

# آزمایشهای فیزیک

دکتر محمود قرآن نویس / پرویز امین پور







کتاب آزمایشهای فیزیک مجموعهٔ جامعی شامل ۷۵ آزمایش فیزیک است که با توجه به برنامه‌های آزمایشگاههای فیزیک پایهٔ ۱، ۲ و ۳ و منطبق با برنامهٔ آزمایشگاههای فیزیک عمومی رشتهٔ فیزیک دانشگاهها و نیز آزمایشگاه فیزیک سایر رشته‌های دانشکده‌های علوم، مهندسی و کشاورزی تنظیم شده است.

همچنین آزمایشهای اپتیک رشتهٔ فیزیک نیز در کتاب آمده است. مربیان محترم آزمایشگاهها می‌توانند با توجه به شرایط و امکانات آزمایشگاهی خود تعدادی از آزمایشها را که مناسبتر می‌دانند انتخاب کنند. بسیاری از آزمایشهای ساده‌تر کتاب می‌تواند برای دانش‌آموزان دبیرستانها مفید باشد و نیز در کلاسهای کارآموزی و بازآموزی ضمن خدمت دبیران مورد استفاده قرار گیرد.



انتشارات فاطمی

[www.fatemi.ir](http://www.fatemi.ir)

# آزمایشهای فیزیک

تالیف دکتر محمود قرآن نویس / پرویز امین پور

## آزمایشهای فیزیک

مؤلفان: محمود قرآن‌نویس، پرویز امین‌پور

ویراستار: ناصر مقبلی

ناشر: مؤسسه فرهنگی فاطمی

چاپ ششم، ۱۳۸۷

شابک ۹۶۴-۳۱۸-۰۴۳-۳

ISBN 964-318-043-3

تیراژ: ۳۰۰۰ نسخه

قیمت: ۴۵۰۰ تومان

آماده‌سازی پیش از چاپ: واحد تولید مؤسسه فرهنگی فاطمی  
طرح جلد: فاطمه حسینی‌شکیب، آتلیه مؤسسه فرهنگی فاطمی  
رسامی: حمیدرضا شعبانی

چاپ و صحافی: چاپخانه زلال

کلیه حقوق برای مؤسسه فرهنگی فاطمی محفوظ است.

مؤسسه فرهنگی فاطمی تهران، کدپستی ۱۴۱۴۶ - خیابان دکتر فاطمی، شماره ۱۵۹

تلفن: ۸۸۹۶۱۴۲۲ - ۸۸۹۶۴۷۷۰ نمایر: ۸۸۹۵۶۲۵۸

info@fatemi.ir



قرآن‌نویس، محمود، ۱۳۲۸ -

آزمایشهای فیزیک / تألیف محمود قرآن‌نویس، پرویز امین‌پور. - تهران: فاطمی، ۱۳۷۲.  
ده، ۲۹۳ ص.: مصور، جدول، نمودار.

ISBN 964-318-043-3

فهرست‌نویسی براساس اطلاعات فیبا.

چاپ ششم: ۱۳۸۷.

۱. فیزیک - - آزمایشها. ۲. فیزیک - - ابزار و وسایل. الف. امین‌پور، پرویز، ۱۳۱۶ - . ب. عنوان.

۵۳۰/۰۲۸

QC۳۳/۴۴۴

کتابخانه ملی ایران

م ۷۵-۴۶۳۸



بیشتر این آزمایشها در سالهای دور در  
آزمایشگاههای تحت سرپرستی استاد  
فقید شادروان دکتر محمود حسابی برای  
اولین بار با وسایل ابتدایی موجود در آن  
زمان راه اندازی شده و سپس در سالهای بعد  
با دستگاههای مجهزتر کاملتر شده است .  
در آزمایشهای مربوط به نور به خصوص  
از آزمایشهایی که با نظارت استاد فقید  
راه اندازی و دستور کار آن نوشته شده  
فراوان استفاده شده است . یاد استاد فقید  
را گرامی می داریم .

## فهرست

ن	پیشگفتار
۱	۱ کلیات
۱	نکاتی در مورد نحوه کار در آزمایشگاه و تهیه گزارش کار
۳	نحوه تهیه گزارش کار
۴	خطای اندازه گیری
۶	محاسبه خطاها در چهار عمل اصلی
۷	روش محاسبه
۱۰	نمایش هندسی ارتباط دو کمیت با یکدیگر
۱۴	۲ مکانیک
۱۴	آزمایش ۱- وسایل اندازه گیری
۲۳	آزمایش ۲- چگالی
۲۶	آزمایش ۳- بررسی قانون هوک در فنر و حرکت نوسانی فنر
۳۱	آزمایش ۴- سقوط آزاد اجسام
۳۵	آزمایش ۵- ماشینهای ساده
۴۲	آزمایش ۶- بررسی برابری گشتاور نیروها
۴۷	آزمایش ۷- نیروی اصطکاک
۵۱	آزمایش ۸- کشش ریسمان روی استوانه
۵۴	آزمایش ۹- بررسی قوانین حرکت
۵۹	آزمایش ۱۰- ماشین آتوود
۶۲	آزمایش ۱۱- گشتاور ماند دیسک
۶۶	آزمایش ۱۲- آونگ
۶۹	آزمایش ۱۳- آونگ مرکب، آونگ دو طرفه
۷۲	آزمایش ۱۴- حرکت پرتابی
۷۷	آزمایش ۱۵- ضربه و برخورد

۸۲	۳ مکانیک مایعات
۸۲	آزمایش ۱۶- بررسی فشار سیالات ساکن
۸۵	آزمایش ۱۷- قانون ارشمیدس
۸۷	آزمایش ۱۸- چگالی سنجها
۸۹	آزمایش ۱۹- کشش سطحی
۹۵	آزمایش ۲۰- بررسی معادله برنولی

۹۸	۴ امواج
۹۸	آزمایش ۲۱- بررسی پدیده‌های موجی
۱۰۳	آزمایش ۲۲- بررسی امواج ساکن در ریسمان و فنر
۱۰۵	آزمایش ۲۳- پدیده تشدید (رزنانس) در تارها و لوله‌های صوتی

۱۰۹	۵ نور
۱۰۹	آزمایش ۲۴- بازتابش نور
۱۱۴	آزمایش ۲۵- آینه کاو و کوژ
۱۱۷	آزمایش ۲۶- گوی سنج نوری
۱۲۰	آزمایش ۲۷- شکست نور
۱۲۴	آزمایش ۲۸- اندازه‌گیری ضریب شکست تیغه شیشه‌ای به وسیله میکروسکوپ
۱۲۶	آزمایش ۲۹- شکست سنج آبه
۱۲۹	آزمایش ۳۰- منشور
۱۳۳	آزمایش ۳۱- عدسیها
۱۳۷	آزمایش ۳۲- ابیراهی عدسیها
	آزمایش ۳۳- چشم
۱۴۳	آزمایش ۳۴- میکروسکوپ
۱۴۵	آزمایش ۳۵- دوربینها
۱۴۸	آزمایش ۳۶- فوتومتري
۱۵۱	آزمایش ۳۷- اندازه‌گیری طول موج نورهای ساده توسط اسپکتروسکوپ
۱۵۳	آزمایش ۳۸- تداخل امواج نوری
۱۵۷	آزمایش ۳۹- حلقه‌های نیوتون



۱۶۱	آزمایش ۴۰-تداخل سنج مایکلسون
۱۶۴	آزمایش ۴۱-تداخل سنج فابری-پرو
۱۶۸	آزمایش ۴۲-پراش فرنل و فرانهور
۱۷۴	آزمایش ۴۳-بررسی توری مسطح
۱۷۷	آزمایش ۴۴-دستگاه نورنبرگ
۱۸۲	آزمایش ۴۵-تعیین ضریب شکست یک دی الکتریک با استفاده از زاویه بروستر
۱۸۴	آزمایش ۴۶-تیغه اسپات
۱۸۶	آزمایش ۴۷-تیغه های بلورین
۱۹۰	آزمایش ۴۸-تحقیق قانون مالوس و بررسی اثر تیغه مربع موج
۱۹۳	آزمایش ۴۹-پلاریزاسیون چرخشی در بلور کوارتز
۱۹۵	آزمایش ۵۰-سویابی (پلاریمتری)

## ۶ حرارت

۱۹۸	آزمایش ۵۱-گرماسنجی (کالریمتری)
۱۹۸	آزمایش ۵۲-تغییر حالت یک جسم خالص
۲۰۲	آزمایش ۵۳-معادل مکانیکی گرما
۲۰۹	آزمایش ۵۴-فشار بخار آب
۲۱۲	آزمایش ۵۵-ضریب انبساط طولی اجسام
۲۱۶	آزمایش ۵۶-ضریب رسانایی گرمایی
۲۱۸	آزمایش ۵۷-وشکسانی (ویسکوزیته)
۲۲۰	آزمایش ۵۸-ضریب اتمیسیته گازها
۲۲۴	آزمایش ۵۹-اندازه گیری گرمای ویژه مایعات با روش سرد کردن
۲۲۷	آزمایش ۶۰-قانون بویل-ماریوت
۲۲۹	آزمایش ۶۱-تعیین ضریب انبساط حجمی مایعات (روش اول)
۲۳۳	آزمایش ۶۲-تعیین ضریب انبساط حجمی مایعات (روش دوم)

۲۴۰	۷ الکتریسیته
۲۴۰	آزمایش ۶۳-آشنایی با وسایل اندازه گیری الکتریکی
۲۴۳	آزمایش ۶۴-قانون اهم و به هم بستن مقاومتها

۲۴۶	آزمایش ۶۵-تحقیق قانون $R = \rho \frac{L}{S}$
۲۴۹	آزمایش ۶۶-تعیین مقاومت مجهول به روش پل وتستون و پل تار
۲۵۱	آزمایش ۶۷-قوانین کیرشهف
۲۵۴	آزمایش ۶۸-اندازه‌گیری مقاومت داخلی و نیروی محرکه پیلها
۲۵۶	آزمایش ۶۹-اسیلوسکوپ (نوسان‌نما)
۲۶۶	آزمایش ۷۰-قوانین الکترومغناطیس
۲۷۱	آزمایش ۷۱-ترانسفورماتور
۲۷۴	آزمایش ۷۲-مطالعهٔ سلف در جریان متناوب و اندازه‌گیری مقاومت ظاهری
۲۷۷	آزمایش ۷۳-خازنها
۲۸۰	آزمایش ۷۴-پرو خالی شدن خازن و به هم بستن خازنها
۲۸۳	آزمایش ۷۵-بررسی مدارهای R-L-C
۲۸۷	پیوست
۲۸۷	مشخص کردن مقاومتها به وسیلهٔ رنگهای مختلف
۲۸۸	جدولها

## پیشگفتار

هدف آموزش علم، شناسایی پدیده‌های طبیعی و کشف قوانین و نظام طبیعت و به‌کار گرفتن این قوانین به منظور رفاه انسانها، در زندگی فردی و اجتماعی است.

شناخت حاصل نمی‌شود مگر با مشاهده و آزمایش دقیق پدیده‌ها و یافتن روابط بین پدیده‌ها و عواملی که در به‌وجود آوردن آنها مؤثرند. برای این امر نمی‌توان منتظر تصادف شد. پژوهشگر ناچار است که پدیده‌های طبیعی را بازسازی و آنچه را که مورد نظر است مشاهده کند. اینجاست که نقش آزمایش در علوم هویدا می‌شود.

امروزه در آموزش علوم در کلیه سطوح و مقاطع تحصیلی، آزمایشگاه و آزمایش نقش اساسی را ایفا می‌کنند و تمامی برنامه‌های تحصیلی با توجه به این امر تدوین و اجرا می‌شوند. متأسفانه کمتر کتاب جامع و کامل آزمایشگاهی مطابق برنامه‌های درسی دانشگاهی و دبیرستانی وجود دارد که راهنمای امور آزمایشی دانشجویان و دانش‌آموزان باشد. نویسندگان این کتاب با سوابق چندین ساله‌ای که در تدریس فیزیک، به‌ویژه در طراحی ساخت وسایل آزمایشگاهی و راه‌اندازی آزمایشگاهها در دبیرستانها و مراکز تربیت معلم و دانشگاهها دارند و تجربه‌های ممتدی که ضمن تماس با دانشجویان دانشگاهها و مراکز آموزش عالی و کلاسهای کارآموزی معلمان به‌دست آورده‌اند کوشیده‌اند تا این جای خالی را پر کنند و کتاب جامعی دربارهٔ آزمایشهای فیزیک تدوین کنند.

کتاب حاضر دارای ویژگیهای زیر است:

با توجه به درسهای فیزیک پایه آزمایشهایی برگزیده شده‌اند که تقریباً در برنامهٔ درسی همه کشورها وجود دارند. بسیاری از آزمایشها منطبق با برنامه‌های آزمایشگاههای فیزیک پایهٔ ۱، ۲ و ۳ و اپتیک رشتهٔ فیزیک و نیز آزمایشگاههای فیزیک عمومی دانشکده‌های علوم، فنی، مهندسی و کشاورزی است که مربیان محترم می‌توانند با توجه به شرایط و امکانات آزمایشگاه خود تعدادی از آزمایشها را انتخاب کنند. بسیاری از آزمایشهای ساده‌تر کتاب می‌تواند برای دانش‌آموزان دبیرستانها مفید باشد و نیز در کلاسهای کارآموزی و بازآموزی ضمن خدمت دبیران مورد استفاده قرار گیرد.

در انتخاب وسایل آزمایشگاهی سعی شده است از وسایل ساده‌ای استفاده شود که تهیه و ساختن آنها امکانپذیر باشد تا جنبهٔ آموزشی بیشتری داشته باشد. از انتخاب وسایل آزمایشگاهی وارداتی تا



حد امکان پرهیز شده است. با توجه به اینکه در حال حاضر تهیه وسایل آزمایشگاهی ساخت خارج از کشور در بازار بسیار مشکل است. مریبان محترم آزمایشگاههای دانشگاهها می توانند با نمونه برداری از وسایل پیشنهادی در مورد راه اندازی و تجهیز آزمایشگاههای نوین اقدام کنند.

دانش آموزان و دانشجویان می توانند تعداد زیادی از وسایل مورد نظر را خود بسازند و آزمایش کنند که این امر در ایجاد مهارتهای یدی و توانایی اندیشیدن و پرورش خلاقیت و ابتکار سهمی بسزا خواهد داشت.

دستور کار آزمایشها با زبانی ساده، روش انجام آزمایش را توضیح داده است و برای اینکه دانشجویان را از مراجعه به کتب و منابع مختلف درسی بی نیاز سازد تئوری آزمایشها در حد لزوم به صورت مقدمه آزمایش ذکر شده است.

در گزینش واژه ها و اصطلاحات علمی از واژه های متداول استفاده شده است. از جزوات آزمایشگاهی همکاران دانشگاهی به ویژه در آزمایشهای اپتیک از نوشته های آقای ناصر مقبلی بسیار سود جستیم که ضمن قدردانی از کلیه آنان به این وسیله مراتب سپاس خود را اعلام می داریم. تذکر هرگونه کمی و کاستی در این کتاب و پیشنهادهایی که در مورد افزایش کارایی آن می شود موجب امتنان خواهد بود.

محمود قرآن نویس - پرویز امین پور

# کلیات ۱

## نکاتی در مورد نحوه کار در آزمایشگاه و تهیه گزارش کار

برای موفقیت در انجام کارهای آزمایشگاهی و نتیجه‌گیری بهتر و جلوگیری از اتلاف وقت و انرژی و دوباره‌کاریهای زائد، نظم و ترتیب بسیار ضروری است که در صورت عدم رعایت آن و بی‌دقتی و سهل‌انگاری، با اشکالاتی مواجه خواهید شد. عدم توجه به نکات ایمنی، خسارات جانی و مالی به بار می‌آورد و باید آنها را دقیقاً مراعات کرد.

برای ایجاد نظم و آرامش در آزمایشگاه و فراهم آوردن محیط مناسب آموزشی و فهم و درک بهتر آزمایشها و افزایش بازده کار در آزمایشگاه، توجه دانشجویان گرامی را به موارد زیر جلب می‌کنیم:

- ۱- رأس ساعت مقرر در آزمایشگاه حضور به هم رسانید.
- ۲- هنگامی در کار آزمایشگاهی موفق خواهید بود که اطلاع کاملی از تئوری آزمایش داشته باشید و با دقت و حوصله کار کنید. به‌طوری که انجام آزمایش ملالت‌آور نباشد.
- بنابراین، قبل از ورود به آزمایشگاه دستورکار و تئوریهای مربوط را به دقت مطالعه کنید و با آمادگی کامل مشغول شوید.
- ۳- در آزمایشگاه سکوت را مراعات و در محل تعیین شده کار کنید. از رفت و آمد غیرضروری به سایر نقاط آزمایشگاه بپرهیزید.

- ۴- از دست زدن به وسایلی که مربوط به آزمایش شما نیست مطلقاً اجتناب کنید.
- ۵- وسایل آزمایش مربوطه را تحویل بگیرید و پس از پایان آزمایش آنها را سالم تحویل دهید.
- ۶- اگر هنگام آزمایش به وسایلی آسیب رسد، دانشجو موظف به جبران خسارت وارده است و در مواردی علاوه بر دریافت خسارت، به‌خاطر بی‌مبالاتی و عدم انضباط، از نمره آزمایشگاه کسر می‌شود.

- ۷- نتایج آزمایش و محاسبه‌ها را در دفتر خود یادداشت کنید و در خاتمه به امضای یکی از مسئولان آزمایشگاه برسانید.

- ۸- طرز کار وسایل اندازه‌گیری را که در آزمایش به‌کار می‌برید، قبلاً با دقت مطالعه کنید و پس از اطمینان از اینکه خوب یاد گرفته‌اید، آنها را به‌کار برید.

- ۹- اگر با طرز کار وسیله‌ای آشنایی ندارید، قبل از کاربرد، از مسئولین آزمایشگاه نحوه کار با آن را بی‌رسید تا راهنمایی لازم به عمل آید.
- ۱۰- دقت کنید تا عوامل خارجی که روی آزمایش اثر می‌گذارند به حداقل میزان خود برسند.
- ۱۱- سیمها یا لوله‌های رابط را به وسیله پایه یا گیره محکم کنید و طوری آنها را قرار دهید که مزاحم کار نباشند.
- ۱۲- هنگام کاربرد وسایل و سوار کردن قطعات اگر با اشکالی مواجه شدید از وارد کردن فشار زیاد روی آنها خودداری کنید و از مسئولین آزمایشگاه کمک بخواهید.
- ۱۳- محل کار و سطح میز را کاملاً تمیز کنید و از گذاشتن وسایل اضافی روی آن بپرهیزید.
- ۱۴- دقت کنید که آب یا هر نوع محلول شیمیایی روی میز نریزد. در صورتی که این عمل اتفاق افتاد فوری محل مرطوب را تمیز کنید.
- ۱۵- در صورت بروز هر نوع سانحه غیرمترقبه‌ای، هرچند ناچیز و بی‌اهمیت، فوراً مراتب را به مسئولین آزمایشگاه گزارش دهید.
- ۱۶- وسایل را طوری پهلوی هم قرار دهید تا به هم تکیه نکنند و مانع کار یکدیگر نباشند.
- ۱۷- دماسنج را هرگز به ته ظرفی که در آن چیزی گرم می‌شود نچسبانید.
- ۱۸- وسایل شیشه‌ای را در محلی قرار دهید تا امکان سقوط احتمالی آنها کمتر باشد.
- ۱۹- دستگاههای اندازه‌گیری را طوری روی میز قرار دهید که خواندن درجه‌های آنها خستگی در چشم یا بدن ایجاد نکند.
- ۲۰- هنگام آزمایشهای الکتریسته، وسایل کار و دستهای آزمایشگر باید کاملاً خشک باشد تا رطوبت خللی به کار وارد نکند.
- ۲۱- روکش سیمهای مورد استفاده را بررسی کنید و مطمئن شوید که سالم هستند. در غیراین صورت نسبت به تعویض آنها اقدام کنید.
- ۲۲- در مدارهای الکتریکی، در سر راه جریان حتماً باید کلید قطع و وصل گذاشته شود.
- ۲۳- برای اینکه شدت جریان غیرمجاز، صدمه‌ای بر وسایل نزند، در مدار رنوستا قرار دهید. ابتدا مقاومت رنوستا را در حداکثر بگذارید و سپس تاحد لازم پایین بیاورید.
- ۲۴- هنگام اتصال سیم به فیشها باید سیم در جهت گردش عقربه‌های ساعت دور پیچ بسته شود تا ضمن بستن پیچ محکمتر شده و خارج نشود.
- ۲۵- برای جلوگیری از اثرهای متقابل ناشی از میدانها، دستگاههای اندازه‌گیری را خیلی نزدیک به هم قرار ندهید.
- ۲۶- در آزمایشهای الکتریسته، در بستن مدارها، با توجه به شکلهای مربوط، کاملاً دقت کنید و پس از بستن، در صورتی که مسئولان آزمایشگاه تأیید کردند به برق وصل کنید.



- ۲۷- از وارد کردن ضربه و تکان سریع به دستگاههای اندازه‌گیری خودداری و آنها را به آرامی جابه‌جا کنید.
- ۲۸- اگر از میزان شدت جریان یا اختلاف پتانسیل مورد اندازه‌گیری اطلاع ندارید سرفیش را به دستگاه نزدیک کنید، اگر انحراف عقربه بیش از حد مجاز نبود، اتصال دائمی را برقرار کنید.
- ۲۹- از دست زدن و پاک کردن دستگاههای نوری با دستمال و کاغذ به شدت پرهیزید و اگر پاک کردن آنها ضروری باشد از مسئولین آزمایشگاه کمک بخواهید.
- ۳۰- دستگاههایی که در آزمایشگاه به کار می‌روند باید حساس و قابل اعتماد و درست باشند: - دستگاهی حساس است که با کمترین عامل به وجود آورنده تغییر، بیشترین انحراف را داشته باشد.
- دستگاهی قابل اعتماد است که نتایج اندازه‌گیریهای مکرر از کمیتی که مورد سنجش است همواره یکسان باشد.
- میزان نزدیکی نتایج سنجش با مقدار واقعی کمیت هر چه کمتر باشد دستگاه درست‌تر است.
- ۳۱- بعد از انجام آزمایش، کلیه وسایل را مرتب کنید و به حالت قبل از آزمایش برگردانید.

