا به عبارتی به ازای هر بار چرخش ۲۵٪ آن به بخار تبدیل می‌شود.

برای بویلرهای درام دار عدد چرخش از ۳ الی ۱۰ می‌باشد و در بویلرهای بدون درام ۱ می‌باشد. با افزایش عدد چرخش حجم بویلر افزایش می‌یابد، زیرا کیفیت بخار کم شده و تعداد دفعات چرخش آب در بویلر برای تبدیل آب به بخار، بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش عدد چرخش احتمال سوختن لوله‌های بویلر کم می‌گردد و بهره‌برداری مطمئن تر است.

---

1 Natural Circulation

2 Forced Circulation

3 Forced Circulation Pump

4 Circulation Number

## لوله‌های بالابر<sup>۱</sup>:

وظیفه آنها بعنوان انتقال دهنده آب و بخار از هدرهای خروجی لوله‌های دیواره‌ای به درام می‌باشد. لذا می‌توان گفت Riser Pipe واسطه‌ای بین هدر دیواره‌ها و درام بخار است. زیرا اگر لوله‌های دیواره‌ای بطور مستقیم به درام وصل شوند به دلیل کثرت تعداد آنها، تعداد سوراخهای ایجاد شده در روی سطح درام بسیار زیاد می‌شود که حاصل آن ساخت درام با ضخامت بسیار زیاد می‌شود. لذا برای جلوگیری از این پدیده، آب و بخار جاری در لوله‌های دیواره‌ای، ابتدا در هدرهای خروجی جمع آوری شده، سپس توسط چند لوله Riser که تعداد آنها نسبت به لوله‌های دیواره‌ای بسیار کمتر است به سمت درام هدایت می‌شود.

## لوله‌های انتقال دهنده بخار اشباع<sup>۲</sup>:

وظیفه آنها انتقال بخار از درام تاهدرورودی سوپرهیتر می‌باشد. بخاری که بعد از درام مجدداً حرارت داده می‌شود بخار خشک نامیده می‌شود که اصطلاحاً کیفیت آن ۱۰۰٪ است.

## سوپرهیتر (اولیه و ثانویه) و دی سوپرهیتر<sup>۳</sup>:

بخارخروجی از درام برای اینکه انرژی بیشتری داشته باشد باید از حرارت بالاتری برخوردار باشد که اصطلاحاً به آن بخار خشک یا سوپرهیت می‌گویند. این عمل در داخل سوپرهیترها که از لوله‌های موازی تشکیل شده‌اند و در مسیر گازهای داغ حاصل از احتراق قرار گرفته‌اند، انجام می‌گیرد. این لوله‌ها حرارت محصولات احتراق را به بخار درون خود منتقل می‌کنند.

بسته به نوع بویلر سوپرهیترها یک یا چند مرحله‌ای طراحی می‌شوند. سوپرهیترها اکثراً بالای محفظه احتراق قرار دارند و این حرارت را بیشتر به صورت تشعشع و مقداری بصورت جابجایی دریافت می‌کنند. یک قسمت دیگر بویلر در منطقه کنوکسیون بویلر قرار دارد که حرارت بصورت جابجایی به آنجا منتقل می‌شود. بخار ابتدا وارد سوپرهیتر اولیه شده و پس از خروج از آن توسط دی سوپرهیتر از نظر درجه حرارت کنترل شده، سپس وارد سوپرهیتر ثانویه شده به سمت بیرون از بویلر هدایت می‌شود. لوله‌های سوپرهیتر به صورت افقی، آویزان و یا L شکل طراحی می‌گردند. توربین‌هایی که در درجه حرارت زیاد بخار کار می‌کنند بینهایت به تغییرات درجه حرارت سوپرهیترها حساس هستند و تغییرات زیاد درجه حرارت ممکن است سبب خرابی محور و پره‌های توربین گردد. در سوپرهیترهای تشعشعی در اثر

1 Riser Pipe

2 Saturated Steam Pipe

3 Primary & Secondary Super Heater and Desuperheater

افزایش بار بویلر درجه حرارت افت می کند ولی در سوپرهیترهای جابجائی برعکس می باشد زیرا جریان گازهای حاصل از احتراق به افزایش درجه حرارت با سرعت بیشتری نسبت به سرعت جریان بخار صورت می گیرد. پس سیستم کنترل دمای بخار سوپرهیت باید بتواند بین پایین ترین و بالاترین مقدار بار بویلر درجه حرارت لازم را ثابت نگه دارد. علت اینکه دی سوپرهیتر دوجداره است برای این است که از رسیدن آب اشباع به دیواره های داغ لوله جلوگیری کند تا موجب شکسته شدن آن نشود. در بویلرهائی که درجه حرارت خروجی پایین است نیازی به سوپرهیتر نمی باشد.

### ری هیتر<sup>۱</sup>

انرژی بخار هنگام خروج از توربین فشار قوی بعلاوه انجام کار افت پیدا می کند. برای جلوگیری از وجود رطوبت در طبقات فشار ضعیف توربین، باید انرژی بخارهای برگشتی از توربین فشار قوی را بالا برده، سپس به سمت توربین فشار متوسط هدایت نمود. این عمل توسط ری هیتر انجام می گیرد. ری هیترها همانند سوپرهیتر بوده و از لوله های افقی و موازی تشکیل شده اند. این لوله ها در مسیر محصولات احتراق قرار گرفته و حرارت گازهای داغ را به داخل خود منتقل می کنند. وجود ری هیتر بستگی به ظرفیت بویلر و نوع طراحی نیروگاه دارد. در بویلرهای با ظرفیت کم معمولاً از ری هیتر استفاده نمی کنند ولی در بویلرهای با ظرفیت بالا برای افزایش راندمان حتماً از ری هیتر استفاده می شود. معمولاً ری هیتر به دو بخش اولیه و ثانویه و گاهی به چندین بخش تقسیم می شود. اجزا ری هیتر عبارتند از:

(۱) لوله سرد بازیاب

(۲) هدر ورودی ری هیتر

(۳) لوله های ری هیتر

(۴) هدر خروجی ری هیتر

(۵) لوله های گرم بازگشتی

لوله اصلی انتقال دهنده بخار<sup>۲</sup>:

بخار سوپرهیت را از هدر خروجی سوپرهیت ثانویه به سمت توربین یا مبدل های حرارتی هدایت می کند.

---

1 Reheater

2 Main Steam Pipe

### پیش گرمکن هوا<sup>۱</sup>:

هنگامیکه هوای محیط سرد می‌شود، ذرات آب موجود در هوا در حین برخورد با پره‌های فن موجب یخ زدن آب روی پره‌های فن می‌شوند و این سبب سنگین شدن و شکستن پره‌های فن می‌شود. لذا برای جلوگیری از این امر، هوای ورودی به کوره یک هیتر که از نوع بخاری است گرم می‌شود.

### ژونگستروم<sup>۲</sup>:

برای جلوگیری از ورود هوا با درجه حرارت پایین به داخل کوره از ژونگستروم (شکل- ۵) استفاده می‌شود و لذا از آن برای گرم کردن هوای ورودی به کوره استفاده می‌شود و از آنجاییکه هر دو سیال گاز هستند و راندمان آن نیز کم است آن را به صورت دوار می‌سازند. بطوریکه نیمی از آن در قسمت سرد و نیمی دیگر آن در قسمت گرم (دود) قرار دارد و با چرخش پره‌های سرد و گرم موجب انتقال حرارت می‌شود.

### کوره<sup>۳</sup>:

کوره یا اتاق احتراق محفظه‌ای است که عمل احتراق سوخت در آن انجام می‌گیرد و باعث می‌شود تا انرژی حرارتی ایجاد شده توسط احتراق سوخت بصورت تشعشع در فضای کوره و یا بصورت جابجایی در جریان گازهای داغ و هدایت از طریق فلز لوله‌ها به آب تغذیه درون لوله‌ها انتقال یابد. حاصل این تبادل حرارت، جذب انرژی حرارتی توسط آب داخل لوله‌ها و تبدیل آن به بخار است.

### مشعلها<sup>۴</sup>:

وظیفه مشعلها تبدیل انرژی شیمیایی سوخت به انرژی حرارتی است. برای یک احتراق مناسب لازم است که سوخت بصورت پودر درآمده، بطوریکه قطرات با یک توزیع یکنواخت بتوانند سریعتر تبخیر شوند. مشعلها علاوه بر پودر کردن سوخت و تبدیل آن بصورت ذرات ریز، برای تبخیر سریع سوخت و احتراق، حرکتی بین قطرات سوخت و هوا ایجاد می‌کنند. به عبارت دیگر یک اغتشاش کامل بین ذرات هوا و سوخت بوجود می‌آورند. این امر سبب می‌شود که مخلوط یکنواختی از هوا و سوخت در فضای احتراق بوجود آید.

---

1 Steam Air Heater

2 Gas air heater

3 Furnace

4 Burners

## G.R.F<sup>1</sup>:

بخشی از گازهای حاصل از احتراق با بخاطر کنترل Nox و افزایش راندمان حرارتی به هوای ورودی اضافه می‌شود. با استفاده از G.R.F. درصدی از محصولات احتراق خروجی ازدودکش را به داخل کوره می‌فرستیم و این محصولات احتراق مانند یک لایه سطح خارجی لوله‌ها را می‌پوشانند و مانع جذب انرژی لوله‌ها از طریق تشعشع می‌شود. زیاد شدن مولکولها در داخل کوره کنوکسیون را زیاد می‌کند. G.R.F. در دمای کم خیلی موثر است، زیرا جذب انرژی تشعشعی را کم می‌کند و در راه‌اندازی مانع Over Heat شدن سوپرهیت می‌شود.

### کنترل دمای بخار خروجی از سوپرهیترها:

#### الف - استفاده از دی سوپرهیتر (آب اسپری):

با استفاده از آب اسپری بعد از سوپرهیتر اولیه دمای بخار سوپرهیتر ثانویه کاهش پیدا می‌کند که فرمان آن از دمای بخار خروجی گرفته می‌شود. وجود این سیستم برای بویلر لازم است چون سریع و قابل اطمینان است. این سیستم طوری طراحی می‌شود که در بار نامی نیز مقداری آب اسپری وجود داشته باشد تا در صورتیکه در شرایط خاصی مثل دوده گرفتن لوله‌ها، دما به مقدار نامی نرسد با کاهش آب اسپری دمای نامی ایجاد می‌شود.

#### ب - تغییر زاویه مشعلها:

با این کار مقدار انرژی آزاد شده در داخل کوره رادر ارتفاعهای متفاوت تغییر می‌توان داد. چون در این حالت مقدار انرژی آزاد شده ثابت می‌ماند. پس با پایین آمدن سر مشعل، میزان بخار تولیدی افزایش می‌یابد پس درجه حرارت بخار کم می‌شود.

#### ج - استفاده از G.R.F.:

در هنگام راه‌اندازی جهت کنترل دمای بخار، مقداری از گازهای خروجی توسط G.R.F. به داخل کوره فرستاده می‌شود.

### بویلرهای زباله سوز:

افزایش روزافزون مقدار زباله، فضای کم برای جمع‌آوری و نامناسب بودن روشهای جمع‌آوری و نابودی این زباله‌ها سبب شد دانشمندان برای رهایی از زباله‌ها، فرآیند گرمایش در دمای بسیار بالا (پلاسمای گرمایی) را مناسب تشخیص دهند؛ روشی که در آن دما آنقدر بالا برده می‌شود که مواد قدرت مقاومت ندارند و تجزیه می‌شوند، که مواد حاصله بسیار ساده‌ترند و خطرات مواد اولیه را ندارند، بعلاوه موادی که بصورت جامد باقی می‌مانند، در خاک نفوذ

---

<sup>1</sup> Gas Recirculation Fan

نمی‌کنند و اختلاف حجم بسیاری با مقدار اولیه دارند کما اینکه بعنوان مواد اولیه در صنعت قابل استفاده می‌باشند.

### پلازما:

پلازما یکی از حالات ماده می‌باشد. پلاسمای ستارگان و در فضای رقیق بین آنها، ۹۹٪ جهان اطراف را در بر گرفته است. کلمه Plasma ابتدا به گاز یونیزه شده توسط دکتر لانگ مویر، یک شیمیدان-فیزیکدان آمریکایی در سال ۱۹۲۹ گفته شد. پلازما شامل مجموعه‌ای از اتمها، یونها و الکترونهاست که آزادانه حرکت می‌کنند. انرژی برای جدا کردن الکترونها از اتمهای گاز لازم است تا پلازما بوجود آید. انرژی می‌تواند از منابع متعدد باشد: حرارتی، الکتریکی یا نوری (ماوراء بنفش یا مریی لیزر). پلازما توسط میدانهای مغناطیسی و الکتریکی تحت تاثیر قرار می‌گیرد و شتاب می‌گیرد که به آن توانایی را می‌دهد تا گازی قابل کنترل و مورد استفاده باشد.