## نحوه تهیه گزارش کار

- گزارش کار ارتباطی است که بین شخص آزمایشگر و مربی آزمایشگاه برقرار می‌شود، تا وی از کم و کیف آزمایش و کارهایی که دانشجو انجام داده است، اطلاع حاصل کند. یک گزارش خوب باید شامل کلیه مراحل کار بوده، و در ضمن با شرح و تفصیل زاید، مطالعه آن کسالت‌آور نباشد.
- در تهیه گزارش کار باید نکات زیر مورد توجه قرار گیرند و هر مطلبی به وضوح و پاکیزه بدون خدشه و قلم خوردگی به ترتیب زیر نوشته شود:
- ۱- موضوع آزمایش، تاریخ انجام آزمایش، تاریخ نوشتن گزارش، نام و نام خانوادگی دانشجو و همکار یا همکاری که در یک گروه کار می‌کنند.
  - ۲- هدف از انجام آزمایش.
  - ۳- وسایل مورد نیاز و میزان دقت آنها.
  - ۴- تئوری مربوط به آزمایش با ذکر روابط و اشکال مربوط.
  - ۵- شرح دستگاه و رسم شکل آنها.
  - ۶- روش انجام آزمایش.
  - ۷- تکمیل جدولهای مربوط به آزمایش و مشخص کردن واحدها.
  - ۸- انجام محاسبات مربوط به طور واضح، در صورت تکرار محاسبات، یک محاسبه نمونه کافی است.

- ۹- رسم شکل مدارها با توجه به علائم و استانداردهای مشخص.
- ۱۰- رسم نمودارها در صفحات جداگانه با ذکر مختصات، مقیاس و واحدها.
- ۱۱- نتیجه‌گیری از آزمایش- در این مورد باید آزمایشگر استنباط خود را از آزمایش و کاربرد وسایل و اشکالاتی را که وجود داشته است شرح دهد. اظهار نظر دانشجو درباره محاسن یا معایب روش اعمال شده یا ارائه روشهای دیگر حائز اهمیت است. اگر آزمایش به نتیجه نرسیده است علل آن و راههای از بین بردن عوامل مخل یا کم کردن خطاها را متذکر شود.
- ۱۲- میزان نتایج حاصل از تئوری و عمل را با یکدیگر مقایسه و دلایل مطابقت یا عدم مطابقت آنها را بیان کند.

## خطای اندازه‌گیری

هر نوع اندازه‌گیری، در اثر عوامل مختلف، با مقداری خطا همراه است و معمولاً نتیجه اندازه‌گیریها، کاملاً دقیق نیست. با تکرار اندازه‌گیریها و دقت بیشتر و روی هم رفته با اتخاذ تدابیری، می‌توان مقدار خطا را به حداقل رسانید ولی به هیچ وجه نمی‌توان آن را از بین برد.

منابع خطاها بسیار زیاد و ذکر همه آنها ناممکن است ولی آنهایی را که همواره وجود دارند می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

۱- خطای شخصی، که مربوط به وضع روانی و سابقه ذهنی و عدم دقت کافی شخص است. مثلاً شخصی در کاربرد وسیله اندازه‌گیری و خواندن درجه‌ها سهل‌انگاری می‌کند یا اینکه سعی دارد به نتیجه معینی برسد.

۲- خطای سیستماتیک، که به‌طور منظم در یک جهت اتفاق می‌افتد و مربوط به وسیله اندازه‌گیری است، مانند ترازویی که جسم را سبکتر یا سنگینتر نشان می‌دهد. بعضی اوقات بر اثر مقایسه با سایر دستگاهها می‌توان میزان خطا را تا حدودی تشخیص داد و در محاسبه‌ها منظور کرد.

۳- خطاهای اتفاقی، این نوع خطاها به‌طور نامنظم و تصادفی اتفاق می‌افتند و توسط عوامل متغیر خارجی به‌وجود می‌آیند، مانند تغییر دمای محیط یا تغییر فشار هوا که در نتیجه بعضی از آزمایشها مؤثر واقع می‌شوند.

برآورد خطا- برای تخمین میزان خطا دستور کار مشخصی وجود ندارد و برای هر مورد از روش خاصی استفاده می‌شود.

مقدار واقعی کمیت، دور از دسترس است و ما را از آن اطلاعی نیست و برای به‌دست آوردن آن، یک بار اندازه‌گیری کافی نیست و به دفعات باید تکرار شود. در صورتی که مقادیر به‌دست آمده تقریباً یکسان باشند لزومی ندارد که اندازه‌گیری را زیاد تکرار کرد. ولی اگر اختلاف زیادی بین آنها وجود داشته باشد با تکرار زیاد باید از حدود تغییرات اندازه‌ها مطمئن شد. میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده

محتملترین مقدار کمیت است، موقعی که تعداد اندازه‌گیریها کم باشد، حداکثر انحراف از میانگین، میزان خطا محسوب می‌شود. در حالی که تعداد اندازه‌گیریها چندین بار تکرار شود، میانگین انحرافها را محاسبه و تفاوت آن را با میانگین مقدار اندازه‌گیری شده به عنوان خطا منظور کنید.

اگر کمیت  $x$  به تعداد  $n$  مرتبه اندازه‌گیری شود و نتایج به دست آمده  $x_1, x_2, \dots, x_n$  باشد خواهیم داشت

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

میانگین خطا از تقسیم مجموع قدرمطلق انحراف از میانگینها به تعداد دفعات اندازه‌گیری به دست می‌آید

$$\Delta x = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n}$$

**خطای مطلق** - خطای مطلق مقدار اندازه‌گیری شده  $a$  که آن را با  $\Delta a$  نشان می‌دهند عبارت است از اختلاف آن با مقدار دقیق کمیت. بنابراین

$$\text{مقدار دقیق کمیت} = a \pm \Delta a$$

اگر مقدار اندازه‌گیری شده کوچکتر از مقدار دقیق آن باشد تقریب نقصانی و  $\Delta a$  مثبت است و در صورتی که بزرگتر از کمیت باشد تقریب اضافی و  $\Delta a$  منفی است. نظر به اینکه اندازه دقیق خطا را نمی‌دانیم، قدرمطلق حداکثر خطا را محاسبه و دو حد بالا و پایین کمیت را به دست می‌آوریم. اگر  $a$  مقدار اندازه‌گیری شده کمیت  $A$  و حداکثر خطای مطلق  $\Delta a$  باشد خواهیم داشت

$$a - \Delta a < A < a + \Delta a$$

**خطای نسبی** - با در دست داشتن مقدار خطای مطلق، به دقت آزمایش نمی‌توان پی برد زیرا باید دید که این میزان خطا، مربوط به چه اندازه کمیت است. لذا خطای نسبی را باید به دست آورد. اگر  $a$  مقدار اندازه‌گیری شده  $A$  با خطای مطلق  $\Delta a$  باشد، بنابه تعریف  $\frac{\Delta a}{a}$  یعنی  $\frac{\Delta a}{A}$  را خطای نسبی کمیت  $A$  گویند.

به علت اینکه  $\Delta a$  در مقابل  $|a|$  بسیار کوچک است عملاً به جای  $\frac{\Delta a}{a + \Delta a}$  مقدار  $\frac{\Delta a}{a}$  را منظور می‌کنند. اختلاف این دو مقدار برابر است با

$$\frac{\Delta a}{a + \Delta a} - \frac{\Delta a}{a} = \frac{-\Delta a^2}{a(a + \Delta a)}$$

خطای نسبی این خطا برابر است با  $\frac{-\Delta a^2}{a(a + \Delta a)} : \frac{\Delta a}{a + \Delta a} = -\frac{\Delta a}{a}$  نظر به اینکه  $\Delta a$  نسبت به  $|a|$  کوچک است از این خطا، صرف نظر می‌شود و با تقریب ناچیزی  $\frac{\Delta a}{A} = \frac{\Delta a}{a}$  خواهد بود. چون خطای نسبی، خارج قسمت دو مقدار هم جنس است عددی است که بستگی به واحدهای انتخابی ندارد.

## محاسبه خطاها در چهار عمل اصلی

خطای مجموع - در صورتی که  $x = a + b$  باشد خطای مطلق  $\Delta x = \Delta a + \Delta b$  و خطای نسبی آن  $\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta a + \Delta b}{a + b}$  خواهد بود.

خطای تفاضل - در صورتی که  $x = a - b$  باشد خطای مطلق  $\Delta x = \Delta a + \Delta b$  و خطای نسبی  $\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta a + \Delta b}{a - b}$  خواهد بود.

خطای حاصل ضرب - در صورتی که  $x = a \cdot b$  باشد خطای مطلق برابر  $\Delta x = a\Delta b + b\Delta a$  و خطای نسبی  $\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$  خواهد بود. به همین ترتیب اگر  $x = a \cdot b \cdot c \dots$  باشد

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta c}{c} + \dots$$

در نتیجه خطای نسبی حاصل ضرب چند مقدار برابر مجموع خطاهای نسبی آنهاست.

خطای خارج قسمت - در صورتی که  $x = \frac{a}{b}$  باشد  $\Delta x = \frac{b\Delta a - a\Delta b}{a \cdot b}$  و خطای نسبی  $\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta a}{a} - \frac{\Delta b}{b}$  خواهد بود. چون علامت  $\Delta a$  و  $\Delta b$  معلوم نیست برای محاسبه حداکثر خطا باید  $\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$  را باهم جمع کرد یعنی،

به طور کلی در رابطه  $\frac{\Delta x}{x}$  اگر  $\Delta x$  به اندازه کافی کوچک باشد و بتوانیم آن را دیفرانسیل  $x$  بدانیم اندازه خطای نسبی  $x$  برابر دیفرانسیل  $Lx$  می شود.

$$dLx = \frac{dx}{x}$$

در صورتی که  $x = f(a, b, \dots)$  باشد اندازه خطای نسبی آن را می توان از رابطه زیر به دست آورد

$$\frac{dx}{x} = dLf(a, b, \dots)$$

بنابراین از طرفین رابطه ابتدا لگاریتم طبیعی و سپس دیفرانسیل می گیریم و به جای دیفرانسیل هر کمیت، مقدار خطای مربوط را قرار می دهیم و میزان خطای نسبی را محاسبه می کنیم.

مثال. در رابطه  $x = \frac{a^2 - b}{(2a - b)(b - 3a)}$  خطای نسبی  $x$  را محاسبه کنید.

حل: از طرفین رابطه بالا لگاریتم می گیریم

$$Lx = L(a^2 - b) - L(2a - b) - L(b - 3a)$$

دیفرانسیل رابطه بالا به صورت زیر است

$$\begin{aligned} \frac{dx}{x} &= \frac{d(a^2 - b)}{a^2 - b} - \frac{d(2a - b)}{2a - b} - \frac{d(b - 3a)}{b - 3a} \\ \frac{dx}{x} &= \frac{2ada}{a^2 - b} - \frac{db}{a^2 - b} - \frac{2da}{2a - b} + \frac{db}{2a - b} - \frac{db}{b - 3a} + \frac{3da}{b - 3a} \end{aligned}$$

چون حداکثر خطا را می‌خواهیم، علامتهای منفی را مثبت اختیار می‌کنیم و همچنین به جای  $da$  و  $db$  مقادیر خطای هر کمیت یعنی  $\Delta a$  و  $\Delta b$  را قرار می‌دهیم

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{2a\Delta a}{a^2 - b} + \frac{\Delta b}{a^2 - b} + \frac{2\Delta a}{2a - b} + \frac{\Delta b}{2a - b} + \frac{\Delta b}{b - 3a} + \frac{2\Delta a}{b - 3a}$$

با جایگزینی مقادیر اندازه‌گیری شده  $a$  و  $b$  و خطای مربوط به هر کدام یعنی  $\Delta a$  و  $\Delta b$  مقدار خطای نسبی کمیت، یعنی  $\frac{\Delta x}{x}$  به دست می‌آید.

## روش محاسبه

طرز نوشتن اعداد خیلی بزرگ و خیلی کوچک - درک و تصور خواندن اعداد خیلی بزرگ که دارای دهها صفر یا اعداد کوچکی که دارای دهها ممیز هستند مشکل است. به خاطر زیادی صفرها امکان دارد در نوشتن آنها اشتباهی رخ دهد یا در محاسبه مشکلاتی به وجود آید، از این رو اعداد بزرگ و کوچک را با قوای  $10$  نمایش می‌دهند.

اعداد بزرگ با قوای مثبت  $10$  و اعداد کوچکتر از واحد با قوای منفی ده نشان داده می‌شوند. مثلاً شعاع کره زمین  $6.4 \times 10^6 m$  و شعاع اتم هیدروژن  $5.1 \times 10^{-11} m$  است.

اعداد با معنا و مفهوم صفر بعد از ممیز - فرض می‌کنیم طول اتاقی  $5$  متر و  $32$  سانتیمتر باشد. اگر این طول را با نوار متری که کوچکتر از دسیمتر را نشان نمی‌دهد اندازه بگیریم  $5$  متر و  $3$  دسیمتر را نشان می‌دهد و باید از  $2$  سانتیمتر صرف‌نظر کرد. نتیجه اندازه‌گیری به صورت  $5.3$  متر نوشته می‌شود. در صورتی که همین طول با نوار متری که سانتیمتر را هم نشان می‌دهد اندازه‌گیری شود نتیجه اندازه‌گیری به صورت  $5.32$  متر نوشته می‌شود.

حال اگر طول اتاقی  $5$  متر و  $30$  سانتیمتر باشد در اندازه‌گیری اول  $5.3$  و در اندازه‌گیری دوم به صورت  $5.30$  نوشته می‌شود. به طوری که ملاحظه می‌شود در ریاضیات  $5.3$  و  $5.30$  هر دو یکی است و با یکدیگر تفاوتی ندارند ولی در فیزیک دارای دو مفهوم مختلف‌اند. عدد  $5.3$  نشان می‌دهد که دقت اندازه‌گیری در حدود دهم متر بوده و مقدار صدم اندازه‌گیری نشده است. ممکن است کمیت مورد اندازه‌گیری به اندازه چند صدم کمتر یا بیشتر اندازه‌گیری شده باشد زیرا احتمالاً مقدار طول  $5$  متر و  $29$  سانتیمتر بوده یا  $5$  متر و  $31$  سانتیمتر بوده است و با توجه به دقت وسیله اندازه‌گیری  $5$  متر و  $3$  دسیمتر خوانده شده است.

بنابر این در اینجا دو رقم بامعنا وجود دارد و رقم آخر یعنی  $3$  مشکوک است. عدد  $5.30$  نشان می‌دهد که اندازه‌گیری با تقریب صدم متر یعنی سانتیمتر اندازه‌گیری شده است و این کمیت از  $3$  دسیمتر بیشتر یا کمتر نبوده است، زیرا در غیر این صورت وسیله اندازه‌گیری آن را نشان می‌داد و بعد از رقم  $3$  نوشته می‌شد. بنابر این عدد  $5.30$  دارای  $3$  رقم بامعناست. در اینجا نیز امکان دارد مقدار حقیقی

کمیت به اندازه چند میلیمتر کمتر یا بیشتر از مقدار اندازه گرفته شده باشد. لذا رقم سوم یعنی صفر مشکوک است.

دقت اندازه‌گیری مربوط به تعداد ارقامی است که اندازه‌گیری شده‌اند و صفر بعد از ممیز دقت بیشتر اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. وسایلی که برای اندازه‌گیری به‌کار می‌روند هرچه دقیقتر باشند رقمهای بامعنا بیشتر خواهد بود.

گرد کردن اعداد - موقعی که بخواهیم از تعداد ارقام بامعنا عددی بکاهیم، اگر رقمی که حذف می‌شود ۴ یا کوچکتر از آن باشد، حذف می‌شود و رقم قبلی به‌همان صورت که بوده است باقی می‌ماند. اگر رقم حذف شدنی ۶ یا بیشتر از آن باشد آن را حذف و به رقم قبل از آن یک واحد اضافه می‌کنیم. در صورتی که رقم حذف شدنی ۵ یا ۵ و چند صفر در جلوی آن باشد، اگر عدد قبل از ۵ زوج باشد تغییری نمی‌کند ولی در صورت فرد بودن به‌اندازه یک واحد بیشتر می‌شود. اگر رقم حذف شدنی ۵ و چند رقم دیگر غیر از صفر دنبال آن باشد به عدد قبل از آن یک واحد اضافه می‌کنیم. در زیر یک عدد با ارقام بامعناى مختلف به‌عنوان مثال ذکر شده است.

۵ رقم بامعنا	۴ رقم بامعنا	۳ رقم بامعنا	۲ رقم بامعنا	عدد
۳,۲۴۱۷	۳,۲۴۲	۳,۲۴	۳,۲	۳,۲۴۱۶۸

چهار عمل اصلی اعداد بامعنا - در محاسبه‌های اعداد بامعنا سه موضوع زیر باید رعایت شود.

۱- کمیت‌هایی که بر هم افزوده می‌شوند یا از هم کم می‌شوند حتماً باید هم جنس و بر حسب یک واحد باشند.

۲- میزان دقت یا تعداد ارقام بعد از ممیز کمیتها، به یک اندازه باشند. در غیر این صورت عددی را که دقت کمتری دارد و ارقام بعد از ممیز آن کمتر از بقیه است مبنا قرار می‌دهند و اعدادی را که ارقام بعد از ممیز آنها بیشتر است گرد می‌کنند تا تعداد ارقام آنها به‌اندازه ارقام بعد از ممیز عدد مبنا برسد، سپس عمل جمع یا تفریق را انجام می‌دهند.

مثال ۱. مطلوب است مجموع سه عدد  $۲۵/۶g$  و  $۴۳/۳۵g$  و  $۱۱/۴۹۸g$ .

حل: ارقام مشکوک این سه عدد به‌ترتیب در مرتبه دهم و صدم و هزارم هستند. عدد  $۲۵/۶$  را که رقم مشکوک آن در مرتبه دهم و ارقام بعد از ممیز آن کمتر از بقیه است مبنا قرار می‌دهیم و دو عدد دیگر را با یک رقم اعشاری می‌نویسیم و عمل را انجام می‌دهیم، لذا

$$۲۵/۶g + ۴۳/۴g + ۱۱/۵g = ۸۰/۵g$$

مثال ۲. اعداد  $۶/۷۵ \times ۱۰^{-۲}cm$  و  $۴/۵۲ \times ۱۰^{-۲}cm$  را با هم جمع کنید.

حل: مبنای ده در هر دو باید یکسان باشد پس  $۴/۵۲ \times ۱۰^{-۲}cm = ۰/۴۵۲ \times ۱۰^{-۲}cm$

برای اینکه ارقام بعد از ممیز هردو یکی شود عدد دوم را گرد می‌کنیم و با اولی جمع می‌کنیم

$$۶,۷۵ \times ۱۰^۲ \text{ cm} + ۰,۴۵ \times ۱۰^۲ \text{ cm} = ۷,۲۰ \times ۱۰^۲ \text{ cm}$$

مثال ۳. عدد  $۳۶,۸ \text{ km}$  را از  $۹۷ \text{ km}$  کم کنید.

حل: عدد اول را گرد و از دومی کم می‌کنیم

$$۹۷ - ۳۷ = ۶۰,$$

دقت کنید که بعد از ۶۰ ممیز قرار گرفته است. این ممیز نشان می‌دهد که حاصل دارای دو رقم بامعناست.

مثال ۴. عدد  $۶,۴۳ \times ۱۰^{-۲} \text{ m}$  را از  $۱,۳۸ \times ۱۰^۲ \text{ m}$  کم کنید.

حل: برای اینکه نمای ده در هردو یکسان شود باید نوشت

$$۶,۴۳ \times ۱۰^{-۲} \text{ m} = ۰,۰۰۰۶۴۳ \times ۱۰^۲ \text{ m}$$

این عدد در مقایسه با عدد  $۱,۳۸ \times ۱۰^۲ \text{ m}$  قابل چشمپوشی است، در نتیجه

$$۱,۳۸ \times ۱۰^۲ \text{ m} - ۰,۰۰۰۶۴۳ \times ۱۰^۲ \text{ m} = ۱,۳۸ \times ۱۰^۲ \text{ m}$$

خواهد بود.

۳- در ضرب و تقسیم اعداد بامعنا، معمولاً تعداد ارقام با معنای حاصل ضرب یا خارج قسمت باید برابر ارقام بامعنای یکی از عوامل ضرب یا مقسوم و مقسوم علیه باشد و بیشتر از آن نشود. البته این موضوع استثناهایی دارد. مثالهای زیر به فهم موضوع کمک می‌کند.

مثال ۱. حاصل ضرب  $۱۰,۷ \text{ m}$  را در  $۹,۵ \text{ m}$  پیدا کنید.

حل:

$$۱۰,۷ \text{ m} \times ۹,۵ \text{ m} = ۱۰۱,۶۵ \text{ m}^۲$$

چون ارقام ۱۶۵ مشکوک هستند با گرد کردن آنها، حاصل ضرب به صورت  $۱۰۲ \text{ m}^۲$  درمی‌آید. به طوری که ملاحظه می‌شود این یک حالت استثنایی از ضرب است.

مثال ۲. عدد  $۲,۷۵ \times ۱۰^۶$  را در  $۴,۸ \times ۱۰^{-۲}$  ضرب کنید.

حل:  $۲,۷۵ \times ۴,۸ = ۱۳,۲۰۰$  که در آن ارقام مشکوک هستند در نتیجه با گرد کردن

حاصل ضرب خواهیم داشت ۱۳. همچنین  $۱۰^۴ = ۱۰^{-۲} \times ۱۰^۶$ ، در نتیجه حاصل ضرب به صورت زیر درمی‌آید

$$۱۳ \times ۱۰^۴ = ۱,۳ \times ۱۰^۵$$

مثال ۳. عدد  $۶۸ \times ۷۳$  را بر  $۲۲,۹$  تقسیم کنید.

حل:  $۳/۰۰۱ = ۲۲/۹ : ۶۸/۷۳$  چون باید ۳ رقم با معنا داشته باشیم، خارج قسمت به صورت  $۳/۰۰$  نوشته می شود.

مثال ۴.  $۱۰^۴ \times ۸/۹۲$  را بر  $۱۰^{-۲} \times ۱/۳۵$  تقسیم کنید.

حل:  $۶/۶۱ = ۱/۳۵ : ۸/۹۲$  خارج قسمت گرد شده تا ۳ رقم با معنا دارد.  $۱۰^۲ = ۱۰^{-۲} : ۱۰^۴$ .  
بنابراین خارج قسمت به صورت  $۶/۶۱ \times ۱۰^۷$  درمی آید.

## نمایش هندسی ارتباط دو کمیت بایکدیگر

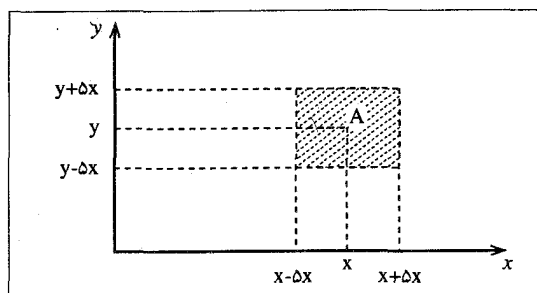
هرگاه دو کمیت طوری به هم مربوط باشند که با تغییر یکی، دیگری نیز تغییر کند، اولی را متغیر و دومی را تابع آن گویند. مثلاً طول فنر تابعی است از مقدار وزنه‌ای که به آن آویزان است. هرچه مقدار وزنه بیشتر باشد طول فنر بیشتر می شود. یا موقعی که دوسریک رسانا را به اختلاف پتانسیل معینی وصل می کنیم شدت جریانی که از رسانا عبور می کند متناسب با مقاومت آن است. تغییرات مقاومت باعث تغییرات شدت جریان می شود، هرچه مقاومت کمتر باشد شدت جریان بیشتر است. در مورد اول چون تغییرات مقدار وزنه و فنر در یک جهت هستند نسبت را مستقیم گویند ولی در مورد دوم چون تغییرات مقاومت و شدت جریان هم جهت نیستند نسبت معکوس است.

در آزمایشها، برای رسم منحنی نمایش تغییرات تابع، یکی از کمیتها را تغییر می دهیم و مقدار دومی را به ازای آن مقدار معین، به دست می آوریم و در جدولی یادداشت می کنیم. محورهای مختصات را عمود بر یکدیگر، با محور  $x$  برای کمیت اول و محور  $y$  برای کمیت دوم رسم می کنیم و نام کمیتها را در کنار آنها می نویسیم.

برای هر کمیت روی محور مربوط مقدار دلخواهی را به عنوان واحد انتخاب می کنیم، البته لزومی ندارد که مقیاس انتخابی برای هر دو کمیت یکسان باشد. با توجه به اعدادی که در جدول ثبت شده است مختصات هر نقطه مربوط به هر وضعیت را پیدا می کنیم و آن را با علامت  $x$  مشخص می سازیم. با وصل کردن نقاط به دست آمده بایکدیگر منحنی مطلوب را به دست می آوریم.

برای وصل نقاط به یکدیگر نباید همه نقاطی را که رسم شده است به طور دقیق به هم متصل کرد. بلکه باید منحنی را طوری کشید که شامل بیشترین نقاط باشد و از نزدیکی بقیه نقاط عبور کند. انحراف بعضی از نقاط به خاطر عدم دقت در آزمایش است. این موضوع را به این نحو می توان توجه کرد که هر نقطه مانند  $A$  به مختصات  $x_1$  و  $y_1$  در اندازه گیری، خطاهایی به میزان  $\Delta x$  و  $\Delta y$  دارد و در حقیقت نقطه  $A$  دارای مختصاتی در حدود  $x \pm \Delta x$  و  $y \pm \Delta y$  است و در نتیجه مطابق شکل ۱-۱ یک نقطه هندسی مشخص نیست و می توان چنین فرض کرد که نقطه  $A$  داخل منطقه‌ای به شکل مربع مستطیل به ابعاد  $2\Delta x$  و  $2\Delta y$  قرار دارد و کافی است که نمودار از درون این منطقه عبور کند. در همه موارد با تابعی نظیر  $y = ax + b$  سروکار نداریم که منحنی نمایش آنها خطی باشد.





شکل ۱-۱

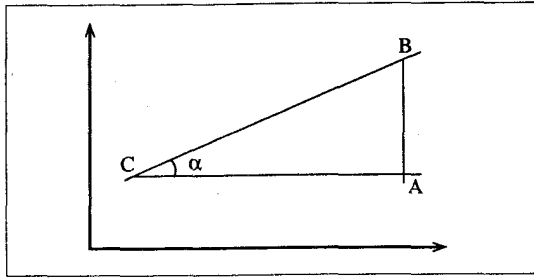
در بعضی موارد به توابعی برخورد می‌کنیم که دارای شکل نمایی هستند. این توابع به صورت معادله  $y = ce^{kx}$  نمایش داده می‌شوند. اگر از رابطه بالا لگاریتم طبیعی بگیریم عبارت فوق به صورت زیر درمی‌آید

$$Ly = Lc + kx$$

چون  $Lc$  عدد ثابتی است، ملاحظه می‌شود که با تغییرات  $x$  لگاریتم  $y$  تغییر می‌کند. اگر مقادیر مختلف  $x$  و  $y$  را روی محورهای مختصات مشخص کنیم، نمودار به صورت خط مستقیم خواهد بود. برای اینکه نمودار به صورت خط راستی درآید مقادیر  $x$  و لگاریتم  $y$  را روی محورهای منتقل می‌کنیم. برای سهولت کار کاغذهای چاپ شده‌ای به نام کاغذ نیمه‌لگاریتمی وجود دارد که یک محورشان دارای تقسیمات لگاریتمی است و برای رسم نمودارها از آنها استفاده می‌کنند.

همچنین در مواردی که تابع به صورت  $y = ax^n$  باشد اگر از طرفین معادله لگاریتم طبیعی بگیریم خواهیم داشت  $Ly = La + nLx$ . حال لگاریتمهای  $x$  و  $y$  را روی محورهای منتقل می‌کنیم، نمودار به صورت خط راست درمی‌آید. کاغذهای چاپ شده‌ای به نام کاغذ تمام لگاریتمی وجود دارد که هر دو محورشان دارای تقسیمات لگاریتمی است و در این موارد به‌کار می‌روند.

**شیب خط روی کاغذهای مختلف** - شیب خط اندازه تانژانت زاویه‌ای است که خط با جهت مثبت محور  $x$  ها می‌سازد. به طوری که در آزمایشهای مختلف ملاحظه خواهید کرد شیب خط نوع ارتباط بین کمیت‌های مختلف را نشان می‌دهد و در محاسبات نیاز مبرمی به آن خواهید داشت. پس از رسم خط، مثلث قائم‌الزاویه‌ای رسم کنید که وتر آن روی نمودار و دو ضلعش به موازات محورهای  $x$  و  $y$  باشد. البته هرچه این مثلث بزرگتر باشد بهتر است. اضلاع مثلث را با توجه به واحدهای انتخابی در روی محورهای  $x$  و  $y$  اندازه بگیرید. مطابق شکل ۱-۲ شیب خط  $\tan \alpha = \frac{AB}{AC}$  خواهد شد. در کاغذهای چاپی نیمه لگاریتمی به خاطر اینکه لگاریتم اعشاری به لگاریتم طبیعی تبدیل شود باید پس از محاسبه تانژانت، مقدار آن را در  $2.3$  که برابر لگاریتم عدد ده در پایه طبیعی است ضرب کنید.



شکل ۱-۲

واحدهای بعضی از کمیتها و ارتباط آنها بایکدیگر - کمتهایی مورد نظر هستند که در آزمایشگاه همواره با آنها سروکار دارید :

## الف) نیرو

در دستگاه c.g.s. واحد نیرو، دین است و آن نیرویی است که به جرم یک گرم، شتاب یک سانتیمتر بر مجذور ثانیه بدهد.

واحد نیرو در دستگاه بین‌المللی (SI)، نیوتون است و آن نیرویی است که به جرم یک کیلوگرم، شتاب یک متر بر مجذور ثانیه بدهد. هر نیوتون برابر  $10^5$  دین است.  
برای نیرو واحدهای کیلوگرم نیرو و گرم نیرو نیز به کار می‌رود.  
هر کیلوگرم نیرو برابر g نیوتون یعنی به طور متوسط  $9/8$  نیوتون است.  
هر گرم نیرو برابر g دین یعنی به طور متوسط  $980$  دین است.  
چون g ثابت نیست، کیلوگرم نیرو و گرم نیرو با آن تغییر می‌کنند. مثلاً یک کیلوگرم نیرو، در قطب  $9/83$  نیوتون و در استوا  $9/78$  نیوتون است.

## ب) فشار

در دستگاه c.g.s. واحد فشار باری است و آن فشار نیروی یک دین بر یک سانتیمتر مربع است. در SI، واحد فشار پاسکال است و آن فشار نیروی یک نیوتون بر یک متر مربع است. هر پاسکال  $10^5$  باری است.

واحدهای سانتیمتر جیوه و اتمسفر و کیلوگرم نیرو بر سانتیمتر مربع و بار و تور نیز برای فشار به کار می‌روند.

$$1013 \text{ kgf/cm}^2 = 1 \text{ atm}$$

$$76 \text{ cmHg} = 1 \text{ atm}$$

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 9/8 \times 10^5 \text{ bari} = 9/8 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$1\text{ bar} = 10^6 \text{ dyne/cm}^2$$

$$1\text{ torr} = 1\text{ mmHg} = \frac{1}{760}\text{ atm}$$

(ج) کار

واحد کار در دستگاه c.g.s. ارگ و در SI ژول است. هر ژول  $10^7$  ارگ است. واحد دیگری برای کار به کار می رود به نام کیلوگرم متر که برابر  $9/8$  ژول است.

(د) گرما

در مورد گرما علاوه بر ژول واحدهای کالری و کیلوکالری و ترمی نیز به کار می رود. ترمی  $10^6$  کالری و کیلوکالری  $10^3$  کالری است. یک کالری  $4/18$  ژول است.

# ۲ مکانیک

## آزمایش ۱ وسایل اندازه‌گیری

### مقدمه

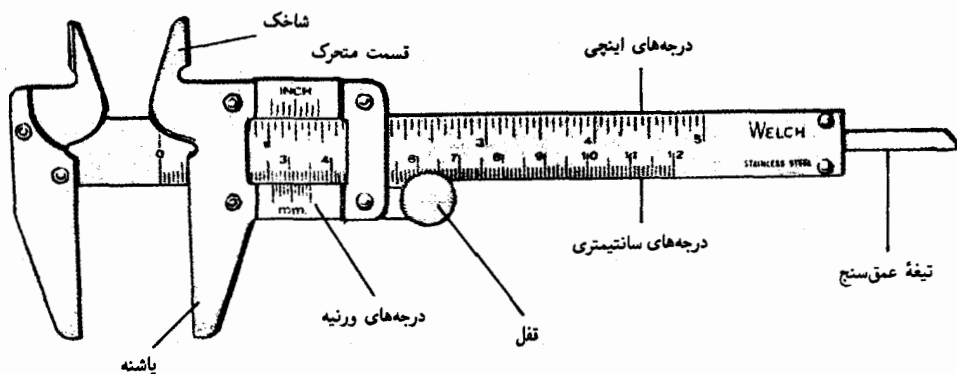
فیزیک را علم اندازه‌گیری نیز تعریف کرده‌اند. آشنایی با وسایل و روشهای اندازه‌گیری اساس کارهای آزمایشگاهی است. اندازه‌گیری طول، پایهٔ اغلب سنجشهاست. ساده‌ترین وسیلهٔ اندازه‌گیری طول، خطکش است. خطکش مورد استفاده در آزمایشگاه باید از چوب سخت و خشک یا فلز ساخته شده باشد. فاصلهٔ خطهای تقسیم‌بندی، به‌طور یکنواخت و با واحد استاندارد انجام گرفته و پهنای خطها به‌اندازه‌ای باشد که بتوان درجات را به‌خوبی مشاهده کرد. در اندازه‌گیری با خطکش خطاهایی وجود دارد که عبارتند از:

- ۱- ممکن است لبهٔ جسم مورد نظر بر صفر خطکش منطبق نشود، برای کاهش خطا بهتر است به موازات صفر خطکش یک تکیه‌گاه تعبیه شود.
- ۲- امتداد دید ناظر اگر عمود بر درجه‌ای که خوانده می‌شود، نباشد، خطکش اندازهٔ طول را یا کمتر یا بیشتر نشان می‌دهد.

هدف آزمایش: آشنایی با وسایل اندازه‌گیری طول و جرم و روش کار کردن با آنها

کولیس - وسیله‌ای است که برای اندازه‌گیری طول و ضخامت و قطرهای داخلی و خارجی و عمق حفره‌ها و شکافها به‌کار می‌رود. کولیس از دو قسمت یکی ثابت و دیگری متحرک تشکیل شده است (شکل ۱-۲). قسمت ثابت خطکشی است که از طرف پایین به سانتیمتر و میلی‌متر و از طرف بالا معمولاً به اینچ و اجزای آن مدرج شده است. قسمت متحرک با فشار دست روی قسمت ثابت می‌لغزد و می‌توان آن را در هر جایی ثابت نگهداشت و با پیچی در جای خود محکم کرد. روی قسمت متحرک درجه‌های ورنیه حک شده است. هریک از قسمتهای ثابت و متحرک دارای یک شاخک و یک پاشنه هستند. همچنین تیغهٔ نازکی در پشت خطکش کولیس، به قسمت متحرک وصل است که برای اندازه عمق مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در خطکشهای ورنیه ۱ -  $n$  میلی‌متر را به  $n$  قسمت مساوی تقسیم می‌کنند. بنابراین هر درجهٔ



شکل ۱-۲

ورنیه  $\frac{n-1}{n}$  میلیمتر و از یک میلیمتر به اندازه  $\frac{1}{n} = 1 - \frac{n-1}{n}$  میلیمتر کمتر است.  $\frac{1}{n}$  نشاندهنده میزان دقت یا حساسیت دستگاه درجه‌بندی شده است.

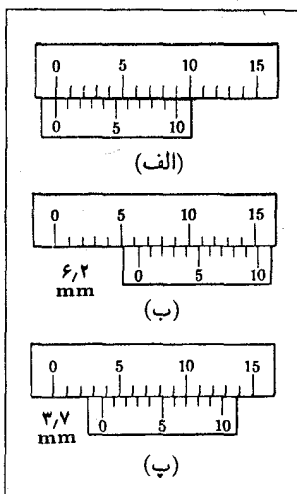
اگر  $n = 10$  باشد یعنی ۹ میلیمتر، به ۱۰ قسمت مساوی تقسیم شده باشد  $\frac{1}{n} = 0.1$  میلیمتر است.  $\frac{1}{n} = 0.05$  اگر  $n = 20$  باشد یعنی ۱۹ میلیمتر، به ۲۰ قسمت مساوی تقسیم شده باشد  $\frac{1}{n} = 0.02$  میلیمتر است.

اگر  $n = 50$  باشد یعنی ۴۹ میلیمتر، به ۵۰ قسمت مساوی تقسیم شده باشد  $\frac{1}{n} = 0.02$  میلیمتر است.

وقتی که پاشنه‌ها به هم بچسبند طرفین شاخکها در یک امتداد قرار می‌گیرند و تیغه عمق سنج کاملاً در پشت خطکش ثابت و صفر ورنیه درست زیر صفر خطکش ثابت واقع می‌شود.

برای اندازه‌گیری کمیت مورد لزوم، اگر قطر خارجی مورد نظر باشد جسم را بین دو پاشنه و اگر منظور قطر داخلی باشد آن را بین دو شاخک قرار می‌دهیم و قسمت متحرک را آن قدر حرکت می‌دهیم تا شاخکها یا پاشنه‌ها کاملاً بر طرفین جسم مماس باشند. اگر بخواهیم عمق حفره را اندازه بگیریم تیغه را داخل آن می‌گذاریم و با حرکت قسمت متحرک تیغه را به جلو می‌رانیم تا کاملاً به ته حفره بچسبد. حال اگر صفر ورنیه در مقابل یکی از درجه‌های خطکش قرار گیرد، اندازه دقیق کمیت از روی خطکش خوانده می‌شود. ولی اگر صفر ورنیه از مقابل یکی از درجه‌ها رد شده ولی به درجه بعدی نرسیده باشد باید دید چه درجه‌ای از ورنیه با یکی از درجه‌های خطکش در مقابل هم قرار گرفته‌اند. فرض می‌کنیم صفر ورنیه از  $p$  میلیمتر گذشته باشد و درجه  $q$  آن با یکی از درجات خطکش میلیمتری در یک امتداد قرار گیرد در این صورت اندازه کمیت  $p + q \cdot \frac{1}{n}$  میلیمتر است.

در شکل ۲-۲ (الف) حساسیت ورنیه کولیس ۰/۱ میلیمتر است. در (ب) جسمی اندازه‌گیری شده است که طول کمیت آن از ۶ میلیمتر گذشته است. صفر ورنیه بین ۶ و ۷ میلیمتر قرار دارد و درجه ۲ ورنیه بر یکی از درجه‌های خطکش میلیمتری منطبق شده است. بنابراین



شکل ۲-۲

$$p + q \cdot \frac{1}{n} = 6 + 2 \times 0.1 = 6.2 \text{ mm}$$

در (ب)

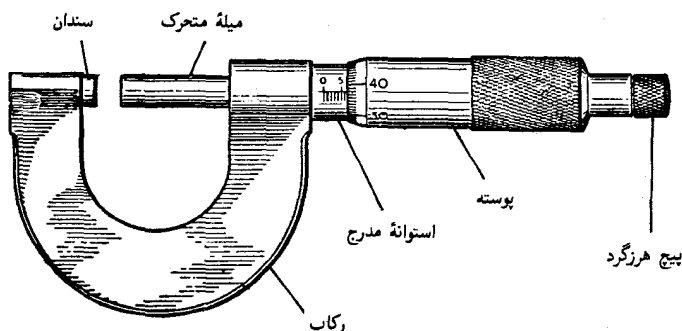
$$p + q \cdot \frac{1}{n} = 3 + 7 \times 0.1 = 3.7 \text{ mm}$$

در کولیسه‌های اینجی، دقت اندازه‌گیری  $\frac{1}{64}$  و  $\frac{1}{128}$  اینچ است. در بعضی از کولیسه‌ها روی خطکش ورنیه  $\frac{7}{8}$  اینچ را به ۸ قسمت مساوی تقسیم کرده‌اند. بنابراین هر درجه ورنیه  $\frac{7}{64} = \frac{1}{8}$  اینچ و تفاوت درجات پایین و بالا با یکدیگر  $\frac{1}{64} - \frac{7}{64} = \frac{1}{8}$  اینچ است. اگر خطی از  $\frac{2}{8}$  گذشته و به  $\frac{3}{8}$  نرسیده باشد و درجه پنجم ورنیه با یکی از درجه‌های خطکش مقابل هم باشند اندازه جسم  $\frac{21}{64} = \frac{3}{8} + \frac{5}{64}$  اینچ است.

اگر در خطکش ورنیه  $\frac{7}{16}$  اینچ را به ۸ قسمت مساوی تقسیم کرده باشند درجه‌های ورنیه  $\frac{7}{128} = \frac{1}{16}$  و تفاوت درجه‌های آن با درجه‌های اصلی  $\frac{1}{128} - \frac{7}{128} = \frac{1}{16}$  است. حال اگر اندازه جسمی از  $\frac{4}{16}$  گذشته و به  $\frac{5}{16}$  نرسیده باشد و درجه سوم ورنیه منطبق بر یکی از درجه‌های اصلی خطکش باشد طول جسم  $\frac{35}{128} = \frac{4}{16} + \frac{3}{128}$  است.

ریزنسج یا میکرومتر - وسیله‌ای است که با استفاده از خاصیت پیچ ساخته شده است و می‌تواند قطر سیمها یا ضخامت صفحات نازک را با دقت خیلی زیادی اندازه‌گیری کند. به‌طوری‌که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است ریزنسج از اجزای زیر تشکیل شده است.

قسمت ثابت یک رکاب فلزی است که به یک طرف سندان کوچکی نصب شده است و در طرف دیگر آن استوانه مدرجی است که روی آن با تقسیم‌بندیهای  $0.5^\circ$  و یک میلیمتری درجه‌بندی شده است. قسمت متحرک، یک پوسته استوانه‌ای است که محیط آن به  $50^\circ$  یا  $100^\circ$  قسمت مساوی تقسیم



شکل ۳-۲

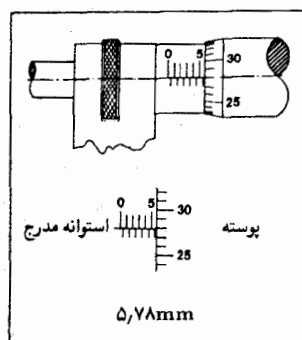
شده است. این استوانه توسط پیچی که در میان آن قرار دارد می‌تواند روی استوانه ثابت حرکت رفت و برگشت داشته باشد. گام این پیچ نیم یا یک میلیمتر است و هر دوری که پوسته بزند به اندازه گام پیچ یعنی نیم یا یک میلیمتر جلو یا عقب می‌رود، و میله‌ای که به پیچ وصل است به همان اندازه از سندان فاصله می‌گیرد.

در ریزسنجهایی که گام پیچ یک میلیمتر است دور پوسته به  $100^\circ$  قسمت تقسیم شده که هر قسمت نماینده  $\frac{1}{100}$  میلیمتر است. در ریزسنجهایی که گام پیچ  $0.5^\circ$  میلیمتر است دور پوسته به  $50^\circ$  قسمت تقسیم شده است. چون  $\frac{1}{50}$  از  $0.5^\circ$  میلیمتر  $\frac{1}{100}$  میلیمتر است، دقت اندازه‌گیری هر دو نوع یکسان و برابر  $0.01^\circ$  میلیمتر خواهد بود.