سیستم پلازما برای دفع زباله:

همه سیستمهای پلازما از ۵ قسمت اصلی تشکیل می‌شوند:

۱- قسمت تغذیه

۲- قسمت محفظه احتراق

۳- قسمت عمل و فرایند روی گاز خروجی

۴- جمع آوری محصولات جامد

۵- امکانات و تجهیزات جانبی

مواد زباله پس از ورود به محوطه وارد قسمت تغذیه می‌شود. در قسمت تغذیه با دبی ازپیش تعیین شده، مواد را به داخل کوره (محفظه فرایند) می‌ریزند. گاز پلازما که توسط مشعلهایی در درون کوره به دمایی چند برابر دمای سطح خورشید رسیده است، تشعشع کرده (در اثر یونیزه شدن جهشهای الکترونی) و گرما از طریق تشعشعی و سپس جابجایی به لایه‌های نزدیک مشعل زباله انتقال می‌یابد. تشعشع، همرفت و هدایت هر سه عوامل انتقال حرارت از پلازما به لایه‌های زباله در محفظه فرایند هستند. زباله به روش Pyrolysis (سوختن بدون حضور اکسیژن) تجزیه شده، به مواد ساده و اولیه تبدیل می‌شوند. گازهای تولید شده توسط خروجی گاز که در دیواره استوانه کوره است و باقیمانده جامد که ماده‌ای شیشه مانند و فلزات هستند، از کف کوره خارج می‌شوند. گازهای خارج شده که قسمت عمده آن را هیدروژن و مونوکسید کربن تشکیل می‌دهد، شامل گازهای اسیدی مانند  $H_2S$  و  $HCl$  و گاهی

اوقات فلزات فرار است.

در تکنولوژی پلاسما، بر خلاف سوزاندن معمولی، هیچ اکسیژنی مصرف نمی‌شود و نیاز به مخازن اکسیژن نیست و منبع انرژی آن سوخته‌های فسیلی نیست. ارزش حرارتی حاصل از مشعل پلاسما ۲ تا ۳ برابر ارزش حرارتی حاصل از سوخته‌های فسیلی است. تکنولوژی پلاسما برای بدست آوردن دماهای بسیار بالا در مواد ذوب شده قابل کنترل است. در این سیستم فلزات و مواد غیرآلی موجود در زباله‌ها فازهای مختلفی را تشکیل می‌دهند و قابل جداکردن هستند.

زمینه فعالیت‌های بخش طراحی و مهندسی بویلر در شرکت صنایع آذرآب - طراحی دیگهای بخار یکپارچه<sup>۱</sup> صنعتی و نیروگاهی لوله آبی با چرخش طبیعی<sup>۲</sup> از ظرفیت حدود ۲۰T/Hr تولید بخار به بالا دامنه وسیع فشار و درجه حرارت بخار طبق درخواست مشتری.

- قرارداد انتقال تکنولوژی با شرکت IHI ژاپن در زمینه دیگهای بخار لوله آبی با سیستم چرخش طبیعی و سوخته‌های گازی و مایع به شرح زیر:

- دیگهای بخار یکپارچه از ظرفیت حدود ۲۰T/Hr تا حدود ۱۰۰T/Hr
- دیگهای بخار صنعتی از ظرفیت ۵۰T/Hr تا حدود ۳۵۰T/Hr
- دیگهای بخار نیروگاهی از ظرفیت حدود ۳۹۰T/Hr تا حدود ۲۲۰۰T/Hr
- قرارداد انتقال تکنولوژی با شرکت Gadelius k.k در زمینه پیش گرمکنهای هوا از

نوع Lungstorm.

- سیکل ترکیبی FW

انواع بویلرهای نیروگاهی و صنعتی و تجهیزات کمکی قابل ساخت در شرکت صنایع آذرآب

## ۱-۸- انتخاب نوع بویلر

بویلرهای لوله آبی یکی از تولیدات اصلی شرکت صنایع آذرآب بوده و یکی از بزرگترین سازندگان بویلر در خاورمیانه می باشد. انواع مختلف بویلرهای لوله آبی با ظرفیت ۲۰T/Hr تا تقریباً ۲۰۰۰T/Hr بخار را مطابق با نمودار زیر (شکل-۶) تحت

---

1 Package

2 Natural Circulation Water Tube Boiler

گواهینامه I.H.I ژاپن طراحی و ساخت آنرا انجام می دهد.

#### ۱) دیگهای بخار نیروگاهی از نوع بازگرمایش (SR)

این نوع دیگ دارای یک درام و با گردش طبیعی بوده و جریان هوا از نوع درافت اجباری به داخل کوره می باشد. همچنین دارای سوپرهیتر و اکونومایزر است (شکل-۷).

این نوع دیگ مرکب از بخش کوره و منطقه بازیابی گرماست. کوره کف سقف نمای جبهه و عقب نیز دیوارهای جانبی دارای دیواره های لوله آب هستند.

نوع ۲۵۰MW آن هم اکنون در نیروگاه شهید رجایی نصب شده است که شامل ۱۲ مشعل (سه ردیف چهار تایی) در دیواره جلویی و ۸ مشعل (دو ردیف چهار تایی) در دیواره عقبی تعبیه شده اند. گازهای خروجی از کوره از دو مسیر موازی عبور می کنند که در یکی از این مسیرها ری هیترها و در مسیر دیگر سوپرهیترها قرار گرفته اند. گازهای داغ پس از عبور از مسیرهای موازی و واگذاری گرما به ری هیتر و سوپرهیتر در انتها به یکدیگر ملحق گشته و سپس از اکونومایزر اولیه عبور و آنگاه وارد پیش گرمکنهای هوا می گردند.

کنترل ری هیتر در این دیگ به کمک دمپرهایی که در انتهای ری هیترها نصب شده اند انجام می گردد و بدین ترتیب نیاز به بازچرخش گازهای داغ و یا ملایم کننده پاششی و یا دستکاری مشعلها نخواهد بود. ترکیب سیگنال دمای بخار خروجی از ری هیتر و تغییرات شدید بار توربین ژنراتور دمپرهایی ری هیتر و سوپرهیترها را بطور منظم به گونه ای تنظیم می کنند که دمای بخار خروجی ثابت بماند.

مزایای عمده کنترل ری هیتر با دمپر می توان قدرت مصرفی کمتر حفاظت بهتر ری هیتر و پاسخ سریع به تغییر دمای ری هیتر در تغییرات سریع بار را ذکر کرد. نقش ری هیترها بالا بردن درجه حرارت بخار خروجی از توربین H.P. تا دمای خروجی از سوپرهیترنهایی به منظور وارد شدن در توربین L.P. را نام برد.

درام این دیگ در قسمت بالای آن و در تمامی عرض بویلر قرار گرفته است. مخلوط آب و بخاری که از دیواره های آبی (رایزرها) وارد درام می گردند بوسیله علامتهای جدا کننده از یکدیگر جدا می شوند. مشخصات این نوع بویلر به صورت زیر است:

ظرفیت بخار تولیدی ۳۹۰ تا ۲۲۰۰ تن در ساعت

میزان فشار طراحی ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

سوخت این نوع دیگ بخار بنا به امکانات می تواند گاز طبیعی یا مازوت باشد.

#### ۲- دیگهای بخار از نوع ثابت (SN)



این نوع بویلرها با گواهینامه I.H.I ژاپن برای تولید نیرو و بخار به شکل نیروگاهی و صنعتی طراحی و ساخته می شود. این بویلرها به صورت تک درام که از بالا نگهداشته شده، بدون بازیاب حرارتی و انتقال حرارت از طریق تشعشع بوده و از نوع گردش جریان طبیعی، می باشند. سوخت این نوع دیگ بخار گاز طبیعی یا مازوت و یا گازوییل و ظرفیت متوسط با فشار و درجه حرارت بالا می باشد.

ظرفیت بخار تولیدی	۹۰ تا ۹۵۰ تن در ساعت
میزان فشار طراحی	۸۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

### ۳- دیگهای بخار از نوع ثابت (SD)

این نوع دیگ با کارایی و کیفیت فوق العاده بالا جایگاه خاصی را در بویلرهای نیروگاهی و صنعتی پیدا کرده است. اسکلت بویلر مذکور ثابت بوده و دارای دو درام آب و بخار با گردش جریان طبیعی سیال می باشد و دارای کوره ای با ابعاد بزرگ جهت احتراق کامل سوخت و همچنین سوپرهیترهایی با میزان کنترل دمای وسیع می باشد.

مشخصات دیگر این نوع بویلر:

ظرفیت بخار تولیدی	۴۰ تا ۴۲۰ تن در ساعت
میزان فشار طراحی	۴۰ تا ۱۱۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع
حداکثر درجه حرارت	۵۱۵ درجه سانتی گراد (۹۶۰ درجه فارنهایت)

سوخت این نوع دیگ بخار گاز طبیعی یا مازوت و یا گازوییل می باشد.

### ۴- دیگ بخار از نوع واتر تیوب (SCM)

برای راحتتر بودن کارکرد تعمیر و نگهداری طرح بویلرهای واتر تیوب دارای دو درام می باشد و انتقال حرارت توسط کوره و از طریق جابجایی و تشعشع انجام می پذیرد. در این سیستم آب پیشگرم شده به درام آب و بخار که در ماکزیمم ارتفاع بویلر واقع شده منتقل می شود و سپس از طریق آن به کلیه مجاری توزیع می گردد.

یکی از تفاوتهایی که این نوع دیگ بخار با نوع I دارد نداشتن سیستم بازیاب حرارتی است. ساختمان دیواره های آبی تماما جوشکاری شده با قطر خارجی ۲ اینچ یا ۲,۵ اینچ برای بخشهای جابجای استفاده می شود. فضای خالی کمی بین دیواره آبی و پوسته خارجی این نوع بویلر وجود دارد که پانل لوله های گروهی متصل به دو درام را از کوره مجزا می کند. در بویلرهای AZB-III نوع (۰۴۰ تا ۱۰۰ و ۰۶۰ تا ۰۶۳) جریان دو طرفه برای گازهای ناشی

از احتراق بکار رفته و در بویلرهای AZB-III نوع (۱۳۰ تا ۳۰۰ و ۱۰۲ و ۰۸۳ تا ۲۰۳) جریان یکطرفه در نظر گرفته شده است.

جهت میزان کردن سطح آب در درام علامتهایی درست در زیر سطح عادی آب تعبیه شده است. به این شکل میزان خشکی بخار تولید شده بالای ۹۹,۵ درصد نگهداشته می شود.

مشخصات دیگر این نوع بویلر:

ظرفیت بخار تولیدی ۵ تا ۳۵ تن در ساعت

میزان فشار طراحی ۱۰ تا ۲۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

سوخت این نوع دیگ بخار مازوت می باشد.

#### ۵- دیگ بخار از نوع پیش ساخته (SC)

این دیگ بخار بر خلاف بویلرهای یاد شده پس از ساخت و مونتاژ در کارگاه بعنوان یک واحد کامل پیش ساخته به محل مورد نظر انتقال یافته و در محل نصب می گردد ابعاد و وزن این دیگ بخار رابطه مستقیمی با محدودیتهای امکانات حمل و نقل وزنه‌های سنگین دارد (شکل-۱۰).

مشخصات دیگر این نوع بویلر:

ظرفیت بخار تولیدی ۲۵۰ تن در ساعت

میزان فشار طراحی ۳۰ تا ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

حداکثر درجه حرارت ۴۸۰ درجه سانتی گراد (۹۰۰ درجه فارنهایت)

سوخت این نوع دیگ بخار از نوع سوخته‌های گازی یا گازوئیل و یا ترکیبی از هر دو می باشد.

### ۹-۱- هدف تحقیق

هدف از مطالعه حاضر، بررسی شرایط عملیاتی بهینه دو دیگ بخار لوله ای سه مرحله ای که به طور موازی به هم متصل شده اند و برای گازوئیل مناسب می باشند است. داده ها با استفاده از یک دستگاه آنالایزر TESTO مدل M-I ۳۰۰ به طوری که پروب آن در خروجی دیگ بخار قرار گرفته است به دست آمده اند. متغیرهای عملیاتی در نظر گرفته شده، فشار تزریق و تعداد مشعل ها هستند. انتشار آلاینده ها در محدوده مقادیر مقرر شده بدست می آیند. اثر افزایش قدرت اسمی دیگ بخار، تلفات ناشی از آنتالپی محسوس دود بررسی می شود. همچنین اثر فشار تزریق سوخت بر روی غلظت منوکسید کربن نیز بررسی میگردد

## ۱-۱۰- بیان مساله

### ۱-۱۰-۱- بهینه سازی

مفهوم بهینه سازی درمهندسی به معنای به حداکثر رساندن و یا به حداقل رساندن یک یا دو تابع هدف است. یک مساله بهینه سازی شامل یک یا چند متغیر مستقل نیز می باشد که بر روی توابع هدف اثر گذارند.



شکل ۱-۱- بخش های اصلی هر نوع مساله بهینه سازی

### ۱-۱۰-۱-۱- تابع هدف

اصلی ترین بخش هر مساله بهینه سازی، تابع هدف آن است. طبق تعریف تابع هدف، کمیتی است که می بایست به حداقل یا به حداکثر برسد در این مطالعه، دو تابع هدف مورد بررسی قرار میگیرد این دو تابع هدف راندمان بویلر و میزان انتشار آلودگی است. هدف از بهینه سازی پیدا کردن شرایطی است که میزان راندمان بویلر حداکثر و میزان انتشار آلودگی حداقل باشد.



شکل ۱-۲- تابع هدف مورد بررسی در این پژوهش

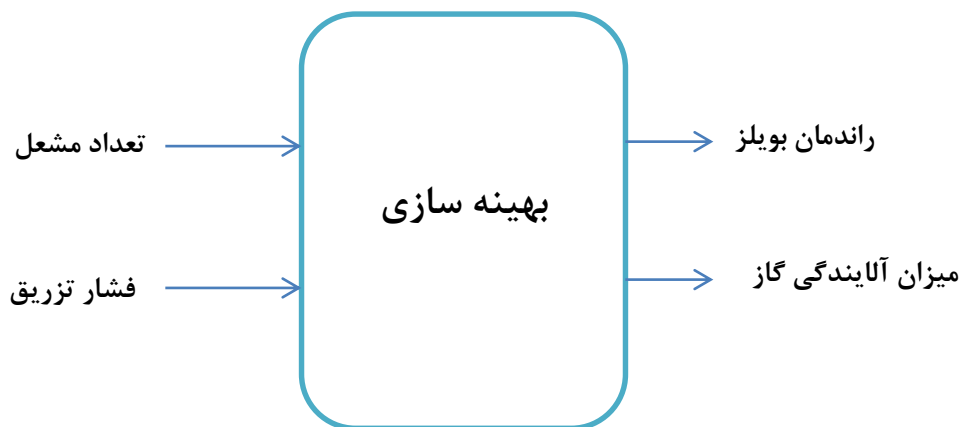
#### ۱-۱۰-۲- متغیرهای مستقل

دومین بخش هر مساله بهینه سازی متغیرهای مستقل آن است در این مطالعه دو متغیر مستقل در نظر گرفته شده است که به دنبال یافتن مقادیر بهینه آنها هستیم این ۲ متغیر بر راندمان بویلر و میزان انتشار آلودگی اثر گذار هستند راندمان بویلر و میزان انتشار آلودگی تابعی از این دو متغیر در نظر گرفته شده است. متغیر اول تعداد مشعل و متغیر دوم فشار تزریق است.

جدول ۱-۱- متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (توابع هدف) مورد استفاده در این پژوهش

متغیر	
توابع هدف	راندمان بویلر
	میزان انتشار آلودگی
متغیرهای مستقل	تعداد مشعل
	فشار تزریق

مطابق شکل زیر متغیرهای مستقل و وابسته نشان داده شده اند



شکل ۱-۳- متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (توابع هدف) مورد استفاده در این پژوهش

## ۱۱-۱- سوالات تحقیق

مهمترین سوالات اساسی تحقیق به شرح زیر است.

- ۱- مقدار بهینه راندمان بویلر چه اندازه است و به ازای چه مقادیری از متغیرهای مستقل میتوان به این راندمان دست پیدا کرد؟
- ۲- مقدار بهینه انتشار آلودگی چه اندازه است و به ازای چه مقادیری از متغیرهای مستقل میتوان به این راندمان دست پیدا کرد؟
- ۳- اثر متغیر تعداد مشعل بر روی راندمان بویلر و میزان انتشار آلودگی چگونه است؟
- ۴- اثر متغیر فشار تزریق بر روی راندمان بویلر و میزان انتشار آلودگی چگونه است؟

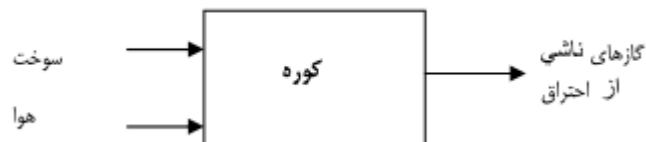
## ۱۲-۱- لغات و اصطلاحات تخصصی

مهمترین لغات و اصطلاحات تخصصی به شرح زیر است.

### ۱-۱۲-۱- احتراق

احتراق یک سوخت، تبدیل شیمیایی سوخت به محصولات احتراق همراه با آزاد سازی انرژی حرارتی ناشی از آن می باشد. اجزای محترقه یک سوخت گازی یا مایع، مثل کرین، هیدروژن، گوگرد و نیتروژن توسط واکنشهای شیمیایی گرمازا با اکسیژن هوای احتراق در می آمیزند، محصولات احتراق شامل گازهای دو کش و باقیمانده های جامد از احتراق سوخته های مایع و جامد می باشند. گازهای دودکش حاوی ترکیبات آلوده کننده زیان آور مثل اکسیدهای

گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، منو اکسید کربن دی اکسید کربن و بخار آب هستند. که البته بخار آب نیز از جمله گازهای آلوده کننده و زیان آور بشمار نمی رود. معادلات استوکیومتری تشریح ساده ای از واکنشهای احتراق کامل اجزای قابل احتراق سوخت با اکسیژن را به همراه موازنه مواد و واکنشها بر مبنای مولی یا جرمی ارائه می کنند. شکل زیر شمای کلی از فرایند احتراق را نشان می دهد.



شکل ۱-۴- شمای کلی فرایند احتراق

### ۱-۱۳- پیشینه تحقیق

مطالعه و ارزیابی نتایج به دست آمده از تجارب قبلی اجرای این طرح، از جمله "بهینه سازی ۱۰۰۰ دستگاه مشعل خانگی" در سال ۱۳۸۳ و یا "بهینه سازی مصرف سوخت در موتورخانه های ۵۰۰۰ ساختمان مسکونی در سال ۱۳۸۵ که مجری هر دو طرح مذکور شرکت بهینه سازی مصرف سوخت بود و با پروژه پژوهشی "تدوین دستور العمل مناسب تهیه شناسنامه فنی و معاینه موتورخانه ها و اجرای آن در ساختمان های تحت پوشش شرکت ملی گاز ایران و بررسی آثار آن در صرفه جویی مصرف انرژی" که در سال ۱۳۸۹ توسط شرکت ملی گاز ایران به اجراء آمده، آمار و ارقام قابل تأملی را نشان می دهد:

- ۱- با اجرای این طرح می توان سالانه تقریباً ۲۱ درصد در مصرف گاز صرفه جویی کرد
- ۲- محاسبات نشان داده که مقدار تولید و انتشار گاز مونوکسید کربن از فرایند احتراق در موتورخانه ها بیش از ۹۰ درصد تقلیل یافته است.

## **فصل دوم**

### **بویلرهای فایر تیوب**

## ۲-۱- مقدمه

بشر از قرن‌ها پیش به قدرت بخار پی برده بود ولی استفاده صنعتی از دیگهای بخار از سال ۱۷۱۲ میلادی توسط (ساوری و نیوکامن) با ساخت اولین دیگ بخار با پوشش سربی یا چوبی و با فشار کمی بالاتر از فشار اتمسفر آغاز گردید. در سال ۱۷۲۵ میلادی (هیستک بویلر) با صفحات فولاد پرچ شده و با فشار نسبی مورد استفاده قرار گرفت.

مطالعه و ارزیابی نتایج به دست آمده از تجارب قبلی اجرای این طرح، از جمله "بهینه سازی ۱۰۰۰ دستگاه مشعل خانگی" در سال ۱۳۸۳ و یا "بهینه سازی مصرف سوخت در موتورخانه های ۵۰۰۰ ساختمان مسکونی در سال ۱۳۸۵ که مجری هر دو طرح مذکور شرکت بهینه سازی مصرف سوخت بود و با پروژه پژوهشی "تدوین دستور العمل مناسب تهیه شناسنامه فنی و معاینه موتورخانه ها و اجرای آن در ساختمان های تحت پوشش شرکت ملی گاز ایران و بررسی آثار آن در صرفه جویی مصرف انرژی" که در سال ۱۳۸۹ توسط شرکت ملی گاز ایران به اجراء آمده، آمار و ارقام قابل تأملی را نشان می دهد:

۱. با اجرای این طرح می توان سالانه تقریباً ۲۱ درصد در مصرف گاز صرفه جویی کرد

۲. محاسبات نشان داده که مقدار تولید و انتشار گاز مونوکسید کربن از فرآیند احتراق

در موتورخانه ها بیش از ۹۰ درصد تقلیل یافته است.

در دوره حاضر، به دلیل مسایلی نظیر امنیت تأمین انرژی، افزایش جهانی قیمت حامل های انرژی و پیامدهای نامطلوب کاربرد سوخت های فسیلی بر محیط زیست که مقدار مصرفشان به حدی فراتر از توان پذیرش زمین رسیده، پدیده ها و پیامدهای مخربی از قبیل تراکم گازهای گلخانه ای و تحلیل لایه ازن ظهور یافته است.

برآیند این اتفاقات، مدیریت مصرف انرژی را به عنوان یک نیاز و رویکرد جدی در دستور کار کشورهای پیشرفته و در حال توسعه قرار داده است. در نتیجه، صاحبان صنایع، سازندگان ساختمان های اداری و تجاری و در نهایت مالکین و ساکنین ساختمان های مسکونی در تلاش هستند تا از طریق به کار بردن روش ها و تجهیزات نوین، میزان مصرف انرژی و در نتیجه، آلاینده های ناشی از احتراق را در فرآیندها و ساختمان ها کاهش دهند در کشور ما نیز، آمار و ارقام منتشره توسط مراجع رسمی و معتبر نظارتی، دربردارنده هشدارهای ضمنی جدی در حوزه مصرف انرژی و آلاینده‌گی است.



بررسی ها نشان داده که بخش خانگی، تجاری و عمومی کشور با مصرف بیش از ۴۰ درصد کل انرژی، اصلی ترین و عمده ترین مصرف کننده های انواع حامل های انرژی کشور به شمار می روند [۱].

تهدید اصلی در این جاست که بر طبق همین آمار و ارزیابی ها مصرف انرژی در کشور ما هر ده سال یک باره به میزان دو برابر افزایش می یابد که این، یک چالش و بحران جدی است بحران دیگر، آلودگی هوای ناشی از مصرف سوخت های فسیلی است. تحقیقات نشان داده که آلودگی هوا چهارمین عامل مرگ و میر انسان ها در دنیاست و در بروز این آلودگی و پیامدهای نامطلوب آن، استفاده از منابع سوخت فسیلی برای تأمین انرژی مورد نیاز فعالیت ها و کاربری های مختلف، نقش مهمی دارد. منابعی که با توجه به ماهیت شیمیایی شان، استفاده از آنها همراه با تولید گازها و ذراتی است که می تواند هوای محیط را در مقیاس محلی و حتی جهانی آلوده سازد.

اصلی ترین گاز آلاینده خروجی از دودکش، مونوکسید کربن است؛ گازی بی رنگ، بی بو، سمی و سرطان زا، این گاز به سادگی وارد جریان خون شده و با هموگلوبین واکنش نشان داده و با جذب اکسیژن آن، مرگ فرد را موجب می شود. حد مجاز این گاز در خروجی دودکش ها کمتر از ۱۰۰ ppm و حد منجر به مرگ آن ۷۰۰ ppm است، عامل اصلی در تولید این گاز، احتراق ناقص سوخت است.