در انتهای پوسته یک پیچ هرزگرد وجود دارد که به پوسته وصل است. موقع اندازه‌گیری اگر نیروی وارد شده از حد مجاز بیشتر شود این قسمت آزاد و از فشردگی بیشتر پیچ جلوگیری می‌شود. همیشه وقتی که میله متحرک به سندان چسبیده است و فاصله‌ای بین آنها وجود ندارد درجه صفر پوسته روی صفر استوانه قرار می‌گیرد. در صورتی که این تنظیم به هم بخورد با مهره تنظیم پوسته می‌توان ریزسنج را اصلاح کرد.

برای اندازه‌گیری ضخامت جسم آن را بین سندان و میله متحرک (زبان) قرار می‌دهند و پیچ هرزگرد را آن قدر می‌پیچانند تا میله و سندان کاملاً به طرفین جسم بچسبند و هرزگرد آزاد شود. مقداری که استوانه از پوسته خارج شده است بر حسب میلیمتر خوانده می‌شود. اگر درجه صفر پوسته در مقابل درجه میلیمتری (که در امتداد محور طولی استوانه کشیده شده و تقسیم بندیهای میلیمتری و نیم میلیمتری را نشان می‌دهد) نباشد درجه‌های پوسته که هر کدام  $\frac{1}{100}$  میلیمتر است با تقسیمهای میلیمتری جمع می‌شود.

به عنوان مثال در شکل ۲-۴ درجه میلیمتری بیشتر از  $5.5$  میلیمتر را نشان می‌دهد. چون درجه ۲۸ پوسته مقابل خط تقسیم قرار دارد، به آن اضافه می‌شود و مقدار اندازه‌گیری شده  $5.78$  میلیمتر خواهد بود.



شکل ۲-۴

گوی سنج یا اسفرومتر - وسیله‌ای است برای اندازه‌گیری شعاع کره که از آن در آزمایشگاهها برای اندازه‌گیری شعاع انحناى سطوح کروی نظیر آینه‌ها و عدسیها استفاده می‌کنند. ضمناً ضخامت تیغه‌هایی که سطوح آنها صاف و موازی باشند نیز با گوی سنج قابل اندازه‌گیری است.

گوی سنج مطابق شکل ۲-۵ تشکیل شده است از ۴ پایه که ۳ پایه آن ثابت و با یکدیگر تشکیل مثلث متساوی‌الاضلاع را می‌دهند. پایه چهارم مربوط به پیچی است که گام آن نیم میلیمتر و صفحه مدور مدرجی که محیط آن معمولاً به  $50^\circ$  قسمت مساوی تقسیم شده است به آن متصل است. در

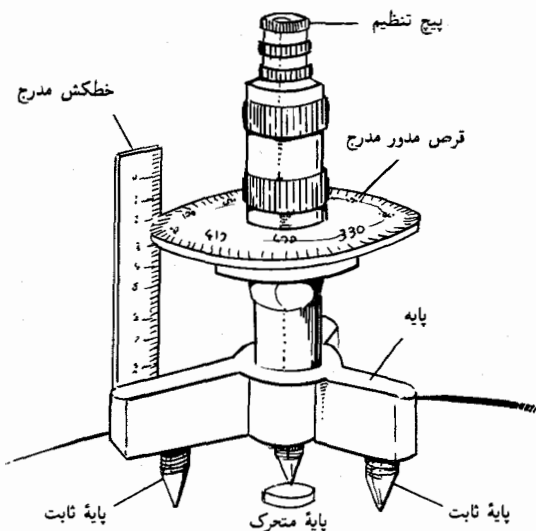
بالای پیچ، دگمه‌ای وجود دارد که با پیچاندن آن، پیچ تغییر مکان می‌یابد و صفحه مدور را در مقابل تیغه مدرجی بالا و پایین می‌برد.

موقعی که نوک پیچ و سه پایه روی یک سطح قرار دارند صفر صفحه، مقابل صفر تیغه قرار دارد. اگر پیچ یک دور بزند صفحه مدرج به اندازه نیم میلیمتر جابه‌جا می‌شود. چون صفحه به  $50^\circ$  قسمت تقسیم شده است هر درجه آن  $\frac{1}{1000}$  میلیمتر خواهد بود.

در بعضی از گوی‌سنجها، تیغه در طرفین صفر، مدرج شده است و صفحه مدرج نیز دو ردیف درجه‌بندی دارد که یکی مربوط به درجه‌های بالای صفر و دیگری مربوط به درجه‌های پایین صفر است. موقعی که پیچ می‌چرخد و بالا می‌رود، ردیفی که درجه‌هایش افزایش می‌یابد مربوط به درجه‌های بالای صفر تیغه است و ردیف دیگر مربوط به درجه‌های زیر صفر خواهد بود. با این نوع گوی‌سنجها، شعاع انحنای برآمدگیها و فرورفتگیها را می‌توان اندازه گرفت.

برای اندازه‌گیری ضخامت یک تیغه یا سهم یک عرقچین، پس از آنکه پیچ را به اندازه کافی بالا بردید، آن را تا حدی پایین بیاورید که نوک آن با صفحه بالایی تیغه مماس شود. مجموع تقسیمهای جابه‌جا شده خطکش میلیتری (a) و درجه‌های صفحه مدرج (b) ضخامت تیغه است که به صورت 
$$h = \left(a + \frac{b}{1000}\right) \text{mm}$$
 نوشته می‌شود.

گوی‌سنجی که در حال حاضر به کار می‌زنند، بدنه ریزسنجی است که استوانه مدرج آن به صفحه مدوری وصل است و سه پایه ثابت به صفحه متصل است. زبانه ریزسنج به عنوان پایه متحرک در وسط سه پایه ثابت قرار دارد. لذا دقت آن  $0.01^\circ$  میلیمتر است. برای اندازه‌گیری ضخامت تیغه، پایه‌های





ثابت را روی سطح صافی قرار می‌دهیم و پایه وسط را به بالای تیغه می‌چسبانیم و درجه ریزسنج را یادداشت می‌کنیم. سپس تیغه را برمی‌داریم و پایه متحرک را پایین می‌آوریم تا با سطح صاف تماس پیدا کند. دوباره درجه میکرومتر را یادداشت می‌کنیم. تفاوت این دو درجه ضخامت تیغه است.

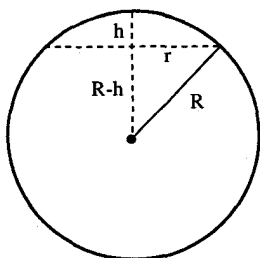
برای اندازه‌گیری سهم عرقچین کروی، دستگاه را روی سطح کروی و سپس روی سطح تخت قرار می‌دهیم و تفاضل آنها را پیدا می‌کنیم. با توجه به شکل ۲-۶ می‌توان نوشت

$$(R - h)^2 + r^2 = R^2$$

$$2Rh = h^2 + r^2 \quad \text{یا}$$

$$R = \frac{h^2 + r^2}{2h} \quad \text{بنابراین}$$

مقدار  $r = \frac{AB}{\sqrt{3}}$  است که در آن فاصله دو پایه ثابت است.



شکل ۲-۶

آزمایش الف) انواع کولیسهایی که در اختیار دارید مورد بررسی قرار دهید و حساسیت هرکدام را پیدا کنید. پیچی که قسمت متحرک را ثابت می‌کند باز کنید تا قسمت متحرک به راحتی جابه‌جا شود. قطر داخلی، خارجی، طول و عمق جسمی را که در اختیار دارید اندازه بگیرید و جدول زیر را پر کنید. برای اندازه‌گیری از کولیسهایی مختلف استفاده کنید.

طول	عمق	قطر خارجی	قطر داخلی	میزان دقت

آزمایش ب) ریزسنجی را که در اختیار دارید به دقت باز کنید و حساسیت آن را معلوم کنید. تعداد درجه‌های دور غلاف (پوسته) و بدنه استوانه را بررسی کنید. با پیچاندن پیچ هرزگرد، زبانه را به سندان بچسبانید، به طوری که پیچ هرزگرد در ضمن گردش آزاد شود. در این موقع اگر صفر پوسته بر صفر استوانه مدرج منطبق نباشد، درجه مربوطه را یادداشت و مقدار آن را در اندازه‌گیری منظور کنید. قطر ساچمه‌های داده شده را با کولیس و ریزسنج اندازه بگیرید و نتایج را با هم مقایسه کنید.

قطر ساچمه (۳)	قطر ساچمه (۲)	قطر ساچمه (۱)	نوع وسیله اندازه‌گیری
			با ریزسنج
			با کولیس

آزمایش پ) قطر کتابی را با کولیس اندازه بگیرید و نتیجه را بر تعداد ورقهای کتاب تقسیم کنید تا ضخامت یک ورق به دست آید. سپس ضخامت یک ورق را با ریزسنج اندازه گیری کنید. مقادیر به دست آمده را با یکدیگر مقایسه کنید.

آزمایش ت) یک عرقچین کروی در اختیار دارید سهم آن را در سطوح کاو (مقعر) و کوژ (محدب) با گوی سنج اندازه گیری کنید. شعاع دایره محیطی مثلثی را که توسط سه پایه ثابت به دست می آید پیدا کنید. با استفاده از فرمول  $R = \frac{h^2 + r^2}{2h}$  شعاع انحنای هریک از سطوح کاو و کوژ را محاسبه کنید.

شعاع انحنا R	r شعاع دایره محیطی	درجه گوی سنج روی سطح تخت	درجه گوی سنج روی سطح کروی	نوع سطح
				کوژ
				کاو

ترازو- اسبابی است که جرم اجسام را با مقایسه وزن آنها با وزنه های معلوم، تعیین می کند. در ساختمان آن از خاصیت اهرمها استفاده شده است. دو طرف میله ای به نام شاهین، مربوط به دو کفه و وسط شاهین تکیه گاه است. عقربه ای در مقابل صفحه مدرجی حرکت می کند و میزان انحراف شاهین را نشان می دهد.

ترازو موقعی در حال تعادل است که عقربه در مقابل صفر صفحه مدرج قرار گیرد. در ترازوهای حساس، پیدا کردن نقطه ایست ترازو مشکل است. برای سرعت عمل، نباید صبر کرد تا نوسانهای عقربه تمام شود، همچنین نباید عقربه را متوقف کرد. وضعیت نقطه ایست را نسبت به درجه صفر صفحه مدرج در ضمن نوسان عقربه به روش زیر می توان به دست آورد.

موقع نوسان عقربه، سه نقطه انتهایی پی در پی آنرا یادداشت می کنیم. فرض می کنیم در یکطرف به اندازه  $d_1$  و در طرف دیگر به اندازه  $d_2$  و همجهت با  $d_1$  به اندازه  $d_3$  منحرف شود.  $d_1$  و  $d_2$  را مثبت و  $d_3$  را منفی منظور می کنیم.  $d'$  میانگین  $d_1$  و  $d_2$  را به دست می آوریم. میانگین  $d'$  و  $d_3$  نقطه ایست ترازو است.

میزان انحراف را نسبت به مقدار عامل به وجود آورنده انحراف حساسیت گویند. اگر در ترازویی وزنه کوچک  $m$  عقربه را به اندازه  $\alpha$  منحرف کند، حساسیت ترازو است  $\frac{\alpha}{m}$ . برای اندازه گیری حساسیت ترازو موقعی که کفه ها خالی اند  $\alpha$  جای ایست عقربه را به دست می آوریم و سپس وزنه  $m$  را در یکی از کفه ها می گذاریم و  $\alpha$  جای ایست جدید را تعیین می کنیم. حساسیت از رابطه  $S = \frac{\alpha - \alpha_0}{m}$  محاسبه می شود.

برای تعیین جرم اجسام به یکی از روشهای زیر عمل می کنیم.

۱- در یکی از کفه ها جسم و در کفه دیگر آن قدر وزنه می گذاریم تا عقربه به جای ایست اول

خود برسد. مقدار وزنه نشان دهندهٔ جرم جسم است. برای دقت بیشتر، در ترازویی که  $\alpha$  جای ایست عقربه با کفه‌های خالی است، جسم را در یک کفه و وزنه را در کفهٔ دیگر می‌گذاریم تا عقربه به جای ایست برسد.  $\alpha$  جای ایست را پیدا می‌کنیم. سربار  $m$  را به کفهٔ وزنه اضافه می‌کنیم و  $\alpha_1$  جای ایست را به دست می‌آوریم. وزنه  $m'$  که باید به کفه اضافه شود تا عقربه به جای اول خود  $\alpha$  برسد مساوی است با

$$m' = m \frac{\alpha - \alpha_1}{\alpha_1 - \alpha}$$

۲- در یکی از دو کفه مقداری برادهٔ فلز و در کفهٔ دیگر جسم مورد نظر را قرار می‌دهیم. آن قدر وزنه، به کفهٔ مربوط به جسم اضافه می‌کنیم تا تعادل برقرار شود. نقطهٔ ایست ترازو را به دست می‌آوریم. سپس جسم را برمی‌داریم و به جای آن وزنه می‌گذاریم تا نقطهٔ ایست ترازو به جای اولیه برسد. جرم جسم برابر وزنهٔ جانشین آن است. این روش را روش بوردا گویند.

۳- در یک کفه جسم مورد نظر و در کفهٔ دیگر وزنه می‌گذاریم تا تعادل برقرار شود نقطهٔ ایست را به دست می‌آوریم. بعد جای آن دو را باهم عوض می‌کنیم و مقدار وزنه را تغییر می‌دهیم تا دوباره تعادل برقرار شود. اگر مقدارهای وزنه در دو حالت  $M_1$  و  $M_2$  باشد جرم برابر است با  $m = \sqrt{M_1 M_2}$  این روش را روش گوس گویند.

آزمایش ث) اجسامی به جرمهای  $M_1$  و  $M_2$  و  $M_3$  را در کفه راست و وزنه‌های مناسب را در کفه چپ ترازو قرار دهید و هر بار میزان انحرافها را پیدا و در جدول زیر یادداشت کنید و جای ایست ترازو را برای هر کدام به دست آورید.

M	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d' = \frac{d_1 + d_2}{2}$	$d = \frac{d' + d_3}{2}$

آزمایش ج) جرم سکه‌های مختلف را با روشهای گوناگون پیدا کنید و هر بار میانگین آنها را که جرم حقیقی سکه است به دست آورید. نتایج را در جدول زیر یادداشت کنید.

جرم حقیقی	توزین به روش گوس	توزین به روش بوردا	توزین ساده	نوع سکه

## پرسشها

۱- چرا اندازه‌گیری یک کمیت را چندبار تکرار می‌کنند؟

۲- ثابت کنید که شعاع انحنای یک سطح کروی از فرمول  $R = \frac{r^2 + h^2}{2h}$  به دست می‌آید.

۳- آیا می‌توانید با ریزسنج طولی را برحسب اینج به دست آورید؟

۴- ثابت کنید که شعاع دایره محیطی مثلث متساوی‌الاضلاع و طول یکی از اضلاع آن با رابطه

$$r = \frac{AB}{\sqrt{3}}$$

به هم مربوطند.

۵- چگالی اجسام، در توزین آنها ایجاد خطا می‌کند یا نه؟ چرا؟

## آزمایش ۲ = چگالی

### مقدمه

جرم واحد حجم هر جسم، جرم حجمی یا جرم مخصوص نام دارد. واحدهای آن  $\text{kg/m}^3$  و  $\text{g/cm}^3$  است.

وزن واحد حجم هر جسم، وزن مخصوص آن جسم است که برابر حاصل ضرب جرم مخصوص جسم در شتاب ثقل محل (g) است. واحد وزن مخصوص در دستگاههای مختلف  $\text{N/m}^3$  و  $\text{dyne/cm}^3$  و  $\text{slug/ft}^3$  است.

نسبت جرم یا وزن دو جسم هم حجم را چگالی آن دو جسم نسبت به یکدیگر گویند. چگالی جامدات و مایعات را نسبت به آب و چگالی گازها را نسبت به هوا می‌سنجند. چگالی چون نسبت است واحد و بعد (دیمانسیون) ندارد.

نظر به اینکه چگالی هر گاز نسبت به هوا، برابر خارج قسمت وزن حجم معینی از گاز به وزن هوای هم حجم آن در شرایط مساوی از لحاظ دما و فشار است و یک ملکول گرم تمام گازها در شرایط متعارفی  $22.4$  لیتر حجم دارند در مورد هوا  $29 \times 1.293 \times 22.4$  است. بنابراین خواهیم داشت  $d = \frac{M}{V}$ . در این رابطه d چگالی گاز نسبت به هوا و M جرم ملکولی گاز است.

هدف آزمایش: درک مفهوم جرم حجمی و چگالی و اندازه‌گیری چگالی جامدات و مایعات.

آزمایش الف) تعیین جرم مخصوص جامدات

وسایل آزمایش: ترازو - کولیس - ریزسنج - استوانه مدرج - آب - اجسام مختلف.

روش آزمایش: جرم نمونه‌های داده شده را با ترازو به دست آورید و سپس توسط کولیس و ریزسنج ابعاد آنها را تعیین و حجم آنها را محاسبه کنید. در مورد اجسامی که شکل معین هندسی ندارند برای تعیین حجم آنها، از استوانه مدرج استفاده کنید.

مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبات مربوط را در جدول زیر یادداشت کنید.

درصد خطا	جرم حجمی از روی جدول	جرم حجمی به دست آمده	حجم جسم	جرم جسم	نام جسم

آزمایش ب) تعیین چگالی با روش تُنگ

وسایل آزمایش: ترازو - آب مقطر - تنگ چگالی - مایع مورد نظر.

روش آزمایش: تنگ خالی را در ترازو قرار دهید و  $m_1$  جرم آن را به دست آورید. تنگ را تا نشانه پر از آب و  $m_2$  جرم آن را تعیین کنید و سپس تنگ را خالی و آن را با مایع مورد نظر پر کنید و جرم آن  $m_3$  را به دست آورید. از رابطه  $d = \frac{m_2 - m_1}{m_3 - m_1}$  چگالی مایع مورد نظر را به دست آورید.

$m_1$	$m_2$	$m_3$	$d$

### آزمایش پ) تعیین چگالی با استفاده از قانون ارشمیدس

وسایل آزمایش: ترازو- وزنه - قلاب - نخ - بشر- اجسام سنگینتر و سبکتر از آب و الکل. با توجه به قانون ارشمیدس و با استفاده از ترازوی هیدروستاتیک چگالی جسم به دست می‌آید. در این ترازو، به یکی از کفه‌ها چنگکی آویزان است و در پایین آن ظرف پر از آبی قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری چگالی جسم جامد سنگینتر از آب، آن را با نخ به چنگک آویزان و وزنش  $m_1$  را پیدا کنید. ظرف آب را زیر جسم طوری قرار دهید تا جسم کاملاً در آب غوطه‌ور شود. تعادل ترازو به هم می‌خورد. وزنه  $m_2$  را در ترازو بگذارید تا مجدداً تعادل برقرار شود. مطابق قانون ارشمیدس  $m_3$  برابر وزن آب هم حجم جسم است. بنابراین چگالی جسم برابر است با  $d = \frac{m_1}{m_3}$ .

برای اندازه‌گیری چگالی جسم سبکتر از آب ابتدا  $m_1$  وزن جسم را به دست آورید و سپس جسم و قطعه فلزی را دنبال هم به یکدیگر ببندید و به چنگک وصل کنید. ظرف آب را طوری قرار دهید که فقط فلز که در قسمت پایین است در آن غوطه‌ور شود.  $m_2$  مقدار وزن را در این حالت پیدا کنید و ظرف آب را بالاتر بیاورید تا فلز و جسم هردو در آب غوطه‌ور شوند. مقدار وزن  $m_3$  را به دست آورید.  $m_3 - m_2$  وزن آب هم حجم جسم است، لذا چگالی برابر است با

$$d = \frac{m_1}{m_3 - m_2}$$

برای اندازه‌گیری چگالی مایعات با استفاده از قانون ارشمیدس قطعه فلزی را وزن ( $m_1$ ) و سپس آن را در آب غوطه‌ور کنید. وزن در این حالت ( $m_2$ ) را به دست آورید. بار دیگر همان جسم را در مایع مورد نظر غوطه‌ور کنید. وزن در این حالت ( $m_3$ ) را به دست آورید.  $m_1 - m_2$  وزن مایع هم حجم جسم و  $m_1 - m_3$  وزن آب هم حجم است. بنابراین، چگالی مایع

$$d = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3}$$

جدول ۱. برای اجسام سنگینتر از آب

$m_1$ وزن جسم	$m_r$ مقدار سبک شده	$d = \frac{m_1}{m_r}$

جدول ۲. برای اجسام سبکتر از آب

$m_1$	$m_r$	$m_r - m_1$	$d = \frac{m_1}{m_r - m_r}$

جدول ۳. برای مایعات

$m_1$	$m_r$	$m_r$	$d = \frac{m_1 - m_r}{m_1 - m_r}$

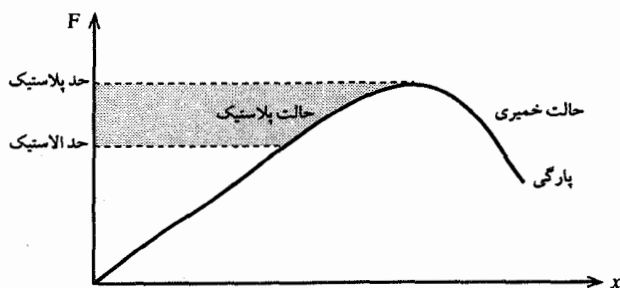
پرسشها

- ۱- در اندازه‌گیری حجم مفتولها کدام بعد باید با دقت بیشتری اندازه‌گیری شود؟
- ۲- چرا در روش تنگ  $m_r - m_1$  حجم تنگ است؟
- ۳- چرا در روش تنگ باید دمای آب و مایع مورد نظر یکسان باشد؟

## آزمایش ۳ بررسی قانون هوک در فنر و حرکت نوسانی فنر

### مقدمه

هرگاه نیرویی به انتهای فنری وارد شود، فنر ازدیاد طول می‌یابد و این ازدیاد طول اگر از حد کشسانی (الاستیک) فنر تجاوز نکند، متناسب با نیروی وارده است. اگر نیرو از این حد تجاوز کند دیگر تغییرات نیرو برحسب ازدیاد طول خطی نیست و به صورت یک منحنی است (شکل ۲-۷). در این حالت اگر نیرو حذف شود، دیگر جسم به حالت اولیه برنمی‌گردد، بلکه تغییر طول می‌دهد. در این حالت جسم را پلاستیک گویند. اگر نیرو از این حد هم تجاوز کند، حالت خمیری به وجود می‌آید که جسم مثل خمیر کشیده و سپس پاره می‌شود.