ارزیابی های اولیه نشان می دهد که در وضعیت کنونی، شرایط عملکردی موتورخانه ها و بسیاری از بویلرهای صنعتی و نیروگاهی نامطلوب است. از جمله مهم ترین دلایل و عوامل این عدم مطلوبیت، موارد برشمرده ذیل قابل ذکر است.

۱- اختلاط ناقص سوخت و هوا که منجر به احتراق ناقص می شود. در این وضعیت، به دلیل آن که مشعل نمی تواند سوخت و هوا را به طور کامل مخلوط کند، باید هوای لازم برای احتراق را از طریق افزایش هوای اضافه تأمین نماید.

۲- عدم تنظیمات متناسب با فصول مختلف سال که کاهش شدید راندمان و افزایش مصرف سوخت را موجب می گردد.

۳- استفاده از تکنولوژی های قدیمی در طراحی موتورخانه ها و بویلرها که موارد مرتبط با صرفه جویی انرژی در آن ها دیده نشده است.

انقلاب صنعتی و رشد روز افزون صنایع مختلف موجب تولید و انتشار آلاینده های گازی و گازهای گلخانه ای به هوا گردیده است. اندازه گیری غلظت گازهای خروجی از دودکش و

محاسبه دبی گازخروجی از آن موجب تعیین میزان جرم آلاینده های خروجی در واحد زمان می شود. براساس قوانین استاندارد هوای پاک، بررسی میزان انتشار آلاینده های خروجی از صنایع یکی از راههای تشخیص و اندازه گیری کیفیت هوا محسوب می شود.

عصر حاضر، دوران وقوع چالشها و بحرانهای محیط زیستی است که از جمله میتوان به آلودگی هوا و اثرات نامطلوب آن بر انسانها، گیاهان، جانوران و حتی ساختمانها و سازه های مصنوع بشر اشاره کرد. به کار بردن سوختهای فسیلی با هدف تأمین انرژی مورد نیاز فعالیتهای و فضاهای گوناگون، از دلایل عمده بروز آلودگی هوا به شمار میرود.

کاهش میزان سوخت مصرفی بویلرها و سیستم های گرمایشی یکی از موثرترین روش های مدیریت انرژی و کاهش آلاینده های خطرناک است. بویلرهای مدرن با راندمان بالا مانع از هدر رفتن انرژی می شوند و از آن جا که مصرف انرژی کمتر به معنای تولید آلودگی کمتر است. این سیستم ها بخش قابل توجهی از آلودگی هوا را کاهش می دهند.

به طور کلی، نصب نیروگاه های حرارتی، مواد آلاینده مختلفی را به جو منتشر می کند که باعث افزایش اثر گازهای گلخانه ای و آسیب به محیط زیست می شود. آلاینده های اصلی منتشرشده از این تجهیزات به اتمسفر عبارتند از [۲]، مونوکسید کربن (CO)، هیدروکربن (HC)، اکسیدهای نیتروژن (NOx)، دی اکسید کربن (CO<sub>2</sub>) و دی اکسید گوگرد (SO<sub>2</sub>). به دلیل آلودگی بالای این گازها، آژانس های محیط زیست حداکثر میزان انتشار این آلاینده ها را محدود می کنند [۳].

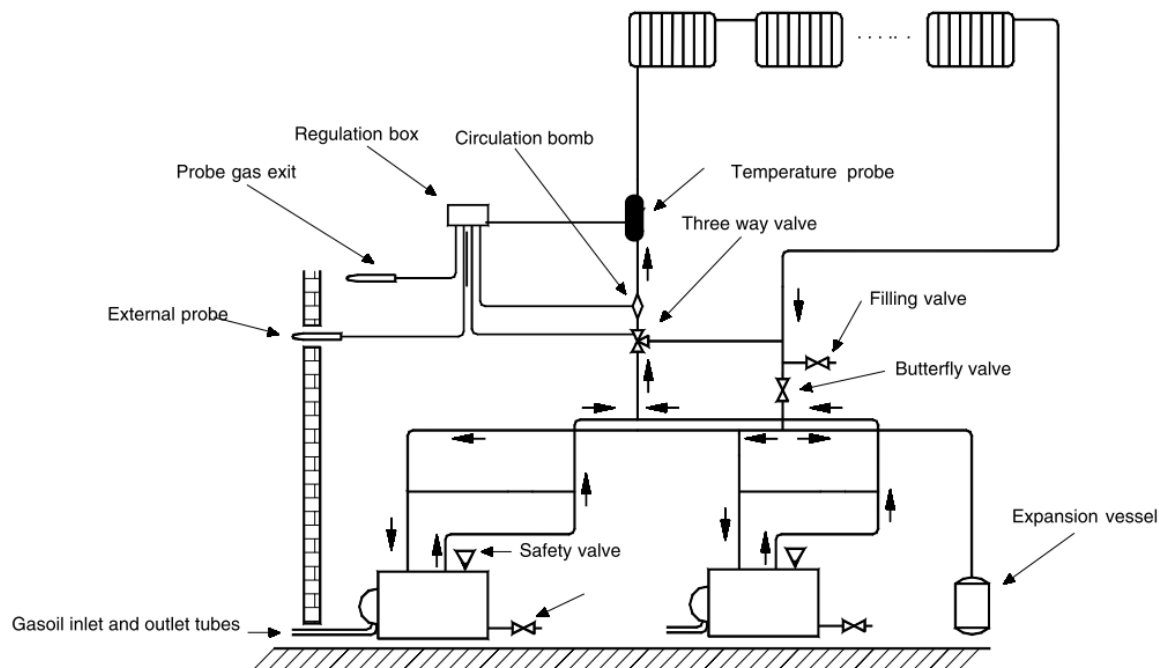
منشا انتشار آلاینده ها، گازهای حاصل از فرآیند احتراق است. سه المان اساسی را می توان در این فرآیند یافت: سوخت، احتراق و انرژی فعال سازی. نرخ انتشار این گازهای گلخانه ای با توجه به راندمان به دست آمده در فرایند متفاوت خواهد بود. با توجه به آلودگی زیاد ناشی از انتشار این گازهای آلاینده، قانون، حداکثر سطح انتشار در این تاسیسات را محدود کرده است. ۱

هدف از این کار مطالعه شرایط عملیاتی بهینه با هدف دستیابی به بالاترین سطح راندمان و کمترین مقدار انتشار آلاینده به محیط زیست می باشد [۴-۵]. عملیات دیگ های بخار با تغییر متغیرهای مجاز ( فشار تزریق و تعداد شعله ها، هر دو به طور مستقل نرخ جرمی جریان را اصلاح می کنند) آنالیز شد.

**فصل سوم**  
**روش و تنظیمات آزمایشگاهی**

### ۳-۱- مقدمه

نصب آزمایشگاهی از دو دیگ بخار لوله ای سه مرحله ای با توان حرارتی ۶۶۵ کیلووات (شکل ۳-۱) تشکیل شده است. این دیگ های بخار، دیگ های بخار مونوبلوک ساخته شده از فویل فولادی هستند که با استفاده از پشم شیشه به ضخامت ۷۰ میلی متر عایق بندی شده اند. این دیگ های بخار مجهز به یک صفحه کنترل متشکل از دو ترموستات هستند که تنظیم کننده زمان کار هر مشعل برای گازوئیل با حداکثر ویسکوزیته ۶ cSt در دمای ۲۰°C می باشند.



شکل ۳-۱- طرح نصب دیگ بخار نوع Fire Tube

- دو پیشخوان، که تعداد ساعات کار و دما و فشار را برای هر مشعل ثبت می کنند و یک ترموستات ایمنی برای مواقعی که دو مورد قبلی با فالت مواجه می شوند مورد استفاده قرار می گیرد. ویژگی های اصلی نصب مشعل (دو شعله پیشرو) عبارتند از:
- مناسب برای کار با محفظه احتراق تحت فشار و فشار منفی.
  - سیستم پاشش مکانیکی با فشار بالا.
  - سیستم تخلیه اتوماتیک گازهای محفظه احتراق قبل از روشنایی.
  - عملیات خروجی دو مرحله ای.
  - دارای یک صفحه کنترل که عملکرد مشعل را نمایش می دهد.
  - کنترل اتوماتیک هوا برای هر مرحله.

• کنترل هوا با استفاده از یک سیستم هیدرولیکی که اجازه می دهد تا مشعل ها با هوای آزاد در تماس باشند و نیز در مواقع روشن نبودن شعله ها، به منظور جلوگیری از ورود هوا به محفظه احتراق، دریچه تخلیه بسته شود.

• سیستم فوتوسل (چشم الکترونیکی) محافظت از شعله. شیر الکترومغناطیسی برای خاموش کردن فوری سوخت هنگامی که مشعل متوقف می شود.

دیگ های بخار به طور موازی از طریق یک مدار بسته که در آن آب در گردش است به هم متصل می شوند و فشار کاری از ۱,۵ تا  $2 \text{ kg cm}^{-2}$  تغییر می کند. یک شیر ایمنی که بر روی فشار  $3 \text{ kg cm}^{-2}$  تنظیم شده وجود دارد [۶-۷]. این دیگ های بخار دارای یک سیستم عملیاتی نیمه اتوماتیک هستند که قادر به تنظیم هوا برای هر یک از چندین سطح توان سیستم می باشد. این قابلیت تنظیم با استفاده از سیستم هیدرولیکی انجام می شود و اجازه مسدود شدن جریان هوا را در مرحله توقف می دهد و نیز یک پیش تخلیه از گازهای موجود در مجرا قبل از احتراق، انجام می دهد، بنابراین هر چه محفظه احتراق از اکسیژن غنی تر می شود راه اندازی دیگ بخار تسهیل می یابد.

محفظه احتراق در خلاء جزئی کار می کند. در نتیجه هر بار فرآیند احتراق اتفاق می افتد فشار اتمسفری خود کمک می کند که گازها از محفظه احتراق خارج شوند. مدار گاز از سه مرحله تشکیل شده است، دومرحله در محل آتش سوزی و یک مرحله دیگر در لوله های اگزوز یا خروجی.

این مدار حاوی یک دسته لوله است که در آن دودها با جریان آشفته گردش می کنند که باعث افزایش انتقال حرارت می شوند. محفظه پلنوم دارای یک خروجی افقی است که باعث تسهیل در پاکسازی غلاف لوله و محفظه احتراق می شود. به منظور برآورد راندمان نصب، ترکیب دود ( $\text{CO}_2$ ،  $\text{O}_2$  و  $\text{CO}$ )، همراه با درجه حرارت دود در خروجی (TH)، تلفات ناشی از آنتالپی محسوس (qA)، تلفات ناشی از گازهای سوخته نشده در دود خروجی (qi) و ثابت هوای اضافی ( $\lambda$ ) تعیین شدند. این داده ها با استفاده از یک دستگاه آنالایزر TESTO مدل ۳۰۰ M-I، که پروب آن در خروجی دود از دیگ بخار قرار گرفته بود به دست آمد.

هدف از مطالعه حاضر، بررسی شرایط عملیاتی بهینه دو دیگ بخار لوله ای سه مرحله ای که به طور موازی به هم متصل شده اند و برای گازوئیل مناسب می باشند است. داده ها با استفاده از یک دستگاه آنالایزر TESTO مدل M-I ۳۰۰ به طوری که پروب آن در خروجی دیگ بخار قرار گرفته است به دست آمده اند. متغیرهای عملیاتی در نظر گرفته شده، فشار

تزریق و تعداد مشعل ها هستند. انتشار آلاینده ها در محدوده مقادیر مقرر شده بدست می آیند. اثر افزایش قدرت اسمی دیگ بخار، تلفات ناشی از آنتالپی محسوس دود بررسی میشود. همچنین اثر فشار تزریق سوخت بر روی غلظت منوکسید کربن نیز بررسی می گردد.

### ۳-۲- روابط و شاخص ها

محفظه احتراق در خلاء جزئی کار می کند. در نتیجه هر بار فرآیند احتراق اتفاق می افتد فشار اتمسفری خود کمک می کند که گازها از محفظه احتراق خارج شوند. مدار گاز از سه مرحله تشکیل شده است، دومرحله در محل آتش سوزی و یک مرحله دیگر در لوله های آگزوز یا خروجی. این مدار حاوی یک دسته لوله است که در آن دودها با جریان آشفته گردش می کنند که باعث افزایش انتقال حرارت می شوند. محفظه پلنوم دارای یک خروجی افقی است که باعث تسهیل در پاکسازی غلاف لوله و محفظه احتراق می شود. به منظور برآورد راندمان نصب، ترکیب دود ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  و  $\text{CO}$ )، همراه با درجه حرارت دود در خروجی (TH)، تلفات ناشی از آنتالپی محسوس ( $q_A$ )، تلفات ناشی از گازهای سوخته نشده در دود خروجی ( $q_i$ ) و ثابت هوای اضافی ( $\lambda$ ) تعیین شدند. این داده ها با استفاده از یک دستگاه آنالایزر TESTO مدل M-I ۳۰۰، که پروب آن در خروجی دود از دیگ بخار قرار گرفته بود به دست آمد. در جدول زیر متغیرهای مورد استفاده در این پژوهش ارائه شده است.