شکل ۲-۷

مطابق قانون هوک، مقدار نیرویی که باعث ازدیاد طول فنر می‌شود از رابطه زیر به دست می‌آید

$$F = -kx \quad (۱)$$

علامت منها به خاطر آن است که نیروی وارده در خلاف جهت افزایش طول است و می‌خواهد جسم را به حال تعادل برگرداند.

$k$  را ضریب سختی یا ثابت فنر گویند و برای هر فنر مقدار ثابتی است و به طور عددی برابر مقدار نیرویی است که به ازای آن طول فنر به اندازه واحد طول افزایش یابد.

مطابق شکل ۲-۸ وزنه‌ای به فنر آویزان شده است و فنر از نقطه  $O$  تا نقطه  $O'$  پایین آمده است. اگر نیرویی فنر و وزنه متصل به آن را به اندازه  $x$  پایین آورد و رها سازد، نیروی بازگرداننده  $F$  در فنر با شتابی برابر  $a$  وزنه را به طرف بالا می‌کشد و فنر بعد از آن دارای حرکت نوسانی خواهد شد.

چون  $F = ma$ ، با توجه به رابطه (۱) می‌توان نوشت  $ma = -kx$  یا

$$a = -\frac{kx}{m} \quad (۲)$$

برای به دست آوردن زمان نوسان فنر، از معادله حرکت نوسانی ساده که به صورت  $x = R \sin \omega t$  است



نسبت به زمان مشتق دوم می‌گیریم و مقدار شتاب را پیدا می‌کنیم

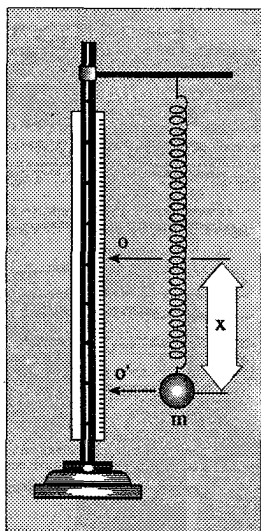
$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2}{dt^2}(R \sin \omega t) = -\omega^2 x \quad (3)$$

از تساوی روابط (۲) و (۳) نتیجه می‌شود  $-\omega^2 x = -\frac{kx}{m}$  یا  $\omega^2 = \frac{k}{m}$ . چون  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  بنابراین

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{2\pi}{T}$$

در نتیجه

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4)$$



شکل ۸-۲

هدف آزمایش: بررسی قانون هوک و مفهوم جرم مؤثر فنر - تعیین ثابت فنر توسط آن - تعیین ثابت فنر با استفاده از حرکت نوسانی فنر، به هم بستن فنرها به‌طور متوالی و موازی.

وسایل آزمایش: پایه و گیره - دو عدد فنر - کفه - زمانسنج - وزنه‌های مختلف.

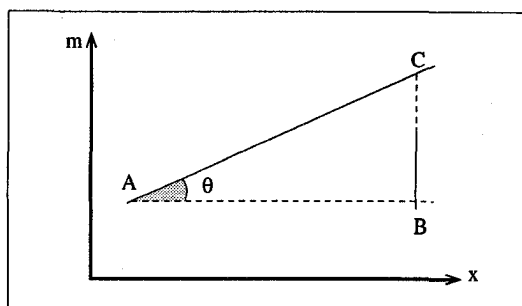
الف) به‌دست آوردن مقدار ثابت فنر از راه ازدیاد طول

طبق قانون هوک  $F = kx$  یا  $mg = kx$ . هرگاه به‌ازای مقادیر مختلف  $m$  و  $x$  منحنی تغییرات نسبت به  $x$  را رسم کنیم (شکل ۲-۹)، این منحنی به‌صورت خطی خواهد بود که از مبدأ مختصات می‌گذرد. شیب این خط برابرست با

$$\tan \theta = \frac{BC}{AC} = \frac{m}{x}$$

$$k = \frac{m}{x} g = \tan \theta \cdot g$$

در نتیجه



شکل ۹-۲

روش آزمایش: فنر را به قلاب طوری آویزان کنید تا کاملاً در امتداد قائم موازی پایه قرار گیرد. سپس نشانه را به انتهای فنر وصل کنید تا نوک آن به صورت افقی در مقابل درجه‌های خط‌کش باشد. عددی را که خط‌کش نشان می‌دهد بخوانید.

وزنه  $50^\circ$  گرمی را در کفه بگذارید و ازدیاد طول  $x$  را یادداشت کنید. آزمایش را ادامه دهید و هر بار  $50^\circ$  گرم اضافه کنید و ازدیاد طول را به دست آورید.

نتایج حاصل را در جدول زیر یادداشت کنید. برای هر کدام مقدار  $k$  را محاسبه کنید و میانگین آنها را به دست آورید و با مقداری که از روی نمودار پیدا کرده‌اید مقایسه کنید.

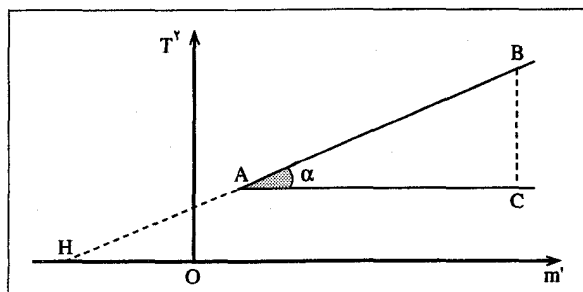
ترتیب آزمایش	m	x	$F = mg$	k
میانگین				

ب) تعیین  $k$  با استفاده از حرکت نوسانی فنر

رابطه (۴) را می‌توان به صورت  $\frac{T^2}{m} = \frac{4\pi^2}{k}$  نوشت که در آن  $m = m' + fm_g$  است.  $m'$  جرم وزنه آویخته شده و  $m_g$  جرم فنر و  $f$  ضریب نسبی جرم فنر و تقریباً مساوی  $\frac{1}{3}$  است. اگر وزنه مستقیماً به فنر آویخته نشده و داخل کفه گذاشته شود  $m'$  علاوه بر وزنه آویخته شده شامل وزن کفه نیز خواهد بود. اگر منحنی تغییرات  $T^2$  بر حسب  $m'$  وزنه‌های آویزان شده به فنر را رسم کنید به صورت خط

مستقیم خواهد بود (شکل ۲ - ۱۰). شیب خط  $\tan \alpha = \frac{T^2}{m'}$  است لذا

$$\tan \alpha = \frac{4\pi^2}{k}$$



شکل ۲-۱۰

با اندازه‌گیری شیب خط می‌توان مقدار  $k$  را از رابطه زیر به دست آورد

$$k = \frac{4\pi^2}{\tan \alpha} \quad (5)$$

روش آزمایش: وزنه‌ای را به فنر آویزان کنید. آن را قدری به طرف پایین بکشید و به آرامی رها سازید. دقت کنید تا نوسانهای فنر در امتداد قائم باشد. زمان  $30^\circ$  نوسان را با زمانسنج به دست آورید و از روی  $T$  زمان یک نوسان کامل یا دوره حرکت را پیدا کنید. این عمل را با وزنه‌های مختلف انجام دهید و جدول زیر را کامل کنید.

ترتیب آزمایش	m	t	$T = \frac{t}{n}$	$T^2$

منحنی نمایش تغییرات  $T^2$  بر حسب  $m$  را رسم کنید و شیب خط را پیدا کنید و با توجه به رابطه (5) مقدار  $k$  را به دست آورید.

(ج) تعیین جرم مؤثر فنر و ضریب نسبی جرم فنر  
رابطه (۴) را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{m}{k}$$

این رابطه نشان می‌دهد که وقتی  $T^2$  صفر شود  $m = 0$  خواهد بود. بنابراین  $m' + fm_g = 0$  و در نتیجه  $m' = -fm_g$  است.

در نمودار آزمایش قبل خط را امتداد دهید تا محور  $m$  ها را در نقطه  $H$  قطع کند. فاصله منفی روی محور جرمها برابر  $fm_g$  یعنی جرم مؤثر فنر است. با توزین فنر و به دست آوردن  $m_g$  یعنی جرم آن مقدار  $f$  را محاسبه کنید.

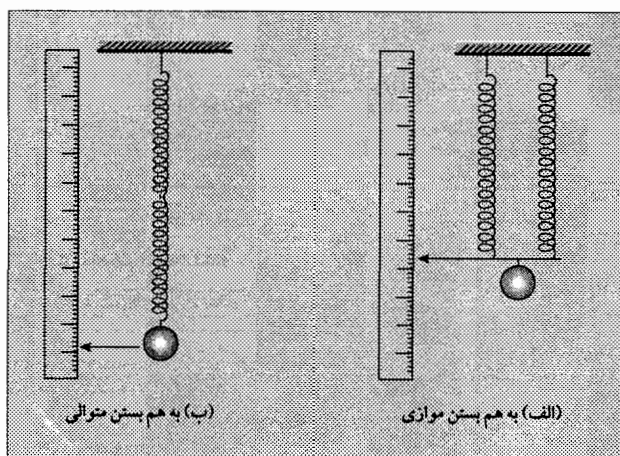
(د) به هم بستن فنرها

موقعی که دو فنر را به طور متوالی یا موازی به هم ببندیم روابط زیر بین آنها برقرار است

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad \text{و} \quad T^2 = T_1^2 + T_2^2 \quad \text{در مورد متوالی}$$

$$k = k_1 + k_2 \quad \text{و} \quad \frac{1}{T^2} = \frac{1}{T_1^2} + \frac{1}{T_2^2} \quad \text{در مورد موازی}$$

روش آزمایش: دوره و ضریب سختی فنر را با آویختن وزنه و شمردن نوسانها و تعیین دوره، برای دو فنر به طور جداگانه به دست آورید. فنرها را مطابق شکل ۲ - ۱۱، یک بار به طور متوالی و بار دیگر به طور موازی به هم ببندید و در هر مورد دوره و ضریب سختی مجموع فنرها را پیدا کنید.



شکل ۲-۱۱

نتایج به دست آمده را در جدول زیر یادداشت کنید و روابطی را که بین دوره و ضریب سختیهای فنر موجود است تحقیق کنید.

ضریب سختی فنر $k = 4\pi^2 \frac{m}{T^2}$	دوره $T = \frac{t}{n}$	زمان نوسانها $t$	جرم $m$	فنرها
				فنر اول
				فنر دوم
				به طور متوالی
				به طور موازی

### پرسشها

- چند نوع حرکت ارتعاشی را مثال بزنید.
- به چند طریق می توان مقدار  $k$  را به دست آورد؟
- جرم حجمی اجسام جامد را چگونه می توان با فنر به دست آورد؟ جرم حجمی با ازدیاد طول فنر چه رابطه ای دارد؟
- رابطه ای را که ضریب سختی دو فنر به هم بسته شده با ضریب سختی تک تک فنرها دارد در دو حالت به هم بستن موازی و متوالی ثابت کنید.
- ثابت کنید که ضریب جرمی فنر  $\frac{1}{\rho}$  است.

# آزمایش ۴ سقوط آزاد اجسام

## مقدمه

مطابق قانون گرانش عمومی نیوتون دو جسم که در مجاورت یکدیگر قرار دارند به یکدیگر نیرویی وارد می‌کنند که مقدار آن از رابطه زیر به دست می‌آید، (شکل ۲-۱۲).

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

$m_1$  و  $m_2$  جرم دو جسم و  $d$  فاصله گرانیگاه آنها و  $F$  مقدار نیروی گرانش است.  $G$  را ثابت جهانی گرانش می‌گویند و در SI مقدار آن  $6.67 \times 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$  است. برای جسمی که در نزدیکی زمین قرار دارد می‌توان نوشت  $F = G \frac{Mm}{d^2}$  که  $m$  جرم جسم و  $M$  جرم کره زمین و  $d$  فاصله مرکز جسم تا مرکز زمین است، زیرا فرض بر این است که جرم اجسام تمام‌آدر گرانیگاه آنها متمرکز است و زمین کروی و گرانیگاه آن در مرکز آن است.  $d$  برابر شعاع زمین به علاوه فاصله مرکز جسم تا سطح زمین است. نظر به اینکه فاصله جسم تا زمین در مقابل شعاع کره زمین بسیار کوچک است با تقریب قابل قبولی خواهیم داشت

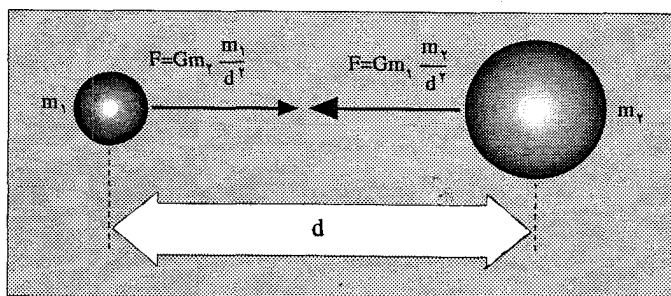
$$F = G \frac{Mm}{R^2}$$

چون جرم زمین خیلی زیاد است، به این سبب به جسم کوچک مادی، نیرویی وارد می‌کند و آن را به سمت خودش می‌کشد. با توجه به اصل اساسی دینامیک این نیرو برابر است با  $F = ma$  و در نتیجه

$$ma = G \frac{Mm}{R^2}$$

مقدار  $a$  موقعی که اجسام جذب زمین می‌شوند شتاب گرانی نام دارد و آن را با  $g$  نشان می‌دهند. بنابراین

$$g = G \frac{M}{R^2}$$



شکل ۲-۱۲

اگر جسمی آزادانه از ارتفاع  $h$  سقوط کند معادله حرکت آن به صورت زیر است

$$h = \frac{1}{2}gt^2$$

با در دست داشتن  $h$  ارتفاع و  $t$  زمان سقوط مقدار  $g$  شتاب گرانی را می‌توان به دست آورد

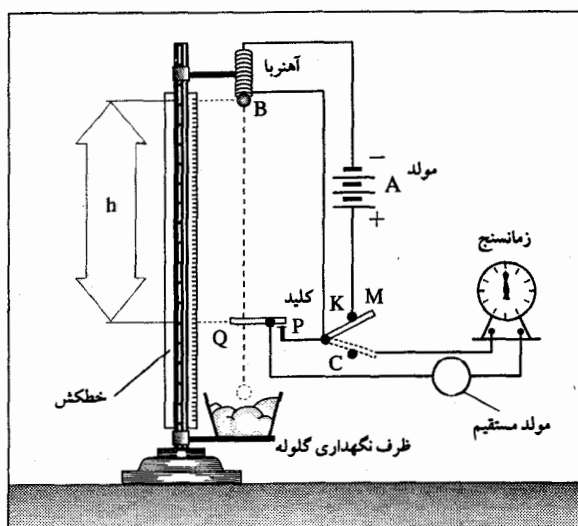
$$g = \frac{2h}{t^2}$$

هدف آزمایش: محاسبه شتاب گرانی در سقوط آزاد و بررسی قوانین سقوط آزاد.

وسایل آزمایش: دستگاه سقوط آزاد - زمانسنج الکترونیکی - منبع تغذیه - سیمهای رابط - گلوله آهنی.

شرح دستگاه: خطکش مدرجی روی میله‌ای به طول تقریبی یک متر در حالت قائم نصب شده است. در قسمت بالای میله، سیم‌پیچی قرار دارد که دارای هسته آهنی کوچکی است و با جریان ۶ ولتی آهنربا می‌شود. قدرت آهنربا تا اندازه‌ای است که می‌تواند گلوله کوچکی را نگهدارد، (شکل ۲-۱۳). با قطع جریان گلوله B می‌افتد و درست در آن زمان زمانسنج T شروع به کار می‌کند. گلوله پس از طی مسافت  $h$  به صفحه Q برخورد و مدار را قطع می‌کند و زمانسنج متوقف می‌شود.

روش آزمایش: جریان برق را برقرار کنید و گلوله B را در مقابل هسته سیم‌پیچ قرار دهید. فاصله قسمت پایین گلوله تا صفحه Q یعنی  $h$  را به دقت اندازه‌گیری کنید. برای تغییر  $h$  صفحه را بالا و پایین ببرید و در محلهای مشخصی قرار دهید. به ازای مقادیر مختلف  $h$  هنگام سقوط گلوله، زمان



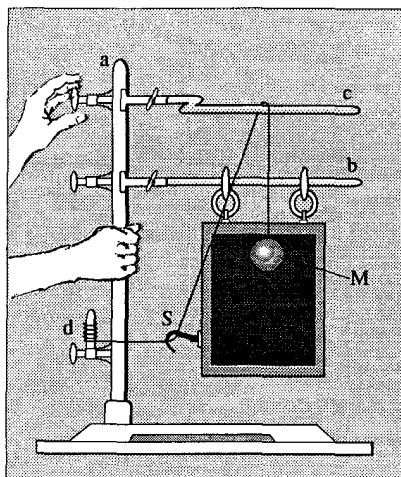
شکل ۲-۱۳

سقوط را توسط زمانسنج T به دست آورید. در هر ارتفاع چندین بار آزمایش کنید و میانگین زمانهایی را که زمانسنج نشان می‌دهد به دست آورید و جدول زیر را پر کنید.

ترتیب آزمایش	h	t	$t^2$	$g = \frac{2h}{t^2}$	میانگین	خطای آزمایش	
						نسبی	مطلق
۱							
۲							
۳							

نمودار تغییرات h بر حسب  $t^2$  را رسم کنید و از روی آن مقدار g را به دست آورید. آزمایش را برای فاصله  $h = 30 \text{ cm}$  انجام دهید و  $t_1$  زمان مربوط را به دست آورید. فاصله h را آن قدر تغییر دهید تا گلوله در زمان  $t_2 = 2t_1$  سقوط کند. فاصله طی شده با زمان چه رابطه‌ای دارد؟ چه نتیجه‌ای از این آزمایش می‌گیرید؟

وسایل آزمایش: دستگاه سقوط آزاد - کاغذ سفید - نخ - کبریت - کاربن - خطکش یا متر.  
 شرح دستگاه: میله قائم a بدنه دستگاه است که روی پایه‌ای قرار دارد. میله‌های b و c و d مطابق شکل ۲-۱۴ به میله قائم وصل شده‌اند. تخته‌ای به کلفتی ۱/۵ سانتیمتر و به عرض ۱۰ سانتیمتر و طول ۵۰ سانتیمتر آونگ مرکبی است که به میله افقی b آویزان است. تخته را می‌توان با تخته مشابه دیگری که طولش کمتر است عوض کرد. گلوله وزین M در سطح تعادل آونگ قرار دارد و نخ گلوله پس از عبور از روی میله c از قلاب S متصل به تخته می‌گذرد و به میله خمیده d بسته می‌شود. نخ را پس از عبور از قلاب قدری می‌کشند تا آونگ از وضع ترازمندی منحرف شود و با گلوله



M به میزان چند سانتیمتر فاصله پیدا کند. اگر نخ را بسوزانند گلوله سقوط و آونگ شروع به نوسان می‌کند. در وضعیت ترازمندی آونگ، هر دو به هم برخورد می‌کنند.

کاغذی روی تخته چسبیده است و اثر برخورد گلوله روی صفحه کاغذ به جا گذاشته می‌شود. فاصله بین وضع اول گلوله و اثر آن روی تخته ارتفاع سقوط و ربع دوره نوسان آونگ، زمان سقوط گلوله است.

روش آزمایش: قلاب آونگ مرکب را با نخ به میله خمیده وصل کنید و نخ را بسوزانید تا آونگ بدون سرعت اولیه نوسان کند. زمان ۲۵ نوسان آونگ را با زمان سنج به دست آورید و دوره نوسانها را محاسبه کنید.

یک صفحه کاربن روی یک صفحه کاغذ سفید بگذارید و هر دو را به تخته بچسبانید. گلوله را در بالای تخته در فاصله ۲۰ سانتیمتری از مرکز آن قرار دهید و نخ گلوله را پس از گذراندن از میله بالایی و قلاب S قدری بکشید تا آونگ منحرف شود و سپس نخ را به میله خمیده d ببندید.  $h_1$  فاصله گلوله تا سطح میز را اندازه بگیرید و نخ را از قسمت میانی پشت تخته بسوزانید تا دستگاه به حرکت در آید. هنگام برخورد آونگ با گلوله، نقطه برخورد به وسیله کاربن روی کاغذ سفید مشخص می‌شود.  $h_2$  فاصله این نقطه تا سطح میز را اندازه‌گیری کنید.  $h = h_1 - h_2$  ارتفاع سقوط است. تخته را عوض و همان آزمایش را تکرار کنید و g را با استفاده از معادلات زیر به دست آورید

$$\left. \begin{aligned} h &= Kt^2 \Rightarrow K = \frac{h}{t^2} \\ h' &= K't'^2 \Rightarrow K' = \frac{h'}{t'^2} \end{aligned} \right\} g = K + K'$$

اعداد به دست آمده از آزمایش و محاسبه را در جدول زیر یادداشت کنید.

h	$t = \frac{T}{4}$	K	h'	$t' = \frac{T'}{4}$	K'	g

## پرسشها

۱- مقدار g را از رابطه  $g = \frac{GM}{R^2}$  به دست آورید و میزان تغییرات g را نسبت به ارتفاع محاسبه

کنید؟

۲- چرا شتاب گرانی در نقاط مختلف زمین فرق می‌کند؟

۳- مقدار g در نتیجه تغییر عرض جغرافیایی چگونه تغییر می‌کند؟

۴- در صورتی که کاغذ تمام لگاریتمی به کار برید در  $t = 1$  خواهید داشت  $h = \frac{g}{4}$ . علت آن را

توضیح دهید.



## آزمایش ۵ ماشینهای ساده

### مقدمه

ماشینهای ساده وسایلی هستند که به وسیله آنها می توان کاری را که انجام آن ناممکن یا مشکل است، انجام داد. ماشینها برای غلبه بر مقاومتها به کار می روند و نیروی وارد به یک نقطه و جهت معینی را به نقاط و جهت های دیگر منتقل می کنند.