جدول ۳-۱- جدول متغیرهای مورد استفاده در این پژوهش

نامگذاری	
A	مساحت مجرای خروج دود ( $m^2$ )
AT	دمای اتمسفری ( $^{\circ}C$ )
$A_{min}$	حداقل نرخ جریان هوا ( $m^3 h^{-1}$ )
$A_{real}$	نرخ واقعی جریان هوا ( $m^3 h^{-1}$ )
FT	دمای دود ( $^{\circ}C$ )
K	فاکتور ویژه سوخت (بدون بعد)
$P_{abs}$	فشار مطلق (mbar)
qA	تلفات حرارت محسوس در دودهای خروجی (%)
Qi	تلفات گازهای سوخته نشده در دودهای خروجی (%)
$V_{fume}$	نرخ حجمی جریان دود ( $m^3 h^{-1}$ )
$\bar{v}_{fumes}$	سرعت دود ( $m s^{-1}$ )
$\alpha$	فاکتور لوله پیتوت (بدون بعد)
$\Delta p$	فشار دیفرانسیلی (mbar)
$\eta$	راندمان دیگ بخار (%)
$\lambda$	ثابت هوای اضافی (بدون بعد)

محاسبات این پارامترهای مختلف با استفاده از معادلات زیر بدست می آید [۷].

(۱-۳)

$$CO_2(\%) = \frac{(CO_2)_{max}(21 - O_2)}{21}$$

$(CO_2)_{max}$  حداکثر نرخ ویژه ای است که می تواند آزاد شود، عدد ۲۱ درصد اکسیژن موجود در هوا و  $O_2$  مقدار اکسیژن اندازه گیری شده برای سلول می باشد.

راندمان فرایند احتراق براساس کاهش گرمای تخمینی سوخت صورت می گیرد.

(۲-۳)

$$\eta = 100 - qA - qi$$

از معادله Siegert برای محاسبه تلفات ناشی از گرمای محسوس دود استفاده می شود که با توجه به کاهش گرمای تخمینی، براساس درصد بیان می شود.

(۳-۳)

$$qA = K \frac{FT - AT}{CO_2}$$

ثابت هوای اضافی مطابق رابطه زیر، محاسبه می شود،

$$\lambda = \frac{(CO_2)_{\max}}{CO_2} = \frac{(O_2)_{\max}}{O_2} = \frac{A_{\text{real}}}{A_{\min}} \quad (3-4)$$

$(O_2)_{\max}$  حداکثر  $O_2$  رها شده در دود است،  $A_{\text{real}}$  نرخ جریان واقعی هوای ورودی به دیگ بخار و  $A_{\min}$  حداقل جریان هوای لازم برای سوختن سوخت می باشد.

سرعت دود از رابطه زیر به دست می آید [۸]:

$$\bar{v}_{\text{fumes}} = \sqrt{\frac{575\Delta P(FT + 273.15)}{P_{\text{abs}}}} \alpha \quad (3-5)$$

نرخ حجمی جریان دود از رابطه زیر به دست می آید [Error! Bookmark not

defined.]:

(3-6)

$$V_{\text{fume}} = \bar{v}_{\text{fumes}} 40.36$$

کدورت با جریان دادن نمونه ای از دود از میان یک فیلتر سفید با استفاده از بمب دستی (معمولاً ۱۰ ضربه) به دست آمده است. رنگ فیلتر تغییر می کند و با عملکرد غلظت باقیمانده ها، تیره تر می شود. کدورت از طریق مقایسه با مقیاس Bacharach، از ۰ تا ۹ به دست می آید [۳]. متغیرهای عملیاتی فشار تزریق و تعداد مشعل ها در نظر گرفته شد.

نرخ جرمی سوخت با فشار تزریق تغییر می کند. از طریق این متغیرها، تعداد ترکیبات امکان پذیر به منظور بهینه سازی فرآیند احتراق به عنوان تابعی از فشار و تعداد مشعل ها انجام شد.



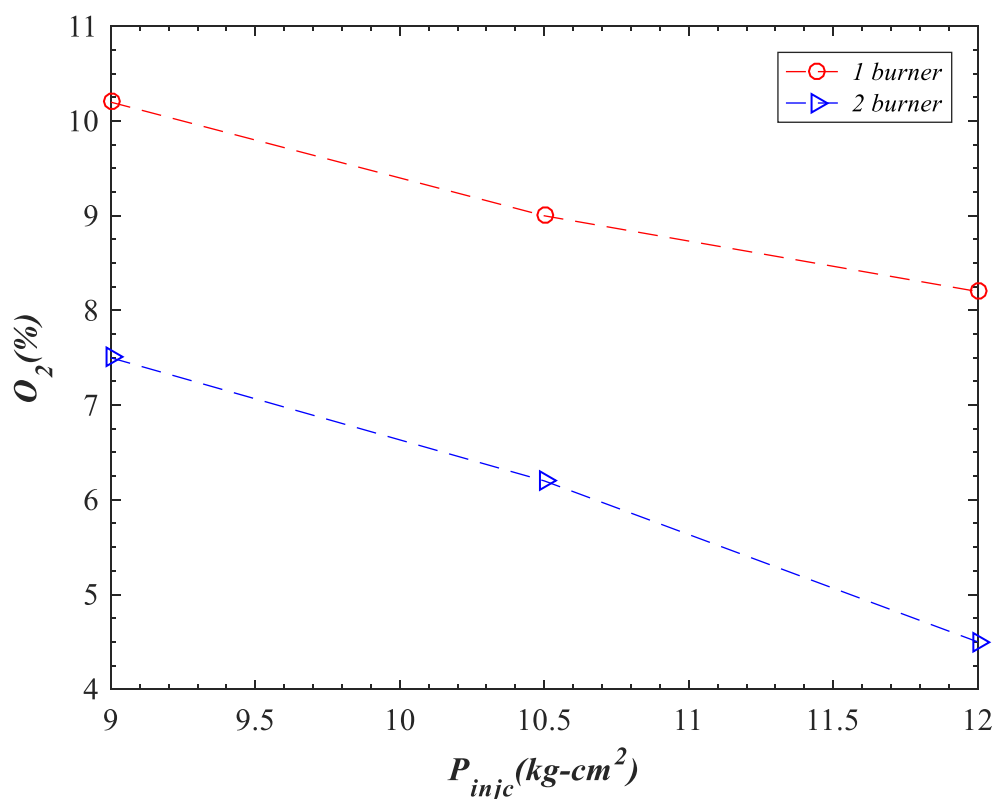
## **فصل چهارم**

### **تجزیه و تحلیل نتایج**

## ۴-۱- نتایج

حداکثر راندمان دیگ بخار برای یک مشعل در فشار  $9 \text{ kg cm}^{-2}$ ، ۹۵ درصد به دست آمده است. در مورد دو مشعل، بالاترین راندمان در فشار  $12 \text{ kg cm}^{-2}$  برابر با مقدار ۹۳ درصد به دست آمده است.

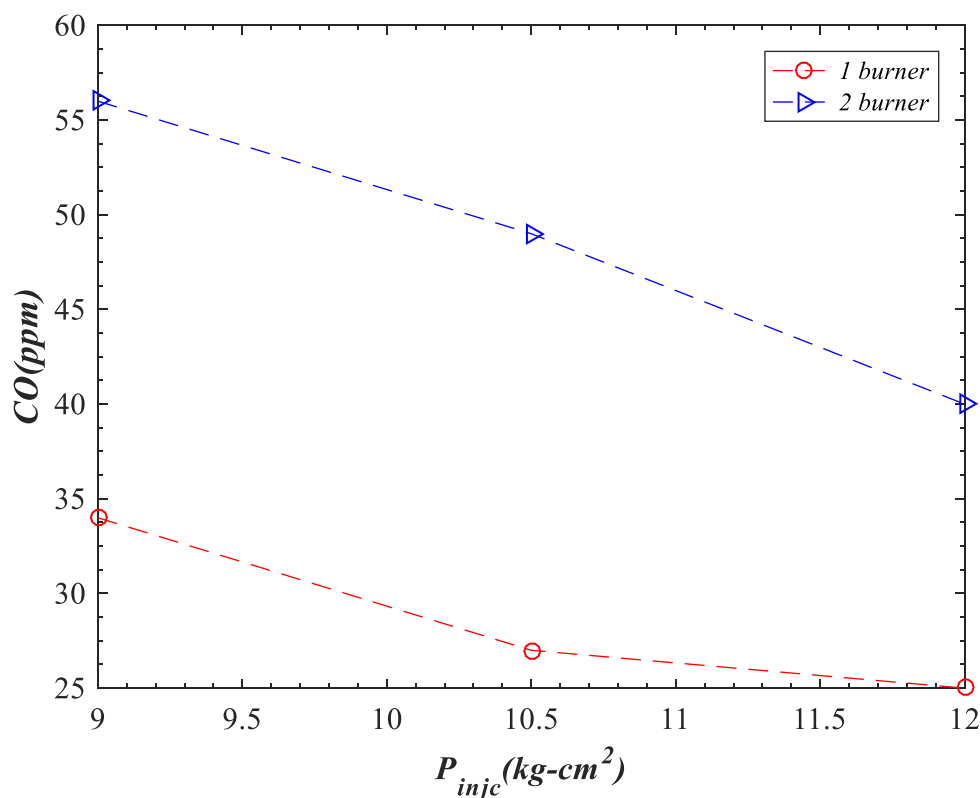
فشار تزریق در مقابل درصد تغییر  $\text{O}_2$  برای دودهای موجود در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد که با افزایش فشار، نرخ جرمی جریان افزایش و در نتیجه درصد اکسیژن کاهش می یابد که به دلیل مصرف بیشتر مواد قابل احتراق در دیگ بخار می باشد. در کارهای گذشته [۹]، مشاهده شد که با افزایش نرخ جرمی جریان، درصد اکسیژن افت می کند، این نتایج مشابه نتایج به دست آمده در کار حاضر است.



شکل ۴-۱- محتوای اکسیژن در مقابل فشار تزریق

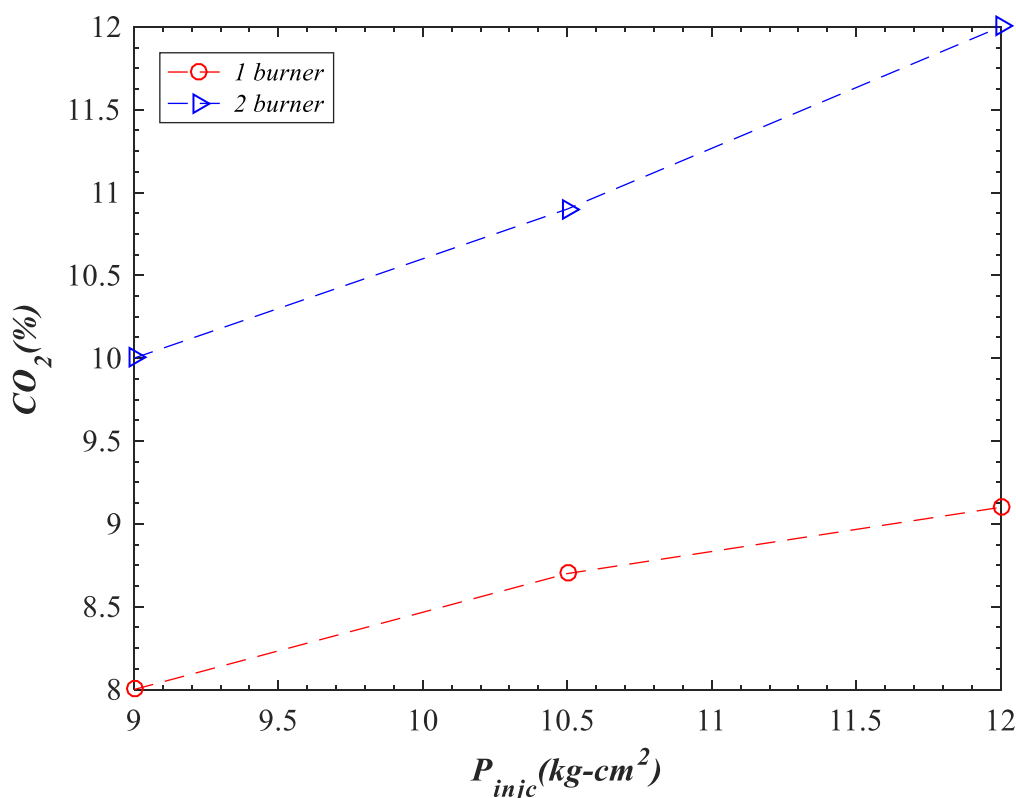
تغییر غلظت CO برحسب ppm در دود در مقابل فشار تزریق در شکل (۴-۲) نشان داده شده است. در دیگ بخار با یک شعله، تلفات مربوط به گازهای سوخته نشده با افزایش فشار تزریق کاهش می یابد. در مورد دو مشعل نیز همین اتفاق می افتد. این کاهش گازهای

سوخته نشده ناشی از این واقعیت است که با افزایش فشار تزریق و بنابراین افزایش جریان سوخت، دما در محل آتش سوزی افزایش می یابد و باعث کاهش گازهای سوخته نشده در دود می شود.



شکل ۴-۲- غلظت CO برحسب ppm در مقابل فشار تزریق

تغییر  $CO_2$  با توجه به فشار تزریق در شکل ۴ نشان داده شده است. افزایش فشار و در نتیجه افزایش نرخ جرمی جریان باعث افزایش  $CO_2$  می شود که باعث افزایش دمای آتش می شود. متعاقباً احتراق کامل بیشتری رخ می دهد و مقدار CO و  $CO_2$  موجود در دود به ترتیب کاهش و افزایش می یابد. نویسندگان دیگر [۹] اشاره کردند که با افزایش نرخ جرمی جریان، سطح  $CO_2$  افزایش می یابد و سطح  $CO_2$  مشاهده شده از مقدار به دست آمده آن، کمتر است.



شکل ۴-۳- محتوای  $CO_2$  در مقابل فشار تزریق

## ۴-۲- ارائه چند جمله ای برهم کنش خطی

در این بخش یک تقریب مناسب برای یافتن رابطه‌ی بین متغیر وابسته و مجموعه متغیرهای مستقل، زده می‌شود، که بصورت تک پاسخی بوده و متغیر وابسته با استفاده از چند جمله ای برهم کنش خطی به متغیرهای مستقل مربوط می‌شود. از این مدل برای پیش‌بینی محتوای  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$  استفاده می‌گردد

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j \quad (4-1)$$

در اینجا  $Y$  پاسخ پیش‌بینی شده،  $b_0$  عبارت ثابت،  $b_i$  اثر خطی،  $b_{ij}$  اثر برهم کنشی و  $x_i$  و  $x_j$  نشان‌دهنده‌ی متغیرهای مستقل است. در این مطالعه، یک معادله‌ی چندجمله‌ای برهم کنش خطی با استفاده از متغیرهای مستقل بدست آمد که بصورت زیر هست:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 \quad (4-2)$$

## ۴-۳- نتایج مدل بر هم کنش خطی برای محتوای اکسیژن

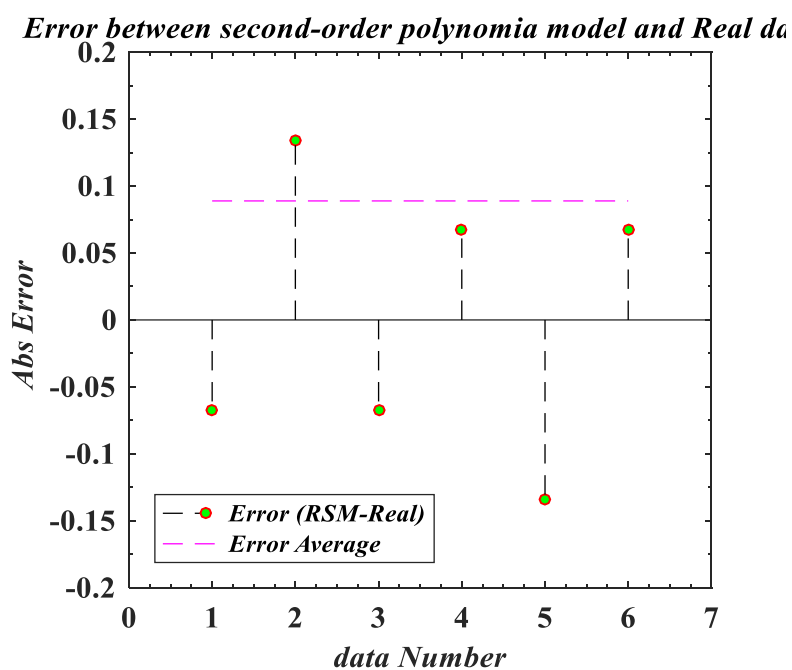
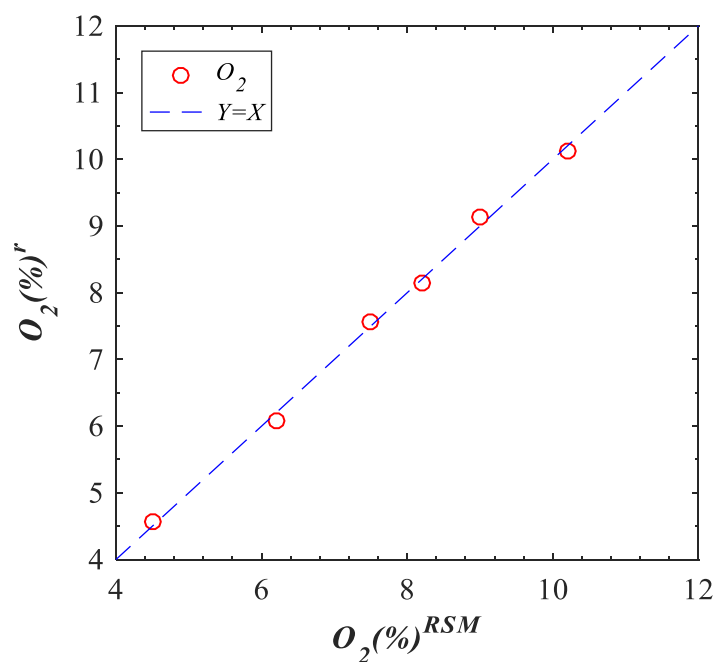
تکنیک آنالیز رگرسیونی چندگانه برای ارزیابی ضرایب مدل چند جمله‌ای بر هم‌کنش خطی استفاده شد. ضرایب  $b$  معادله  $(4-8)$  از تولباکس نرم افزار متلب استخراج شد که به شرح جدول زیر است.

جدول ۴-۱- ضرایب معادله رگرسیونی چند جمله‌ای بر هم کنش خطی مربوط به محتوای اکسیژن

توضیح	مقادیر ضرایب
مقدار ثابت معادله	$b_0 = 15.7$
ضرایب خطی معادله	$b_1 = -0.333333$ $b_2 = 0.4333333$
ضرایب اثر متقابل	$b_{12} = -0.333333$

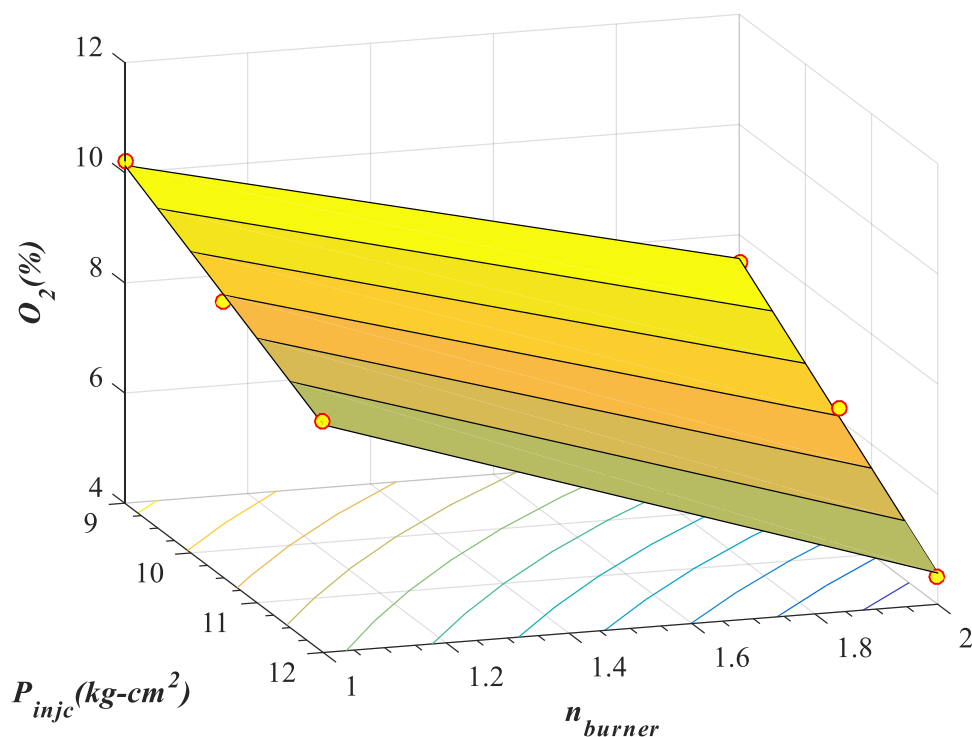
نمودار داده‌های پیش‌بینی به کمک مدل بر حسب داده واقعی در شکل (۴-۵) الف) رسم شده است. محور افقی داده واقعی محتوای اکسیژن و محور عمودی پیش‌بینی مدل (مدل برهم‌کنش خطی) است. در بهترین حالت زمانی که مدل ۱۰۰٪ به درستی پیش‌بینی کند داده‌های نمودار می‌بایست بر روی خط  $Y=X$  (نیمساز ربع اول) قرار گیرند. در عمل بدلیل وجود خطا در مدل، داده‌ها نسبت به خط  $Y=X$  پراکنده می‌شوند.

مطابق نتایج بدست آمده در شکل (۴-۵) ب)، دقت پیش‌بینی محتوای اکسیژن، به کمک مدل برهم‌کنش خطی، مطلوب بوده (میزان حداکثر خطا کمتر از ۱,۵٪ است) و تطابق خوبی بین نتایج این مدل و داده واقعی وجود دارد. نمودار خطای مطلق محتوای اکسیژن، برای ۶ داده رسم گردید همانطور که مشاهده می‌کنید میزان خطای مطلق، عموماً در محدوده  $\pm 0,15$  است. و میزان متوسط قدر مطلق خطا مطابق شکل (۴-۵) ب) کمتر از ۰,۱ بدست آمد (کمتر از ۱٪).



شکل ۴-۴- نتایج مدل برهم کنش خطی جهت پیش بینی محتوی اکسیژن به همراه خطای مدل

نمودار رویه محتوای اکسیژن بر حسب تعداد مشعل و فشار تزریق به کمک مدل بر همکنش خطی در شکل (۴-۵) رسم شد. مطابق این شکل با افزایش تعداد مشعل و با افزایش فشار تزریق محتوای اکسیژن کاهش می یابد. میزان اثر فشار تزریق بر محتوای اکسیژن زمانیکه که تعداد مشعل به جای ۱ عدد، ۲ عدد است بیشتر می باشد.



شکل ۴-۵- رویه سطح مربوط به میزان محتوی اکسیژن بر حسب تعداد مشعل و فشار تزریق

## ۴-۴- نتایج مدل بر هم کنش خطی برای غلظت منواکسید

تکنیک آنالیز رگرسیونی چندگانه برای ارزیابی ضرایب مدل چند جمله‌ای بر همکنش خطی استفاده شد. ضرایب  $b$  معادله (۴-۸) از تولباکس نرم افزار متلب استخراج شد که به شرح جدول زیر است.