ماشینهای ساده به خودی خود کار تولید نمی کنند و کار را دریافت می دارند و بدون اینکه در مقدار کار تغییری حاصل شود، انجام آن را آسانتر می کنند. ماشینهای ساده در موارد زیر به کار می روند:

- ۱- جابه جا کردن وزنه های بزرگ با نیروی کمتر مانند بلند کردن اتومبیل توسط جک.
- ۲- استفاده از نیروی وارد در نقطه دیگر به طور متناسبت، مانند انبر در برداشتن زغال افروخته.
- ۳- جابه جا کردن اجسام در جهتی غیر از جهت نیروی وارد مانند بلند کردن مصالح ساختمانی توسط طناب و قرقره.

۴- تبدیل حرکت کند در یک نقطه به حرکت تند در نقطه دیگر مانند دوچرخه.

۵- تبدیل حرکت دورانی به حرکت انتقالی یا برعکس، مانند چرخ و محور.

**اصل بقای کار در ماشینها:** هنگامی که نیروی  $P$  به نام نیروی محرک به ماشین وارد می شود، ماشین به حرکت در می آید و کار انجام می گیرد. کاری را که ماشین دریافت می کند، کار محرک گویند. ماشین بر نیروی مقاوم  $W$  غلبه می کند و جسمی را به حرکت در می آورد و کار انجام می دهد. کاری را که ماشین انجام می دهد کار مقاوم گویند.

ممکن است با ماشین وزنه ای را جابه جا کنیم که مقدار وزن آن چندین برابر نیروی وارد باشد. بنابر اصل بقای انرژی، مقدار انرژی ای که وزنه کسب می کند نمی تواند بیشتر از مقدار انرژی ای باشد که توسط نیروی وارده تلف شده است. در نتیجه در یک ماشین آرمانی خواهیم داشت

$$\text{کار مقاوم} = \text{کار محرک}$$

اگر نیروی محرک  $P$  به ماشین وارد به اندازه  $d$  جابه جا شود، و در نتیجه ماشین وزنه  $W$  را به اندازه  $d_p$  جابه جا کند، بنا بر اصل بقای کار خواهیم داشت

$$Pd = W \cdot d_p$$

اگر  $W$  زیاد شود به همان نسبت  $d$  کمتر خواهد شد یا برعکس اگر  $W$  کمتر شود به همان نسبت  $d_p$  بیشتر خواهد شد.

نسبت نیروی مقاوم به نیروی محرک را مزیت مکانیکی و نسبت تغییر مکان نیروی مؤثر به جابه جایی

نیروی مقاوم را نسبت سرعت گویند. در یک ماشین آرمانی می‌توان نوشت

$$\frac{W}{P} = \frac{d_1}{d_r}$$

یعنی مزیت مکانیکی برابر نسبت سرعت است.

در ماشینهای واقعی، به علت اصطکاک که بین قطعات مختلف ماشین وجود دارد مقداری از انرژی تلف می‌شود. بنابراین مقدار کار محرک از کار مقاوم بیشتر است و این تفاوت برای غلبه بر نیروی اصطکاک به کار می‌رود. نسبت این دو مقدار که همیشه کوچکتر از واحد است بازده ماشین نامیده می‌شود

$$\text{بازده} = \frac{\text{کار مفیدی که توسط ماشین انجام شده است}}{\text{کل کاری که به ماشین داده شده است}}$$

$$R = \frac{W d_r}{P d_1} = \frac{W}{P} : \frac{d_1}{d_r} = \frac{\text{مزیت مکانیکی}}{\text{نسبت سرعت}}$$

هدف آزمایش: بررسی روابط حاکم بر ماشینهای ساده و گشتاور نیروها.

وسایل آزمایش: انواع قرقره‌ها - پایه با میله افقی - نخ - نیروسنج، کفه و وزنه‌های مختلف، چرخ و محور - خطکش مدرج - شاخص - قلاب - دیسک سوراخ دار با نخ و وزنه‌های مربوط.

آزمایش الف) محور قرقره ثابتی را به قلاب آویزان کنید. نخ را از قسمت بالای شیار عبور دهید و به یک طرف آن وزنه‌ای بیاویزید و به طرف دیگر نیروسنجی وصل کنید (شکل ۲ - ۱۵). نیروی  $F$  را که نیروسنج در هر یک از حالت‌های زیر نشان می‌دهد به دست آورید

۱- وزنه ساکن است. ( $F_1$ )

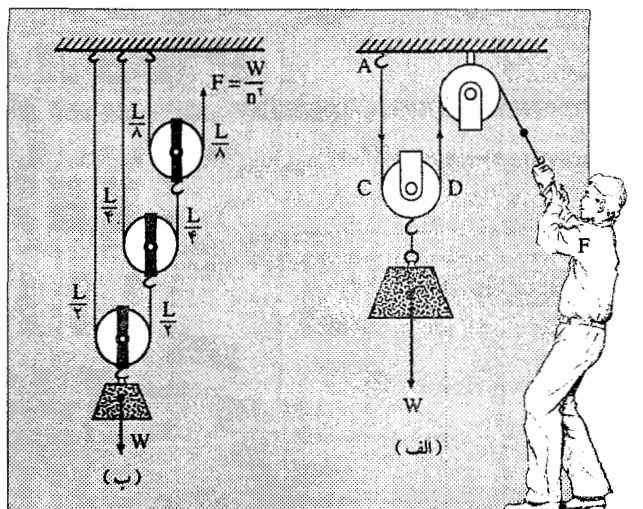
۲- وزنه با سرعت یکنواخت بالا می‌آید. ( $F_2$ )

۳- وزنه با سرعت یکنواخت پایین می‌آید. ( $F_3$ )

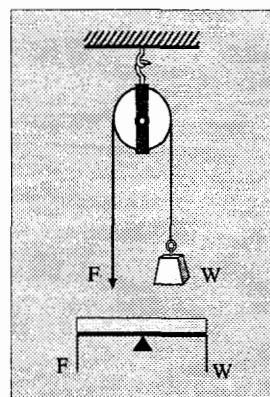
میانگین  $F_2$  و  $F_3$  را با عددی که نیروسنج نشان می‌دهد مقایسه کنید.

ترتیب آزمایش	$F_1$	$F_2$	$\frac{F_2 + F_3}{2}$	$F$

آزمایش ب) محور قرقره ثابت را به قلاب آویزان کنید و نخ را از قسمت بالای شیار آن بگذرانید. یک طرف نخ به نیروسنج متصل است. طرف دیگر از قسمت پایین قرقره متحرک می‌گذرد و از بالا به پایه افقی وصل می‌شود، (شکل ۲ - ۱۶ الف).



شکل ۱۶-۲



شکل ۱۵-۲

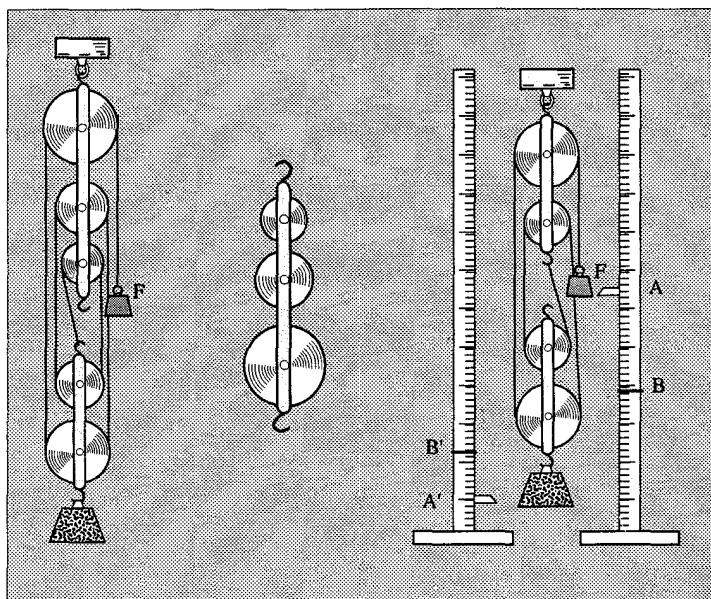
مراحل مختلف آزمایش را مانند آزمایش (الف) انجام دهید و یک بار دیگر مطابق شکل ۱۶-۲ (ب) قرقه‌ها را ببندید. این نوع بستن قرقه‌ها را سیستم ارشمیدس گویند. تحقیق کنید در سیستم ارشمیدس رابطه  $F = \frac{W}{n}$  برقرار است که در آن نیروی محرک و نیروی مقاوم  $n$  تعداد قرقه‌های متحرک است.

ترتیب آزمایش	$n$	$F_r$	$F_r$	$\frac{F_r + F_r}{2} = F$	$W$

ترتیب آزمایش	$F_r$	$F_r$	$\frac{F_r + F_r}{2}$	$W$

آزمایش (پ) دو قرقه مرکب سه‌تایی (با محورهای موازی) را انتخاب کنید و یک رشته نخ نسبتاً بلند را مطابق شکل ۱۷-۲ از شیارهای آنها بگذرانید. وزنه  $W$  را به قلاب قرقه متحرک آویزان کنید و نیروسنج را به سر آزاد نخ وصل کنید. نیروسنج را طوری بکشید تا وزنه به‌طور یکنواخت یک‌بار به طرف بالا و یک‌بار به طرف پایین حرکت کند. به ترتیب  $F_p$  و  $F_r$  مقادیری را که نیروسنج نشان می‌دهد یادداشت کنید. ممکن است به جای نیروسنج، وزنه آویزان کرد و با کم و زیاد کردن مقدار وزنه دستگاه را به حرکت در آورد.

دو خط‌کش را به‌طور قائم روی پایه‌هایی سوار کنید و روی هر کدام دو عدد شاخص قرار دهید. یک نقطه از نخ را که نشان دهنده محل نیروی محرک است روی شاخص  $A$  و وزنه را روی شاخص  $A'$  میزان کنید.



شکل ۲-۱۷

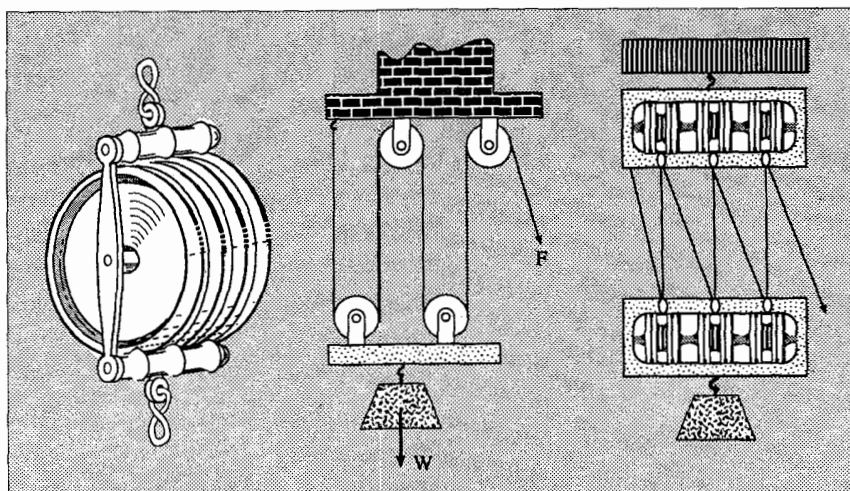
با دست نخ را بکشید تا نقطه A به نقطه B برسد. در این صورت نقطه A' نیز به B' خواهد رفت.  $AB = l$  جابه‌جایی نیروی محرک و  $A'B' = l'$  جابه‌جایی نیروی مقاوم است. این مقادیر را نیز یادداشت کنید.

رابطه بین نیروها و تعداد قرقره‌ها را پیدا کنید و مزیت‌های مکانیکی (واقعی) و نسبت سرعت (مزیت مکانیکی آرمانی) و بازده دستگاه را محاسبه کنید. اعداد به دست آمده را در جدول زیر بنویسید

ترتیب آزمایش	$F_1$	$F_2$	$\frac{F_1 + F_2}{2} = F$	W	$\frac{W}{F}$	$\frac{l}{l'}$	R

آزمایش (ت) دو قرقره سه‌تایی (هم محور) را مطابق شکل ۲-۱۸ با نخ به هم مربوط کنید و وزنه W را به قرقره‌های متحرک آویزان و نیروسنج را به سر آزاد نخ وصل کنید.

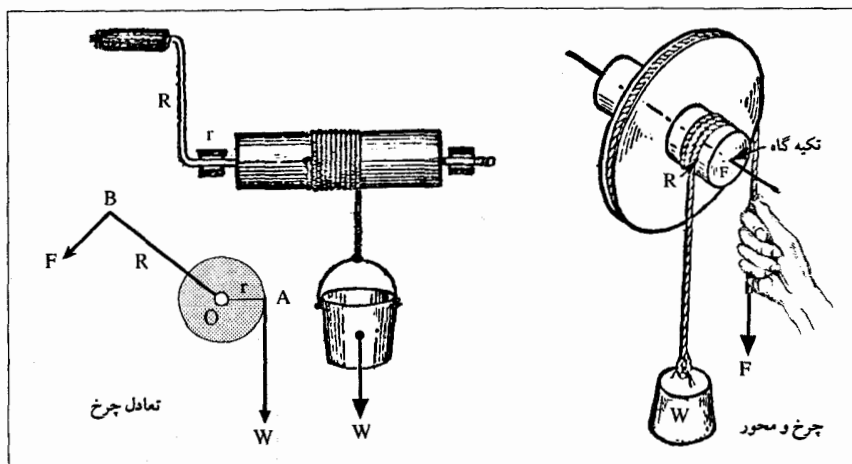
مراحل آزمایش را مانند آزمایش (پ) انجام دهید و در جدولی نظیر جدول آن آزمایش یادداشت کنید و رابطه بین نیروها و تعداد قرقره‌ها را به دست آورید.



شکل ۱۸-۲

آزمایش ث) دو تکه نخ را از قسمت بالای استوانه‌های بزرگ و کوچک بگذرانید و به سر آزاد نخ مربوط به استوانه کوچک وزنه  $W$  را آویزان کنید و به سر آزاد نخ استوانه بزرگ نیروسنج را وصل کنید، (شکل ۱۹-۲).

در حال تعادل عددی را که نیروسنج نشان می‌دهد یادداشت کنید. شعاعهای استوانه‌های بزرگ و کوچک را اندازه بگیرید. اعداد حاصل را در جدول زیر یادداشت کنید و رابطه‌ای بین نیروی محرک و نیروی مقاوم به دست آورید.

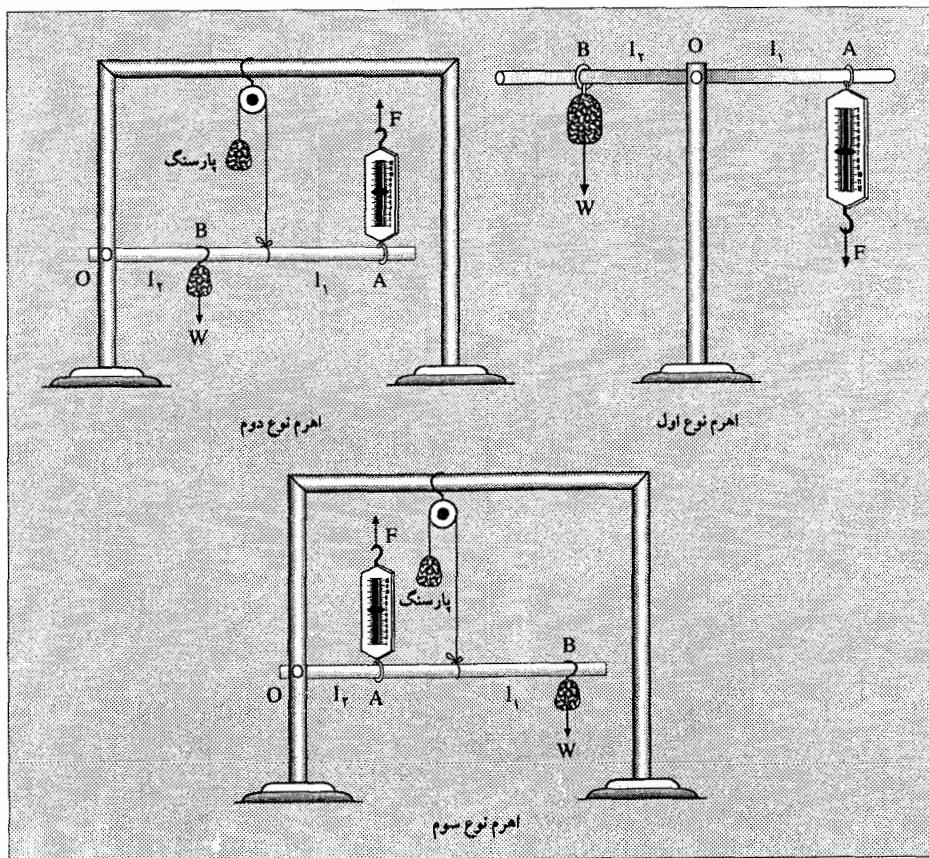


شکل ۱۹-۲

فرمول	$r$	$R$	$W$	$F$	ترتیب آزمایش

آزمایش (ج) دو خطکش، یکی از وسط روی پایه‌ای قرار گرفته و برای آزمایشهای اهرم نوع اول به کار می‌رود و دیگری از یک طرف ثابت است و حول آن نقطه می‌تواند بچرخد و برای آزمایشهای اهرمهای نوع دوم و سوم به کار می‌رود.

مطابق شکل ۲ - ۲۰ وزنه  $W$  را به عنوان نیروی مقاوم آویزان کنید و نیرویی را که نیروسنج در هریک از حالتها نشان می‌دهد یادداشت کنید. اندازه بازوها را در هریک از حالتها به دست آورید و جدول را پر کنید.



شکل ۲-۲۰

نوع اهرم	F	W	$l_1$	$l_2$	$F l_1 = F l_2$

در مورد اهرمهای نوع دوم و سوم، قبل از آزمایش، وسط خطکشی را به نخی ببندید و نخ را از شیار بالای قرقره ثابتی بگذرانید و به سر آزاد آن، آن قدر وزنه آویزان کنید تا خطکشی به طور افقی در حال تعادل قرار گیرد. به این ترتیب نیروی وزن خطکشی خنثا می شود.

تذکر - در آزمایشهای بالا به جای نیروسنج می توان از کفه و وزنه استفاده کرد و مقدار وزنه ها را آن قدر کم و زیاد کرد تا حالت مطلوب ایجاد شود.

## پرسشها

- ۱- چند ماشین ساده را نام ببرید و کاربرد آنها را بنویسید.
- ۲- در یک دستگاه قرقره های مرکب به چه طریقی انرژی تلف می شود؟
- ۳- در یک جرثقیل از چه ماشینهای ساده ای استفاده شده است؟
- ۴- چرا مزیت مکانیکی آرمانی در عمل و آزمایش همواره بزرگتر از مزیت مکانیکی واقعی است؟

## آزمایش ۶ ===== بررسی برابری و گشتاور نیروها

### مقدمه

گشتاور نیروی  $F$  نسبت به نقطه  $O$  برداری است که دارای مشخصات زیر باشد:

۱- مبدأ آن نقطه  $O$  است.

۲- امتداد آن عمود بر صفحه‌ای است که از بردار نیرو (خط  $AB$ ) و نقطه  $O$  بگذرد.

۳- جهت آن در جهت انگشت شست دست راست است که به طور مستقیم نگهداشته شده است و سایر انگشت‌های حلقه شده جهت  $A$  به  $B$  را نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، اگر شخصی در امتداد عمود بر صفحه  $OAB$  در نقطه  $O$  بایستد و به بردار  $F$  نگاه کند به طوری که  $A$  در طرف راست و  $B$  در طرف چپ وی باشد، جهت گشتاور در جهت پا به سر او خواهد بود.

۴- بزرگی آن برابر حاصل ضرب  $d$ ، یعنی فاصله نقطه  $O$  از نیروی  $F$ ، در مقدار نیروی  $F$  است

$$\tau = d \cdot F$$

این مقدار دو برابر سطح مثلث  $OAB$  است (شکل ۲-۲۱).

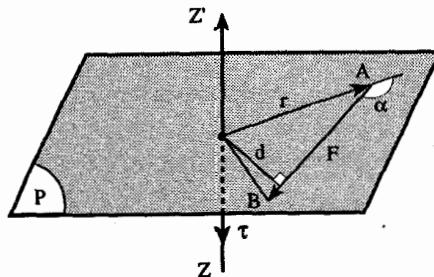
اگر فاصله مبدأ بردار تا نقطه  $O$  را با  $r$  نشان دهیم، چون  $d = r \sin \alpha$  است، بنابراین

$$\tau = rF \sin \alpha$$

به طوری که ملاحظه می‌شود گشتاور نیروی  $F$  نسبت به نقطه  $O$  برابر حاصل ضرب برداری دو بردار  $r$  و  $F$  است

$$\tau = r \wedge F$$

اگر نیروی  $F$ ، جسمی را حول محوری به چرخش در آورد گشتاور نیروی  $F$  نسبت به محور برابر است با، گشتاور تصویر بردار نیرو بر صفحه‌ای که عمود بر محور باشد نسبت به محل تلاقی صفحه و محور. گشتاور بردار نسبت به محور دارای ویژگی‌هایی است که عبارتند از



شکل ۲-۲۱



- ۱- اگر بردار در امتداد خود جابه‌جا شود گشتاور نسبت به محور تغییر نمی‌کند.
  - ۲- اگر بردار در امتداد خود تغییر جهت یابد گشتاور آن نیز نسبت به محور تغییر علامت می‌دهد.
  - ۳- اگر بردار و محور در یک سطح باشند گشتاور بردار نسبت به محور برابر صفر است.
- چون گشتاور برابر حاصل ضرب نیرو در جابه‌جایی است ابعاد (دیمانسیون) آن  $ML^2T^{-2}$  است که همان ابعاد کار است. ولی گشتاور و کار دو کمیت فیزیکی کاملاً متفاوتند. گشتاور کمیتی برداری است در صورتی که کار کمیتی نرده‌ای (اسکالر) است.
- واحد گشتاور نیوتون متر یا دین سانتیمتر است.