جدول ۴-۲- ضرایب معادله رگرسیونی چند جمله‌ای بر هم کنش خطی مربوط به غلظت CO

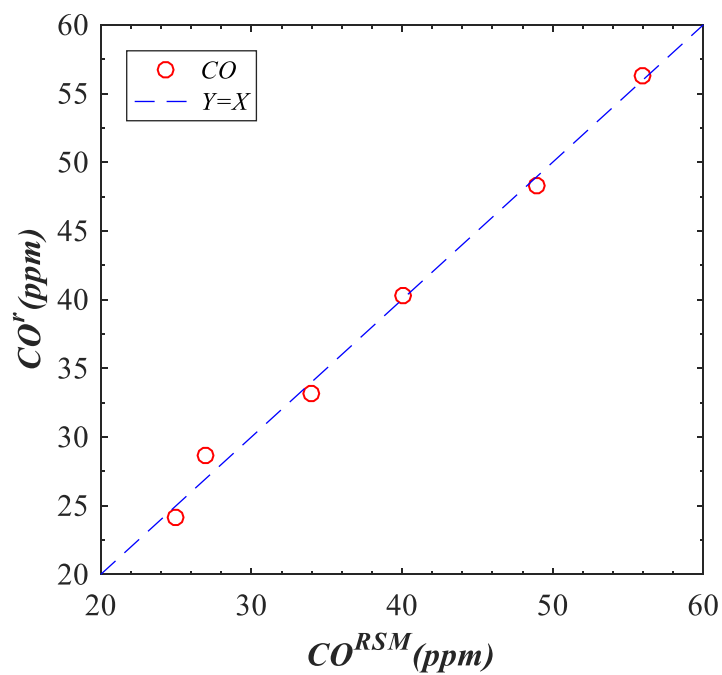
مقادیر ضرایب	توضیح
$b_0 = 15.999999$	مقدار ثابت معادله
$b_1 = -0.66666$ $b_2 = 44.1666$	ضرایب خطی معادله
$b_{12} = -2.3333$	ضرایب اثر متقابل

نمودار داده‌های پیش‌بینی به کمک مدل بر حسب داده واقعی در شکل (۴-۵) الف) رسم شده است. محور افقی داده واقعی غلظت منواکسید کربن و محور عمودی پیش‌بینی مدل (مدل برهمکنش خطی) است. در بهترین حالت زمانی که مدل ۱۰۰٪ به درستی پیش‌بینی کند داده‌های نمودار می‌بایست بر روی خط  $Y=X$  (نیمساز ربع اول) قرار گیرند. در عمل بدلیل وجود خطا در مدل، داده‌ها نسبت به خط  $Y=X$  پراکنده میشوند.

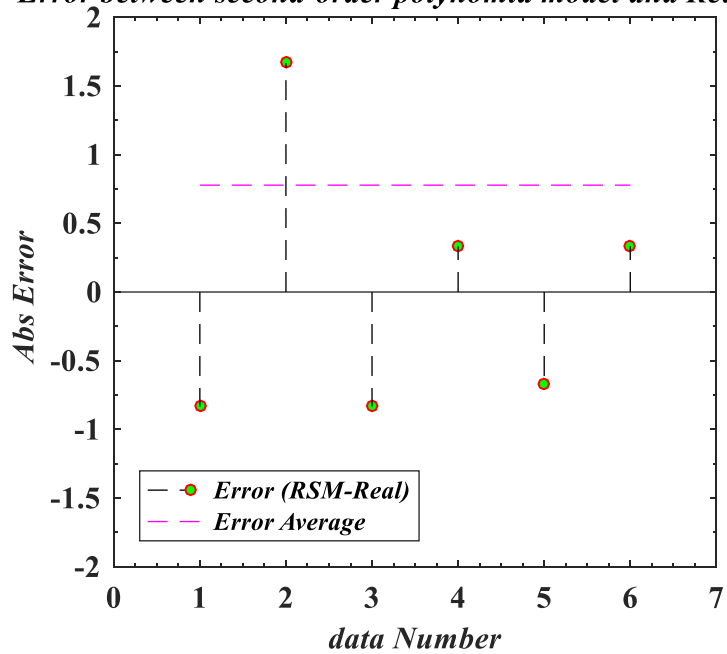
مطابق نتایج بدست آمده در شکل (۶-۴) ب)، دقت پیش بینی غلظت منو اکسید کربن، به کمک مدل برهم کنش خطی، مطلوب بوده (میزان حداکثر خطا کمتر از ۲ ppm است) و تطابق خوبی بین نتایج این مدل و داده واقعی وجود دارد. نمودار خطای مطلق محتوای اکسیژن، برای ۶ داده رسم گردید همانطور که مشاهده می کنید میزان خطای مطلق، عموماً در محدوده ی  $\pm 2$  ppm است. و میزان متوسط قدر مطلق خطا مطابق شکل (۶-۴) ب) کمتر از ۱ ppm بدست آمد.

مطابق نتایج بدست آمده در شکل (۶-۴) ب)، دقت پیش بینی غلظت منو اکسید کربن، به کمک مدل برهم کنش خطی، مطلوب بوده (میزان حداکثر خطا کمتر از ۲ ppm است) و تطابق خوبی بین نتایج این مدل و داده واقعی وجود دارد. نمودار خطای مطلق محتوای اکسیژن، برای ۶ داده رسم گردید همانطور که مشاهده می کنید میزان خطای مطلق، عموماً در محدوده ی  $\pm 2$  ppm است. و میزان متوسط قدر مطلق خطا مطابق شکل (۶-۴) ب) کمتر از ۱ ppm بدست آمد.



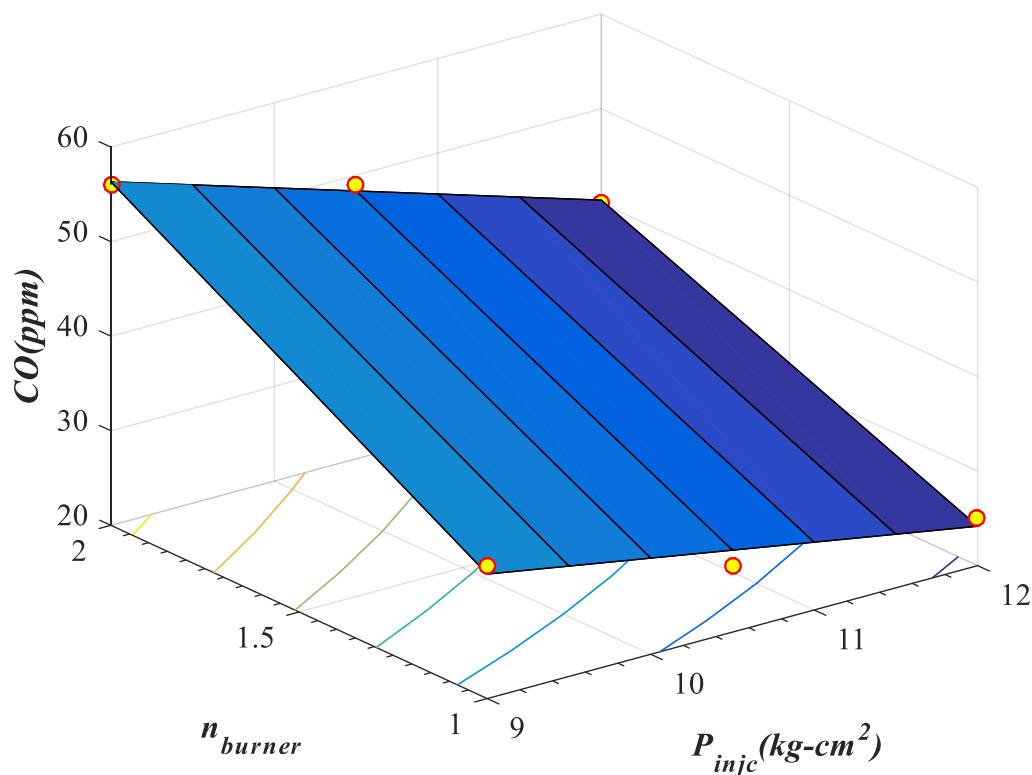


*Error between second-order polynomia model and Real data*



شکل ۴-۶- نتایج مدل برهم کنش خطی جهت پیش بینی غلظت CO به همراه خطای مدل

نمودار رویه غلظت منو اکسید کربن بر حسب تعداد مشعل و فشار تزریق به کمک مدل بر همکنش خطی در شکل (۷-۴) رسم شد. مطابق این شکل با افزایش تعداد مشعل و با افزایش فشار تزریق غلظت منو اکسید کربن کاهش می یابد. میزان اثر فشار تزریق بر غلظت منو اکسید کربن زمانیکه که تعداد مشعل به جای ۱ عدد، ۲ عدد است بیشتر می باشد.



شکل ۷-۴- رویه سطح مربوط به میزان غلظت CO بر حسب تعداد مشعل و فشار تزریق

## ۴-۵- نتایج مدل بر هم کنش خطی برای محتوای دی اکسید کربن

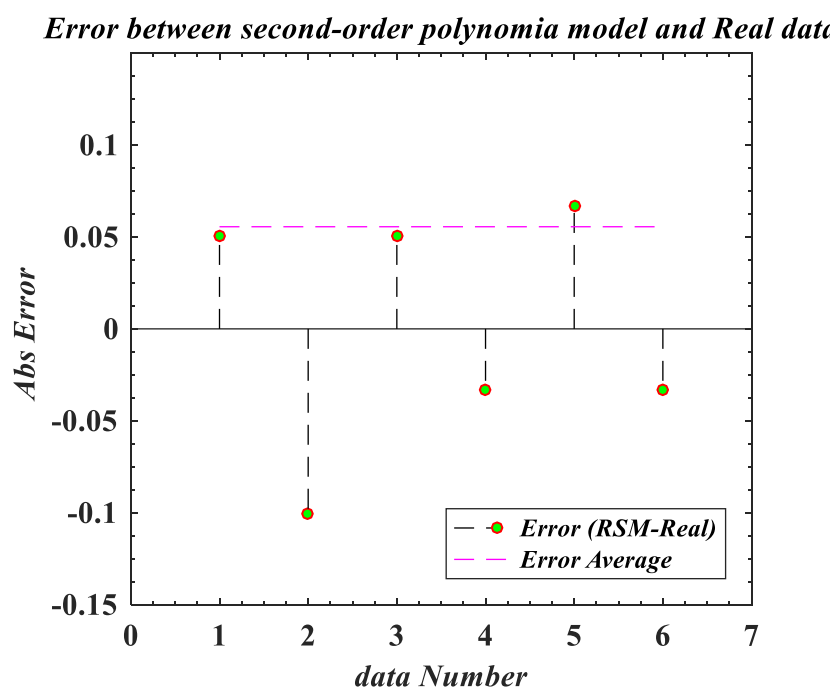
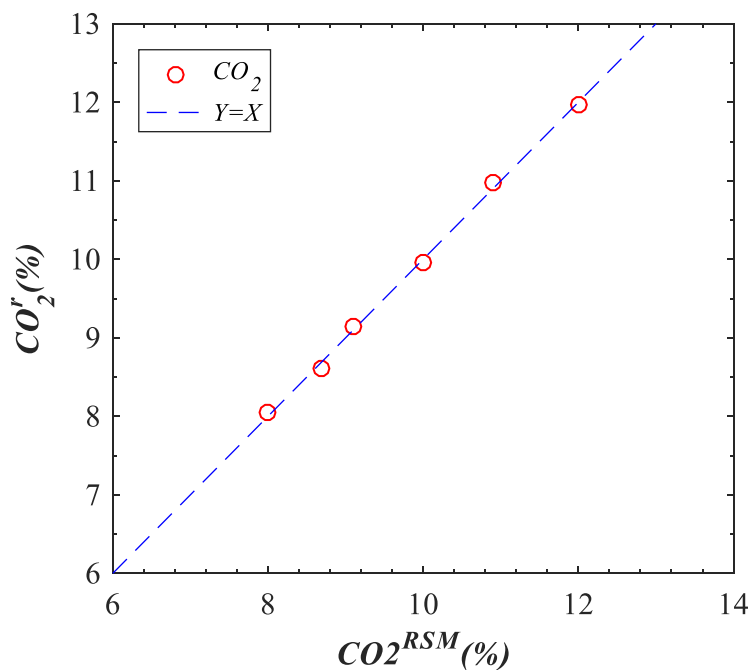
تکنیک آنالیز رگرسیونی چندگانه برای ارزیابی ضرایب مدل چند جمله‌ای بر هم‌کنش خطی استفاده شد. ضرایب  $b$  معادله (۴-۸) از تولباکس نرم افزار متلب استخراج شد که به شرح جدول زیر است.

جدول ۴-۳- ضرایب معادله رگرسیونی چند جمله‌ای بر هم کنش خطی مربوط به محتوای دی اکسید کربن

مقادیر ضرایب	توضیح
$b_0 = 5.53$	مقدار ثابت معادله
$b_1 = 0.0666666$ $b_2 = -0.7833333$	ضرایب خطی معادله
$b_{12} = -0.333333$	ضرایب اثر متقابل

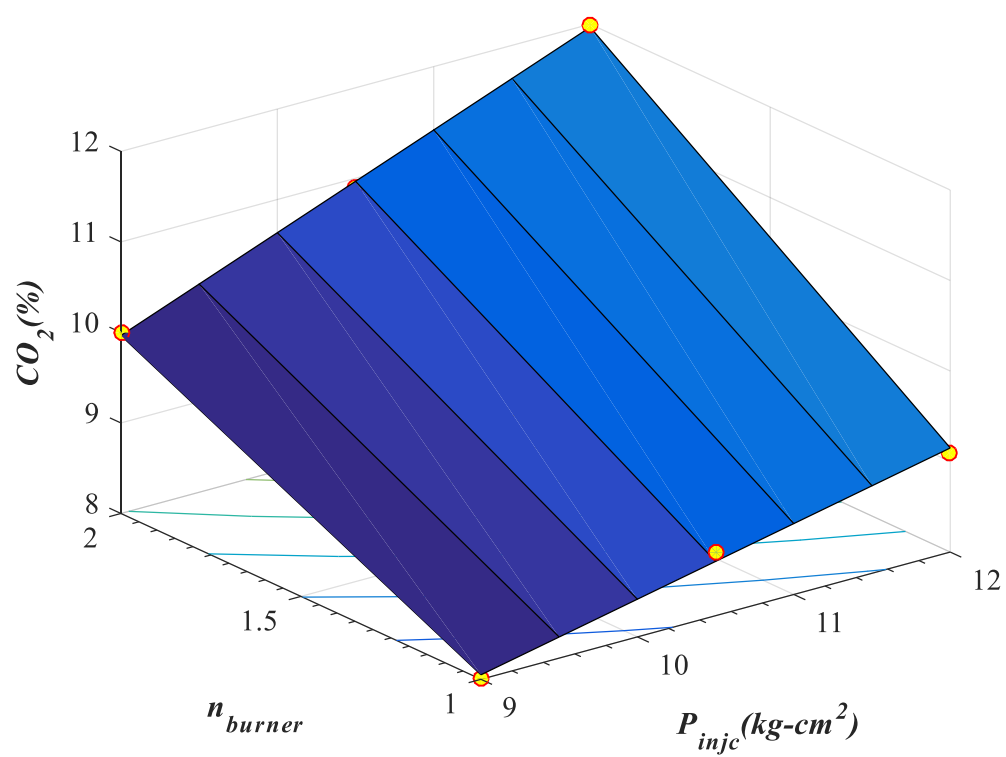
نمودار داده‌های پیش‌بینی به کمک مدل بر حسب داده واقعی در شکل (۴-۸) الف) رسم شده است. محور افقی داده واقعی محتوای اکسیژن و محور عمودی پیش‌بینی مدل (مدل برهم‌کنش خطی) است. در بهترین حالت زمانی که مدل ۱۰۰٪ به درستی پیش‌بینی کند داده‌های نمودار می‌بایست بر روی خط  $Y=X$  (نیمساز ربع اول) قرار گیرند. در عمل بدلیل وجود خطا در مدل، داده‌ها نسبت به خط  $Y=X$  پراکنده می‌شوند.

مطابق نتایج بدست آمده در شکل (۴-۸) ب)، دقت پیش‌بینی محتوای دی اکسید کربن، به کمک مدل برهم‌کنش خطی، مطلوب بوده (میزان حداکثر خطا کمتر از ۰٫۱٪ است) و تطابق خوبی بین نتایج این مدل و داده واقعی وجود دارد. نمودار خطای مطلق محتوای اکسیژن، برای ۶ داده رسم گردید همانطور که مشاهده می‌کنید میزان خطای مطلق، عموماً در محدوده  $\pm 0.1$  است. و میزان متوسط قدر مطلق خطا مطابق شکل (۴-۸) ب) در حدود ۰٫۰۵٪ بدست آمد.



شکل ۴-۸- نتایج مدل برهم کنش خطی جهت پیش بینی محتوی  $CO_2$  به همراه خطای مدل

نمودار رویه غلظت منو اکسید کربن بر حسب تعداد مشعل و فشار تزریق به کمک مدل برهمکنش خطی در شکل ۴-۹ رسم شد. مطابق این شکل با افزایش تعداد مشعل و با افزایش فشار تزریق غلظت منو اکسید کربن کاهش می یابد. میزان اثر فشار تزریق بر غلظت منو اکسید کربن زمانیکه که تعداد مشعل به جای ۱ عدد، ۲ عدد است بیشتر می باشد.



شکل ۴-۹- رویه سطح مربوط به میزان محتوای  $CO_2$  بر حسب تعداد مشعل و فشار تزریق

**فصل پنجم**  
**جمع بندی ارائه پیشنهادات**

## ۵-۱- مقدمه

در این مطالعه ارزیابی شرایط عملیاتی بهینه برای دو دیگ بخار لوله ای سه مرحله ای که به شکل موازی به هم متصل شده اند و از گازوئیل استفاده شده، توسعه داده شده است. متغیرهای عملیاتی در نظر گرفته شده، فشار تزریق و تعداد مشعل ها بودند.

## ۵-۲- جمع بندی

- نتیجه آزمایشات نشان داد که با افزایش نرخ انتشار کربن دی اکسید و توان اسمی دیگ بخار، تلفات ناشی از آنتالپی محسوس افزایش یافت.
- هنگامی که فشار تزریق زیاد می شود غلظت کربن مونوکسید کاهش می یابد. این ترید آف حداکثر راندمان را در محدوده دیگ بخار تعیین می کند. با توجه نتایج، افزایش تلفات ناشی از گرمای محسوس در دودهای خروجی اثر بیشتری روی راندمان دیگ بخار نسبت به کاهش تلفات برای گازهای سوخته نشده در دودهای خروجی دارد.
- حداکثر راندمان دیگ بخار برای یک مشعل در فشار  $9 \text{ kg cm}^{-2}$  برابر با ۹۵ درصد به دست آمده است.
- در مورد دو مشعل، بالاترین راندمان در فشار  $12 \text{ kg cm}^{-2}$  برابر با مقدار ۹۳ درصد به دست آمده است
- با افزایش فشار، نرخ جرمی جریان افزایش و در نتیجه درصد اکسیژن کاهش می یابد که به دلیل مصرف بیشتر مواد قابل احتراق در دیگ بخار می باشد.
- در دیگ بخار با یک شعله، تلفات مربوط به گازهای سوخته نشده با افزایش فشار تزریق کاهش می یابد.
- در مورد دو مشعل نیز همین اتفاق می افتد. این کاهش گازهای سوخته نشده ناشی از این واقعیت است که با افزایش فشار تزریق و بنابراین افزایش جریان سوخت، دما در محل آتش سوزی افزایش می یابد و باعث کاهش گازهای سوخته نشده در دود می شود.
- افزایش فشار و در نتیجه افزایش نرخ جرمی جریان باعث افزایش  $\text{CO}_2$  می شود که باعث افزایش دمای آتش می شود. متعاقبا احتراق کامل بیشتری رخ می دهد و مقدار  $\text{CO}$  و  $\text{CO}_2$  موجود در دود به ترتیب کاهش و افزایش می یابد.

- دقت پیش بینی محتوای اکسیژن، به کمک مدل برهم کنش خطی، مطلوب بوده (میزان حداکثر خطا کمتر از ۱,۵٪ است) و میزان متوسط قدر مطلق خطا کمتر از ۱٪ بدست آمد
- مطابق نتایج بدست آمده پیش بینی محتوای دی اکسید کربن، به کمک مدل برهم کنش خطی، مطلوب بوده (میزان حداکثر خطا کمتر از ۱٪ است) و تطابق خوبی بین نتایج این مدل و داده واقعی وجود دارد.. و میزان متوسط قدر مطلق خطا در حدود ۰,۰۵٪ بدست آمد.

### ۵-۳- پیشنهادات برای آینده

- پیشنهادات زیر جهت بهبود کمی و کیفی محتوای این پژوهش ارائه میگردد.
- ۱- بررسی فنی اقتصادی راندمان هزینه استفاده از تکنولوژی TFT (triple-finned tubes) در ساخت بویلرهای بخار
  - ۲- بهینه سازی دو هدفه راندمان هزینه یک بویلر فایر تیوب به کمک الگوریتم ازدحام ذرات
  - ۳- بررسی اثر هوای اضافه بر روی راندمان بویلر و میزان انتشار گازهای آلاینده
  - ۴- بهینه سازی راندمان قانون دوم ترمودینامیک بر اساس طرح مینیم تولید آنتروپی
  - ۵- بررسی آرایش بهینه ی دسته لوله های بویلر فایر تیوب به کمک نرم افزار فلوئنت
  - ۶- اضافه کردن بخش سوپرهیتر به بویلر فایر تیوب و بهینه کردن جانمایی دسته لوله ها
  - ۷- بررسی اثر ترکیب درصد اجزای سوخت گازی بر روی راندمان و میزان انتشار آلودگی



## مراجع

۲ M. Llorens, A. Fontanals, C. Ruiz, Calefacció'n, Ed. CEAC, Barcelona, 1994.

۳ J.F. Gonza'lez, J. Gan'a'n, C.M. Gonza'lez Garcí'a, E. Sabio, A. Ramiro, J. Gonza'lez, M. Go'mez, Optimizació'n de la combustio'n de residuos agroindustriales, III Jornadas Nacionales de Ingenierí'a Termodiná'mica, UPV, Spain, 2003

۴ ROCA, Quemador de gaso'leo Tecno 50-L, Operating Instructions, 2002.

۵ M. Torres Go'mez, Estudio de la optimizació'n de la combustio'n de residuos del almendro, Proyecto Fin de Carrera, Escuela de Ingenierí'as Industriales de Badajoz, Spain, 2002.

۶ Equipos a presio'n, Real Decreto 769/1999, Madrid, 1999.

۷ A. Al-Kassir, Insltalaciones a presio'n, I Master universitario te'cnico superior en prevencio'n de riesgos laborales, Albacete, Spain, 2004.

۸ TESTO 300 M-I—Operating Instructions, 2002.

۹ J.F. Gonza'lez, C.M. Gonza'lez Garcí'a, A. Ramiro, J. Gonza'lez, E. Sabio, J. Gan'an, A. Rodri'guez Miguel, Combustion optimization of biomass residues pellets for domestic heating, Biomass & Bioenergy 27 (2003) 145–154.

## **Abstract**

The purpose of this study is to investigate the optimal conditions in terms of efficiency and emission of pollutants on two three-stage Firetube boilers that are considered parallel to each other. The data were generally obtained using the TESTO 300 M-I Analyzer Handpiece, whose probe is located in the boiler section. The variables are considered capabilities, injection pressure and number of starts. In the end, Yark Murdhal

Accurate mathematics to predict the efficiency and amount of pollutants concluded that the experiment showed that by increasing the amount of carbon dioxide emissions and the nominal power of the boiler read

The enthalpy effect increased significantly. I reduced the concentration of carbon monoxide under extreme pressure. This balance determines the efficiency effect in the boiler range. To increase recitation, increase recitation, increase noticeable heat in the smoke and increase the efficiency of the boiler.

This tends to reduce the recitation of unburned gases in the smoke. The efficiency of the boiler for a branch with a pressure of 2 kg / cm<sup>2</sup> is equivalent to 95% of the slaughtered sheep. The amount of mass has increased and the percentage of oxygen has decreased, so if you consume it sincerely, most of the frame material will heat up in the boiler. The same is true of the two branches. This hatred of gases has been reported because with increasing injection pressure and a sharp increase in whistle, the temperature in the combustion chamber increases and the exhaust gases in the smoke decrease. Increasing the pressure and thus increasing the mass of CO<sub>2</sub> increases the flow, which increases the temperature of the student's fire. As a result, more coma occurs.

**Keywords:** Fire Tube Boiler - Thermal Efficiency - Pollution Emission - Optimization



**Energy Institute of Higher Education**

# **Optimization of Thermal Efficiency and Pollution Emission Rate of a Fire Boiler by Changing Operating Conditions**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Degree of Master of Science (Doctor of Philosophy) in Energy Conversion**

**By:**

**Abdolsamad Khatami**

**Supervisor:**

**Dr. Mojataba Mirzaee**

**Dr. Heydar Madah**

**Nov 2019**