برایند نیروها - موقعی که چند نیرو به جسمی وارد شوند برایند آنها برابر جمع برداری نیروهاست. برایند چند نیرو، نیرویی است که به تنهایی اثر آن چند نیرو را داشته باشد. اگر جسم در حال تعادل باشد برایند نیروهای وارد به آن برابر صفر است.

برایند دو نیروی متقاطع برابر قطر متوازی الاضلاعی است که آن دو نیرو، دو ضلعش باشند و مقدار برایند از رابطه زیر به دست می‌آید

$$R = F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \theta$$

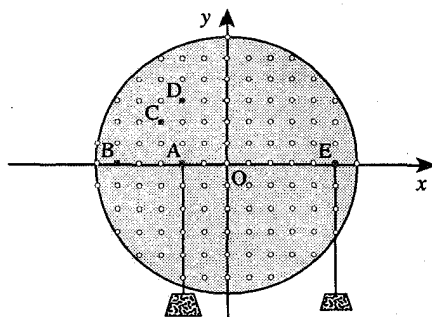
در این رابطه  $F_1$  و  $F_2$  مقادیر هر یک از نیروها و  $\theta$  زاویه بین آنهاست.

هدف آزمایش: بررسی گشتاورها و برایند نیروهای متقاطع

وسایل آزمایش: صفحه مدور سوراخ دار برای گشتاورها - میز نیرو - وزنه‌های مختلف - تراز.

آزمایش الف) موقعی که چند نیروی نامتقارب به جسمی وارد می‌شود، در صورتی تعادل برقرار است که اولاً برایند نیروهای وارد به جسم و ثانیاً مجموع جبری گشتاور این نیروها مساوی صفر باشد.

دیسک سوراخ‌دار، مطابق شکل ۲-۲۲، قرصی است که می‌تواند حول محور O دوران کند. توسط وزنه‌هایی که از سوراخها آویزان می‌شوند، می‌توان نیروهایی وارد کرد که گشتاور آنها باعث دوران



شکل ۲-۲۲

دیسک شود.

چون نیروها در یک صفحه واقع اند، بهتر است دستگاه مختصات  $xoy$  واقع بر این صفحه انتخاب شود. شرط اول تعادل را به صورت  $\sum F_x = 0$  و  $\sum F_y = 0$  و شرط دوم تعادل را به صورت  $\sum \tau = 0$  (مجموع جبری گشتاور نیروها نسبت به محور دوران مساوی صفر) به کار می‌بریم.

آزمایش را به روش زیر انجام دهید.

- ۱- وزنه‌ای را به نقطه  $E$  آویزان کنید و با قرار دادن وزنه مناسبی در نقطه  $A$ ، تعادل را برقرار کنید.
- ۲- وزنه  $E$  را ثابت نگهدارید و به جای نقطه  $A$  نقاط  $B$  و  $C$  را انتخاب کنید و هر بار با گذاشتن وزنه‌های مناسب تعادل را برقرار سازید.
- ۳- وزنه  $E$  را باز هم ثابت نگهدارید و این بار دو نیرو، توسط وزنه‌هایی که به نقاط  $B$  و  $D$  آویزان می‌کنید، به دستگاه وارد و با تغییر وزنه‌ها تعادل را برقرار کنید.
- ۴- هر بار فواصل نقاط آویز (نقطه اثر نیروها) را توسط گونیایی از محور دوران به دست آورید.
- ۵- با استفاده از شرط اول، امتداد و مقدار واکنش وارد بر محور دوران را معین کنید.
- ۶- گشتاور هر یک از نیروها را نسبت به نقطه  $O$  پیدا کنید و مجموع جبری آنها را به دست آورید. نتایج به دست آمده را در جدول زیر یادداشت کنید.

$F_E \times d_E = F_A \times d_A$	-	$R$	$\tau = F_E \cdot d_E - F_A \cdot d_A$
$F_E \times d_E = F_B \times d_B$	-	$R$	$\tau = F_E \cdot d_E - F_B \cdot d_A$
$F_E \times d_E = F_C \times d_C$	-	$R$	$\tau = F_E \cdot d_E - F_C \cdot d_C$
$F_E \times d_E = F_B \times d_B + F_D \times d_D$		$R$	$\tau = F_E \cdot d_E - F_B \cdot d_B - F_D \cdot d_D$

**شرح دستگاه بررسی نیروهای متقاطع-** میز نیرو مطابق شکل ۲-۲۳ صفحه دایره‌ای شکلی است که دور آن از صفر تا  $360^\circ$  درجه مدرج شده است. این صفحه روی پایه قائمی قرار گرفته است. به وسیله سه پیچ می‌توان طول پایه‌ها را تغییر داد و سطح را تراز کرد. در مرکز صفحه دایره‌ای، سوزنی به‌طور عمود بر آن وجود دارد و حلقه‌ای را که سه نخ به آن وصل شده است طوری قرار می‌دهند که سوزن در وسط آن واقع شود. در اطراف صفحه دایره‌ای سه قرقره قرار گرفته است که می‌توان آنها را جابه‌جا کرد. نخها از روی قرقره‌ها می‌گذرند و وزنه‌هایی به آنها آویزان می‌شود، در نتیجه حلقه توسط سه نیروی متقاطع کشیده می‌شود.

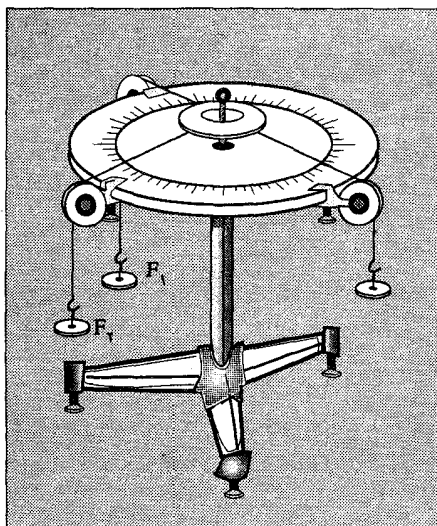
جابه‌جایی قرقره‌ها، جهت نیروهای کششی و مقدار وزنه‌ها، بزرگی این نیروها را به‌طور دلخواه تعیین می‌کنند. دستگاه وقتی در حال تعادل است که برابند نیروهای وارد بر آن صفر باشد. در این صورت حلقه طوری قرار می‌گیرد که سوزن درست در مرکز آن باشد.

آزمایش ب) دو وزنه دلخواه که نیروهای  $F_1$  و  $F_2$  هستند به دو تا از نخها آویزان کنید. زاویه بین دو نیرو  $\alpha$  است. حلقه در جهتی بین این دو نیرو کشیده می شود و به سوزن می چسبد. نخ سوم و قرقره مربوط به آن را جابه جا کنید تا موقعی که نخ را با دقت می کشید بتوانید وضعیت تعادل را برقرار کنید. جای قرقره سوم را ثابت کنید و وزنه ای را که به نخ سوم آویزان می کنید آن قدر تغییر دهید تا تعادل برقرار شود، برابند نیروهای  $F_1$  و  $F_2$  برابر  $R$  است که با نیروی  $F_3$  مساوی و در جهت مخالف با آن خنثا می شود.

مقادیر  $F_1$  و  $F_2$  و  $F_3$  و  $\alpha$  را یادداشت کنید و اندازه  $R$  را با فرمول به دست آورید. با تغییر  $\alpha$  و مقادیر  $F_1$  و  $F_2$  آزمایش را چند بار تکرار کنید و برای هر کدام خطاهای مطلق و نسبی را محاسبه و جدول زیر را پر کنید.

خطای نسبی	خطای مطلق	$R$	$F_3$	$\alpha$	$F_2$	$F_1$	ترتیب آزمایش

آزمایش پ) وزنه های ۱۰۰ و ۱۵۰ و ۷۵ گرمی را به نخها وصل کنید. به طوری که امتداد نخها به ترتیب روی زاویه های صفر و  $30^\circ$  و  $35^\circ$  قرار گیرند. نخ چهارمی را جابه جا کنید و وزنه آویخته شده به آن را آن قدر تغییر دهید تا بین نیروها تعادل برقرار شود. وزنه چهارم برابند سه نیرو است که به روش تجربی به دست می آید.



بردار نیروها را روی صفحه کاغذی رسم کنید و اندازه برابند را با دو روش تحلیلی و جمع هندسی بردارها به دست آورید.

این عمل را دوباره با وزنه‌های ۸۰۰ و ۱۶۰ و ۱۲۵ گرمی و زاویه‌های ۴۵° و ۱۸۰° و ۲۴۰° تکرار کنید. نتایج را در جدول زیر یادداشت کنید.

$F_1$		$F_2$		$F_3$		R تجربی		R تحلیلی		R هندسی	
زاویه	اندازه	زاویه	اندازه	زاویه	اندازه	زاویه	اندازه	زاویه	اندازه	زاویه	اندازه

### پرسشها

- ۱- فرمول تعیین برابند دو نیروی متقاطع را اثبات کنید.
- ۲- تعادل را تعریف کنید و انواع تعادل را شرح دهید.
- ۳- زوج نیرویی به جسمی وارد می‌شود. آیا تعادل برقرار است؟ چرا؟
- ۴- کمیت‌های نرده‌ای و برداری را با ذکر چند مثال تعریف کنید.

# آزمایش ۷ نیروی اصطکاک

## مقدمه

نیروی اصطکاک  $f$  نیرویی است که در سطح تماس دو جسم به وجود می آید و باعث کندی حرکت نسبی آنها می شود. این نیرو در امتداد سطوح تماس به اجسام وارد می شود و در خلاف جهت سرعت نسبی حرکت آنهاست.

اصطکاک عبارت از برهمکنش بین سطوح تماس دو جسم جامد است. وقتی سطوح نسبت به یکدیگر ساکن باشند از اصطکاک ایستایی (استاتیک) و وقتی سطوح در حرکت نسبی باشند از اصطکاک لغزشی یا جنبشی گفتگو می کنیم.

وقتی یکی از اجسام در امتداد سطح جسم دیگر بدون سر خوردن بغلتد با نوع به خصوصی مقاومت به نام اصطکاک غلتشی مواجه هستیم.

ماهیت نیروی اصطکاک به طور کامل شناخته شده نیست و می توان آن را به شرح زیر توجیه کرد. سطح جسم جامد، حتی اگر به خوبی صیقلی باشد، کاملاً صاف نیست و روی سطح برجستگیها و فرورفتگیها و ترکها و سایر بی نظمیهای میکروسکوپی وجود دارد. سطح اغلب اکسیدها پوشیده از لایه های چسبنانی از گازها و مایعات و مواد خارجی است. وقتی سطوح دو جسم تماس می یابند، برآمدگیها و فرورفتگیهای میکروسکوپی با هم درگیر می شوند و در هم رفتن این برآمدگیها مانع حرکت نسبی اجسامی می شود که با هم در تماس هستند. فاصله بین دو جسم، در نقاط مختلفی از سطح تماس ممکن است هم مرتبه با برد نیروهای بین ملکولی باشد. این امر منجر به چسبندگی سطحی در نقاط تماس می شود که باز هم در مقابل حرکت نسبی ایستادگی می کند.

درگیری برآمدگیهای خیلی ریز و چسبندگی نسبی سطوح، در اثر نیروی عمودی  $F_n$  که اجسام را به یکدیگر می فشارد، زیاد می شود. این نیرو ممکن است، نیروی سنگینی یا مؤلفه قائم آن (در سطح شیبدار) یا هر نیروی دیگر عمود بر سطح تماس اجسام باشد.

نیروی کششی کمتر از نیروی ماکسیمم اصطکاک ایستایی عمدتاً باعث تغییر شکل الاستیک (کشسان) در برآمدگیهای ریز نقاط تماس، یعنی در محل بروز نیروهای چسبندگی بین ملکولی می شود. نیروی الاستیک حاصل، در واقع، نیروی اصطکاک ایستایی است. موقعی که جسم حرکت می کند از میزان نیروی اصطکاک کاسته می شود. در این حالت آن را نیروی اصطکاک جنبشی می گویند.

نیروی اصطکاک بستگی به جنس و وضعیت سطوح در حال تماس از لحاظ هموار یا ناهموار بودن دارد و وسعت سطح دخالتی در مقدار نیروی اصطکاک ندارد. همچنین نیروی اصطکاک با نیروی عمودی وارد بر سطوح متناسب است. نسبت نیروی اصطکاک به نیروی عمودی را ضریب اصطکاک می گویند، چون از دو نوع نیروی اصطکاک گفتگو به میان می آید ضریب اصطکاک نیز دو نوع است

$$\mu_s = \frac{F_s}{F_n} \quad , \quad \mu_k = \frac{F_k}{F_n} \quad \text{ضریب اصطکاک ایستایی} \quad , \quad \text{ضریب اصطکاک جنبشی}$$

## هدف آزمایش: تعیین ضریب اصطکاک در سطوح افقی و شیبدار

وسایل آزمایش: مکعب چوبی - تراز - قلاب - نخ - کفه - قرقره ثابت - وزنه - خطکش - سطح شیبدار - ترازو.

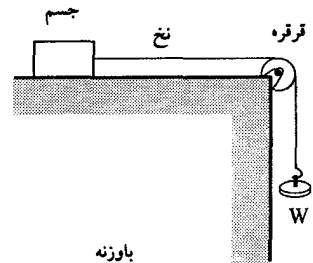
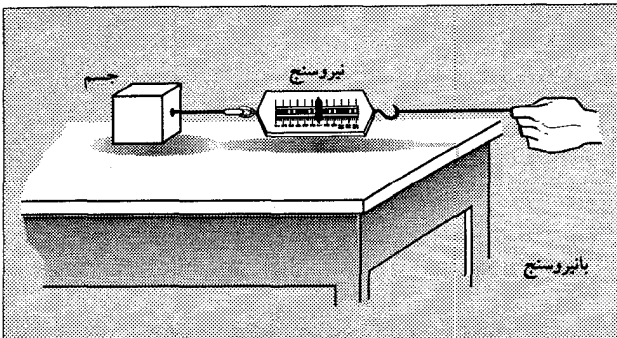
آزمایش الف) مکعبی چوبی را وزن کنید و روی سطح مورد نظر قرار دهید و نخ به قلاب آن وصل کنید. نخ را از شیار قرقره ثابتی بگذرانید و به کفه‌ای مربوط کنید. داخل کفه آن قدر وزنه بگذارید تا جسم شروع به حرکت کند. در این صورت وزن مکعب  $F_n$  و مجموع وزن کفه و وزنه‌های داخل آن  $F_s$  هستند شکل (۲ - ۲۴).

بار دیگر آزمایش را تکرار کنید با این تفاوت که پس از گذاشتن وزنه، ضربه خفیفی به سطح که جسم روی آن قرار دارد، وارد کنید. اگر جسم حرکت نکرد وزنه را افزایش دهید و باز هم ضربه وارد کنید و این عمل را آن قدر ادامه دهید تا جسم به طور یکنواخت حرکت کند. مجموع وزن کفه و وزنه‌های داخل آن در این حالت  $F_k$  است.

وزنه‌های مختلفی روی مکعب قرار دهید و به این ترتیب به ازای  $F_n$  که مجموع وزن مکعب و وزنه‌های روی آن است، هر بار  $F_s$  و  $F_k$  مربوط را پیدا و در جدول زیر یادداشت کنید

ترتیب آزمایش	$F_n$	$F_s$	$F_k$

منحنی نمایش تغییرات  $F_s$  بر حسب  $F_n$  و همچنین نمودار  $F_k$  بر حسب  $F_n$  را روی دستگاه



محورهای مختصات به طور جداگانه رسم کنید. شیب خط را که همان ضریب اصطکاک است برای هر کدام به دست آورید.

مقدمه آزمایش (ب) مؤلفه های وزن جسمی که روی سطح شیبدار قرار دارد در امتداد سطح  $mg \sin \alpha$  و در امتداد عمود بر سطح  $mg \cos \alpha$  است.

اگر جسمی روی سطح شیبدار با نیروی محرک  $F_u$  به طور یکنواخت بالا رود نیروهای مقاوم  $mg \sin \alpha$  و  $f_R$  نیروی اصطکاک هستند و اگر جسم با نیروی  $F_d$  به طور یکنواخت پایین آید نیروهای محرک  $F_d$  و  $mg \sin \alpha$  و نیروی مقاوم  $f_R$  نیروی اصطکاک هستند. بنابراین برای این دو حالت می توان نوشت

$$F_u = mg \sin \alpha + f_k$$

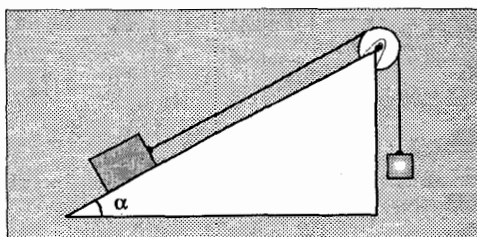
$$F_d + mg \sin \alpha = f_k$$

این دو رابطه را با هم جمع می کنیم

$$F_u + F_d = 2f_k$$

بنابراین مقدار نیروی اصطکاک در سطح شیبدار برابر است با  $f_k = \frac{F_u + F_d}{2}$ . از تقسیم این مقدار به  $mg \cos \alpha$  مقدار ضریب اصطکاک به دست می آید.

روش آزمایش (ب) مطابق شکل ۲۵-۲ نخى را از شیار قرقره ثابتى که بالای سطح شیبدار قرار دارد بگذرانید. به یک طرف نخ مکعب چوبی و به طرف دیگر کفه ای وصل کنید. وزنه ای در کفه قرار دهید و ضربه خفیفی به سطح وارد کنید و به تدریج به مقدار وزنه بیفزایید و هر بار ضربه خفیفی به سطح وارد کنید تا جسم با حرکت آهسته و یکنواختی بالا رود. مجموع وزن کفه و وزنه های داخل آن  $F_u$  است. آزمایش را تکرار و به تدریج از مقدار وزنه ها کم کنید تا موقعی که جسم با سرعت کم و به طور یکنواخت به طرف پایین سطح حرکت کند. مجموع وزن کفه و وزنه های داخل آن در این حالت  $F_d$  است. از فرمول  $f_k = \frac{F_u + F_d}{2}$  مقدار نیروی اصطکاک جنبشی در سطح شیبدار را به دست آورید. آزمایش را چند بار تکرار و مقادیر حاصل را در جدول زیر یادداشت کنید. مقدار  $F_k$  را محاسبه کنید.



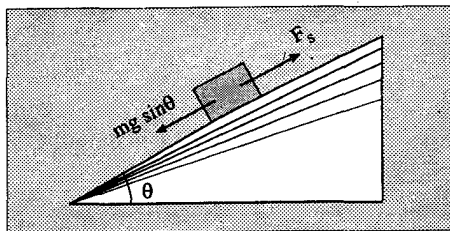
ترتیب آزمایش	وزن کفه	بالا رفتن		پایین آمدن		$F_k$
		وزنه	$F_u$	وزنه	$F_d$	

آزمایش پ) مطابق شکل ۲-۲۶ جسم را روی سطح شیبدار بگذارید و به تدریج زاویه شیب را بیشتر کنید تا جسم شروع به حرکت کند. نیروی اصطکاک برابر  $mg \sin \theta$  است و صرف خنثاکردن آن شده است و نیروی عمود بر صفحه مؤلفه  $mg \cos \theta$  از وزن جسم است. بنابراین

$$\mu_s = \frac{F_s}{F_n} = \frac{mg \sin \theta}{mg \cos \theta} = \tan \theta$$

با اندازه‌گیری زاویه شیب سطح و به دست آوردن تانژانت آن مقدار ضریب اصطکاک ایستایی را تعیین کنید.

آزمایش را تکرار کنید و هر بار که سطح را تغییر می‌دهید ضربه خفیفی به آن وارد کنید تا جسم به طور آهسته و یکنواخت حرکت کند، در این صورت  $\tan \alpha = \mu_k$  خواهد بود.



شکل ۲-۲۶



## آزمایش ۸ کشش ریسمان روی استوانه

### مقدمه

ریسمانی در طول  $AB$  روی استوانه قرار گرفته است. یک تکه کوچک نخ به طول  $ds = A'B'$  را که زاویه روبه روی آن  $d\theta$  باشد در نظر می گیریم. کشش نخ در یک طرف  $T$  و در طرف دیگر  $T + dT$  است. علت اختلاف بین این دو، وجود نیروی اصطکاک است که آن را با  $df$  نشان می دهیم. بنابراین

$$T + df = T + dT$$

$$dT = df = \mu dN$$

پس

$dN$  مؤلفه عمومی واکنش استوانه بر ریسمان در این محدوده است. (شکل ۲ - ۲۷). سه نیروی  $T$  و  $T + dT$  و  $dN$  را در امتداد  $dN$  تصویر می کنیم. چون مجموع جبری آنها مساوی صفر است، خواهیم داشت

$$dN - (T + dT) \sin \frac{d\theta}{\varphi} - T \sin \frac{d\theta}{\varphi} = 0$$

$$dN - 2T \sin \frac{d\theta}{\varphi} - dT \sin \frac{d\theta}{\varphi} = 0 \quad \text{یا}$$

از  $dT \sin \frac{d\theta}{\varphi}$  به علت کوچکی صرف نظر می کنیم. چون زاویه  $\frac{\theta}{\varphi}$  کوچک است به جای سینوس آن خود زاویه را برحسب رادیان قرار می دهیم، نتیجه می شود

$$dN = 2T \frac{d\theta}{\varphi} = T d\theta$$

چون  $dT = \mu dN$  است بنابراین

$$\frac{dT}{T} = \mu d\theta \quad \text{یا} \quad \frac{dT}{\mu} = T d\theta$$

برای تمام سطح تماس ریسمان از رابطه بالا انتگرال می گیریم

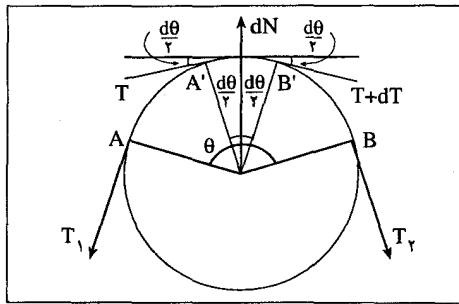
$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = \int_0^\theta \mu d\theta = \mu \int_0^\theta d\theta$$

$$\text{در نتیجه } T_2 = T_1 e^{\mu\theta} \quad \text{یا} \quad L \frac{T_2}{T_1} = \mu\theta$$

شرح دستگاه - تخته ای به طور قائم روی دیوار نصب شده و روی آن یک استوانه چوبی ثابت

شده است. دور استوانه مدرج شده و زوایای  $\frac{\pi}{4}$  و  $\frac{2\pi}{3}$  و  $\pi$  و  $\frac{3\pi}{4}$  را نشان می دهد.

ریسمان به اندازه کمان زاویه مورد نظر روی استوانه قرار می گیرد و به یک طرف آن وزنه ثابتی وصل است و طرف دیگر را به نیروسنجی متصل می کنند. موقعی که دستگاه در حال تعادل است



شکل ۲-۲۷

مقدار وزنه  $T_1$  است و نیروسنج  $T_2$  را نشان می‌دهد.

در بعضی از دستگاهها قرقره‌های کوچکی را در جاهای مناسبی کار گذاشته‌اند که طرف دیگر ریسمان از روی آن عبور می‌کند و به وزنه  $T_2$  مربوط می‌شود.

هدف آزمایش: بررسی کشش ریسمان در دو طرف قرقره و تعیین ضریب اصطکاک ریسمان بر قرقره.

روش آزمایش: با توجه به شکل ۲-۲۸ ریسمان را روی استوانه قرار دهید و به یک طرف وزنه ۵۰۰ گرمی بیاویزید و طرف دیگر را از روی قرقره مربوط بگذرانید و آن قدر به آن وزنه آویزان کنید تا دستگاه به طور یکنواخت حرکت کند.

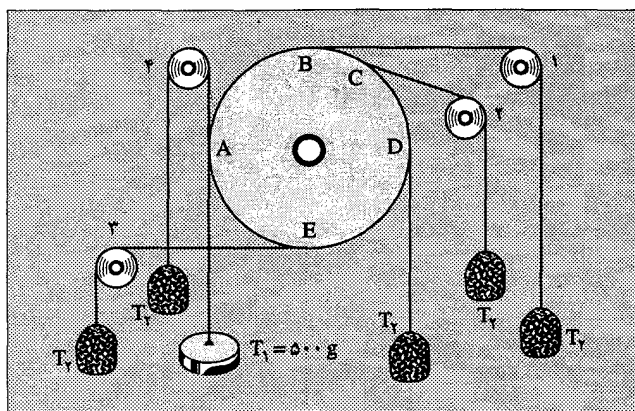
نتایج به دست آمده را در جدول زیر یادداشت کنید

رتیب آزمایش	$T_1$	$T_2$	$\theta$	$L \frac{T_2}{T_1}$	$\mu$	$\mu$ میانگین
۱			$\frac{\pi}{2}$			
۲			$2\frac{\pi}{3}$			
۳			$\pi$			
۴			$3\frac{\pi}{4}$			
۵			$2\pi$			

با استفاده از کاغذ نیم لگاریتمی نمودار تغییرات  $\frac{T_2}{T_1}$  را برحسب  $\theta$  رسم کنید. شیب خط برابر

$\mu$  است.

برای زاویه  $\frac{\pi}{2}$  ریسمان در نقطه A روی استوانه قرار می‌گیرد و در نقطه B از آن جدا شده پس از عبور از قرقره ۱ به وزنه  $T_2$  مربوط می‌شود.



شکل ۲-۲۸

برای زاویه  $\frac{2\pi}{3}$  ریسمان در نقطه A روی استوانه قرار می‌گیرد و در نقطه C از آن جدا شده پس از عبور از قرقره ۲ به وزن  $T_2$  مربوط می‌شود.

برای زاویه  $\pi$  ریسمان در نقطه A روی استوانه قرار می‌گیرد و در نقطه D از آن جدا شده و به وزن  $T_2$  مربوط می‌شود.

برای زاویه  $\frac{3\pi}{4}$  ریسمان در نقطه A روی استوانه قرار می‌گیرد و در نقطه E از آن جدا شده پس از عبور از قرقره ۳ به وزن  $T_3$  مربوط می‌شود.

برای زاویه  $2\pi$  ریسمان در نقطه A روی استوانه قرار می‌گیرد و یک مرتبه دور آن پیچیده می‌شود و از همان نقطه A جدا شده پس از عبور از قرقره ۴ به وزن  $T_4$  مربوط می‌شود.

### پرسشها

۱- از اصطکاک ریسمان روی استوانه چه استفاده‌ای می‌شود؟

۲- منابع خطای آزمایش را بنویسید.

## آزمایش ۹ بررسی قوانین حرکت

### مقدمه

مکانیک کلاسیک به وسیله دانشمندانی مانند کپرنیک، گالیله و نیوتون تحقیق و تدوین شده است. خواص و حرکات اجسام در زمین و همچنین حرکات اجرام سماوی با قوانین آن توجیه می شود.

نیوتون معمار اصلی مکانیک کلاسیک در سال ۱۶۸۶ سه قانون زیر را در کتابی به نام «اصول ریاضی فلسفه طبیعی» بیان کرد:

۱- هرگاه به نقطه مادی نیرویی وارد نشود شتاب آن نقطه مادی صفر است، یعنی یا ساکن می ماند یا دارای حرکت مستقیم الخط یکنواخت است.

۲- اگر نیرویی به نقطه مادی وارد شود به آن شتابی در امتداد و جهت نیرو می دهد که مقدارش با نیرو نسبت مستقیم و با جرم آن نقطه مادی نسبت معکوس دارد.

۳- نیروها اثرهای متقابل دارند، یعنی هرگاه دو نقطه مادی به یکدیگر نزدیک شوند برهم تأثیر متقابلی دارند و نیروهای مساوی و مخالف بر هم وارد می کنند.

**معادلات حرکت** - سرعت، مسافت طی شده در واحد زمان است. بنابراین در زمان  $dt$  مسافتی را که متحرک طی می کند برابر است با

$$dx = v dt$$

از آن انتگرال می گیریم،

$$x = vt + c \quad \text{یا} \quad \int dx = \int v dt$$

چون در مبدأ زمان  $x = c$  است بنابراین  $c$  مسافت پیموده شده در مبدأ زمان یا مسافت اولیه است. در نتیجه معادله حرکت یکنواخت به صورت زیر در می آید

$$x = vt + x$$

شتاب تغییر سرعت در واحد زمان است، بنابراین

$$dv = a \cdot dt \quad \text{یا} \quad a = \frac{dv}{dt}$$

از رابطه فوق انتگرال می گیریم

$$\int_{v_0}^v dv = a \int_0^t dt$$

$$. v = at + v_0 \quad \text{یا} \quad v - v_0 = at \quad \text{در نتیجه}$$

تابع اولیه رابطه فوق را به دست می آوریم

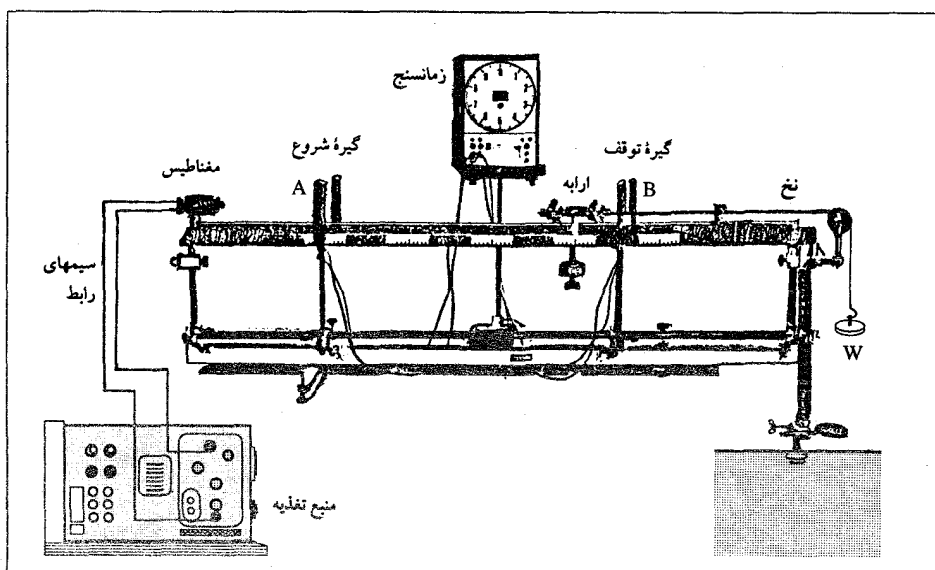
$$x = \frac{1}{2}at^2 + vt + c$$

در مبدأ زمان  $x = c$  است. مساحت اولیه را با  $x_0$  نشان می دهیم، نتیجه می شود

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0 t + x_0$$

**شرح دستگاه - دستگاه مطابق شکل ۲ - ۲۹ دارای ریلی است که ارابه ای می تواند روی آن حرکت کند. توسط نخ ای ارابه به وزنه  $W$  متصل است. در امتداد ریل خطکش مدرجی مقدار مسافت طی شده ارابه را نشان می دهد. دو گیره پیچ دار را می توان در امتداد ریل جابه جا کرد. در هر کدام از این گیره ها سیمی قرار دارد که توسط یک حلقه آهنربای کوچک دو سر سیمی را که به دو نقطه (جای فیش) این گیره وصل است به هم متصل می کند. یکی از این گیره ها به شروع و دیگری به توقف زمانسنج وصل می شود. ارابه ضمن حرکت به گیره اولی برخورد می کند. سیم از آهنربا جدا می شود و زمانسنج شروع به کار می کند. موقعی که پس از طی مسافت  $x$  به گیره دوم رسید، زمانسنج متوقف می شود و زمان حرکت را نشان می دهد.**

**هدف آزمایش:** تحقیق اصل اساسی دینامیک و تعیین شتاب حرکت و ضریب اصطکاک در سطح شیب دار.



شکل ۲-۲۹

آزمایش الف) با استفاده از تراز ریل را کاملاً به حالت افقی در آورید. ارابه را جلو آهنربا قرار دهید و آهنربا را به منبع تغذیه مستقیم وصل کنید تا ارابه جذب آن شود. طرف دیگر ارابه را به نخی متصل کنید. نخ را از روی قرقره انتهای دستگاه بگذرانید و به سر آن یک وزنه ۵۰ گرمی آویزان کنید.

وزنه به ارابه حرکت تند شونده می‌دهد. چون باید به ارابه نیرویی وارد نشود، قبل از آنکه به نقطه A برسد مانعی سر راه حرکت سقوطی وزنه قرار دهید تا آن را متوقف کند. با این کار به ارابه یک حرکت اولیه داده شده است ولی از نقطه A به بعد هیچ‌گونه نیرویی به ارابه وارد نمی‌شود و بعد از آن ارابه دارای حرکت یکنواخت است.

در صورتی که نیروی اصطکاک به اندازه‌ای باشد که اختلالی ایجاد کند شیب مختصری در حدود ۳۰ تا ۴۰ به ریل بدهید. نیرویی که در اثر این شیب به ارابه وارد می‌شود تقریباً با اثر نیروی اصطکاک برابر است و می‌توان گفت که هیچ‌گونه نیرویی به جسم وارد نمی‌شود. فاصله دو گیره را به ترتیب ۲۰ cm و ۳۰ cm و ۴۰ cm انتخاب کنید و هر بار زمان مربوط را توسط زمانسنج اندازه بگیرید. زمان را برای هر فاصله سه مرتبه اندازه‌گیری کنید و میانگین آنها را همراه با فاصله در جدول زیر یادداشت کنید.

ترتیب آزمایش	x	$t_1$	$t_2$	$t_3$	t	$v = \frac{x}{t}$
۱	۲۰					
۲	۳۰					
۳	۴۰					

نمودار تغییرات x بر حسب t را که خط مستقیمی است رسم کنید. شیب خط برابر سرعت است.

آزمایش ب) دستگاه را طوری تنظیم کنید که وزنه آزادانه سقوط کند و مانعی سر راه آن نباشد. گیره‌ها را در فواصل x و x' قرار دهید و زمانهای مربوط به آنها را سه بار اندازه‌گیری کنید و میانگین آنها را به دست آورید.

با استفاده از روابط زیر شتاب و سرعت اولیه حرکت را محاسبه کنید

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v \cdot t$$

$$x' = \frac{1}{2}at'^2 + v \cdot t'$$

اعداد حاصل را در جدول بنویسید

سرعت اولیه	شتاب	زمان میانگین	زمان	فاصله	ترتیب آزمایش
			۱ ۲ ۳		

آزمایش پ) همان آزمایش (ب) را تکرار کنید با این تفاوت که به جای وزنه ۵۰ گرمی وزنه ۱۰۰ گرمی بگذارید و شتاب را به دست آورید.

آزمایش ت) همان آزمایش (ب) را تکرار کنید و با افزودن وزنه به ارباب جرم را تغییر دهید و شتاب را به دست آورید.

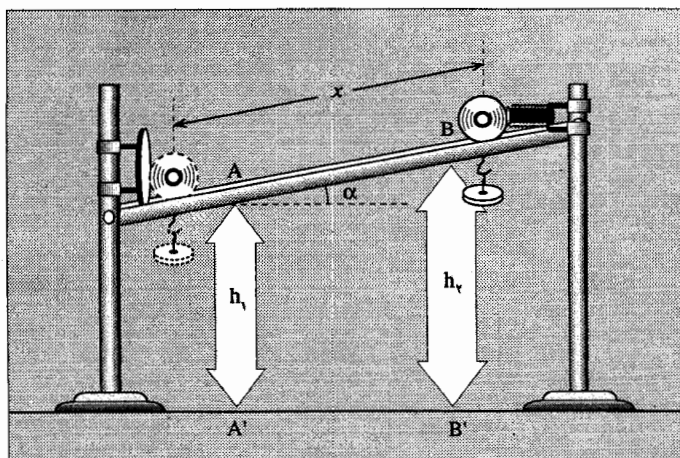
با توجه به آزمایشهای (ب) و (پ) و (ت) اصل دوم نیوتون را تحقیق کنید.

آزمایش ث) مطابق شکل ۲ - ۳۰ میله‌ای به طور شیبدار به دو پایه قائم محکم شده است و قرقره‌ای که وزنه‌ای به آن آویزان است می‌تواند روی میله حرکت کند.

در یک سر میله آهنربای الکتریکی وجود دارد که مربوط به منبع تغذیه با جریان مستقیم است، جریان را وصل کنید. آهنربا قرقره را جذب می‌کند. جریان را قطع کنید، زمانسنج شروع به کار می‌کند. قرقره و وزنه مربوط به آن، طول میله را طی می‌کند و به صفحه‌ای برخورد می‌کند. در این موقع زمانسنج از کار می‌افتد و زمان عبور جسم را نشان می‌دهد.

برای دقت بیشتر، زمان را چندین مرتبه به دست آورید و میانگین آنها را در محاسبه دخالت دهید.

فاصله محورهای قرقره را در دو سر میله اندازه بگیرید و شتاب حرکت را حساب کنید.



دو نقطه A و B را روی میله انتخاب کنید و فاصله بین آنها و همچنین A'B' فاصله پای عمود آنها را اندازه بگیرید و  $\sin \alpha$  و  $\cos \alpha$  را به دست آورید و شتاب حرکت را از رابطه  $a = g \sin \alpha$  حساب کنید. نتایج حاصل را در جدول زیر یادداشت کنید.

x	t	$t^2$	$a = \frac{2x}{t^2}$	$h_1$	$h_2$	AB	A'B'	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	$a' = g \sin \alpha$

به طوری که ملاحظه می شود  $a'$  و  $a$ ، شتابهایی که از دو راه به دست آمده است، تفاوت زیادی با یکدیگر دارند. علت وجود اختلاف را شرح دهید.

از رابطه  $a = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)$  ضریب اصطکاک قرقره روی میله را به دست آورید.

### پرسشها

- ۱- موقعی که نیروی وارده ثابت نباشد، حرکت چگونه است؟
  - ۲- رابطه  $a' = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)$  چگونه به دست آمده است؟
  - ۳- واحدهای نیرو را نام ببرید و ارتباط آنها را با یکدیگر بنویسید.
  - ۴- نمودارهای زیر را رسم کنید
- الف) شتاب بر حسب زمان در حرکت متشابه التغییر.
- ب) سرعت بر حسب زمان در حرکتهای تند شونده و کند شونده.
- پ) مسافت بر حسب زمان در حرکت متشابه التغییر تند شونده.



# آزمایش ۱۰ ماشین آتوود

## مقدمه

از قسمت بالای شیار قرقره ثابتی، نخ غیر الاستیک محکمی که وزن آن ناچیز است می‌گذرد. به طرفین نخ دو وزنه مساوی، هر کدام به جرم  $M$  آویزان است. محور قرقره به بالای میله قائمی ثابت شده است و میله روی پایه‌ای قرار دارد. قرقره به سهولت حول محور افقی می‌چرخد.

وزنه‌ها را در هر محلی که قرار دهیم دستگاه در حال تعادل است و به علت ناچیز بودن اصطکاک قرقره، اگر ضربه خفیفی به یکی از وزنه‌ها وارد شود با حرکت یکنواخت شروع به حرکت می‌کند. وزنه‌های کوچکی به جرم  $m$  به نام سربار وجود دارد که مطابق شکل صفحه‌های دایره‌ای سوراخ‌دار با شکافی هستند که قطر آنها قدری از قطر وزنه  $M$  بزرگتر است و توسط شکاف از نخ رد می‌شوند و روی استوانه قرار می‌گیرند.

حلقه‌ای که قطر داخلی آن درست برابر قطر خارجی وزنه  $M$  است روی میله قائم سوار می‌شود و می‌تواند بالا و پایین برده شود و در محل‌های مختلفی قرار گیرد. اگر وزنه  $M$  در حال عبور به آن برسد به راحتی از داخل آن رد می‌شود ولی سربار روی حلقه باقی می‌ماند. همچنین صفحه کوچک متغیری به میله متصل است که می‌تواند از حرکت وزنه  $M$  جلوگیری کند و آن را نگه‌دارد، شکل ۳۱-۲.

در مورد طرفی که دارای سربار است می‌توان نوشت

$$(M + m)g - T_1 = (M + m)a_1$$

در مورد طرف دیگر داریم

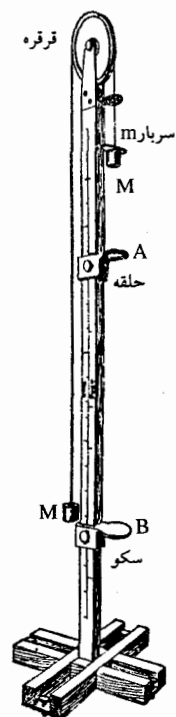
$$-Mg + T_2 = Ma_2$$

چون نخ غیر قابل کشش است  $a_1 = a_2 = a$ ، و در حالتی که از جرم قرقره و اصطکاک آن صرف‌نظر شود  $T_1 = T_2$  است. از جمع دو رابطه بالا نتیجه می‌شود

$$mg = (2M + m)a$$

یا

$$a = \frac{mg}{2M + m}$$



شکل ۳۱-۲

در صورتی که نیروی اصطکاک در محور قرقره قابل چشم‌پوشی نباشد، کشش نخ مربوط به طرف سربار  $T_1$  بیشتر از  $T_2$  نیروی کشش در طرف دیگر است و بقیه آن صرف خنثاکردن نیروی اصطکاک می‌شود. برای تعیین نیروی اصطکاک  $F_f$  باید سربار کوچکی به اندازه  $m'$  روی وزنه  $M$  قرار داد به طوری

که دستگاه در حال تعادل باقی بماند ولی با ضربهٔ خفیفی دارای حرکت یکنواخت شود. در این صورت

$$F_f = m'g$$

### هدف آزمایش: تحقیق اصول دینامیک

**آزمایش الف)** وزنهٔ دست راست را به بالاترین نقطهٔ ممکن ببرید. با قرار دادن سربار  $m'$  روی آن، اصطکاک در محور قرقره را خنثا کنید و سپس سربار  $m$  را روی آن قرار دهید. در نقطهٔ  $B$  به فاصلهٔ  $x$  از  $A$  حلقهٔ سربارگیر را قرار دهید و وزنه‌ها را به آرامی رها کنید. دستگاه با شتاب  $a$  حرکت می‌کند و در نقطهٔ  $A$  سربار حذف می‌شود. پس از آن نیروی مؤثر صفر می‌شود و دستگاه با سرعت  $v$  که در نقطهٔ  $A$  دارا بود به حرکت خود به‌طور یکنواخت ادامه می‌دهد و در  $B$  متوقف می‌شود. صفحهٔ نگهدارنده را در محل‌های مختلفی قرار دهید و هر بار با شرایط یکسان آزمایش را تکرار کنید. زمانی را که وزنه فواصل  $x_1$  و  $x_2$  و ... را طی می‌کند به وسیلهٔ زمانسنج به دست آورید. برای دقت بیشتر هر مرحله را سه بار تکرار کنید و از زمان میانگین بگیرید و نتایج را در جدول زیر یادداشت کنید.

$AB = x$			
$t$			

نمودار تغییرات  $x$  را بر حسب  $t$  رسم کنید و شیب خط را که همان سرعت باشد به دست آورید.

**آزمایش ب)** سربار را روی وزنه قرار دهید و سکوی نگهدارنده را در طول میله آن قدر بالا و پایین ببرید تا یک ثانیه پس از رها شدن، وزنه متوقف شود. مسافتی را که وزنه پیموده است اندازه بگیرید. جای سکو را تغییر دهید تا پس از ۲ و ۳ و ۴ ثانیه پس از رها شدن، وزنه متوقف شود. هر بار مسافت طی شده را اندازه بگیرید و نتایج را در جدول بنویسید و شتاب حرکت را به دست آورید.

$t$	$x$	$a = \frac{2x}{t^2}$

**آزمایش پ)** برای تحقیق رابطهٔ  $v = at$  سربار را روی وزنه قرار دهید و حلقه را در فاصلهٔ  $AB = x$  قرار دهید به طوری که پس از ۱ یا ۲ یا ۳ ثانیه سربار حذف شود. پس از آن سکوی نگهدارنده را بگذارید تا یک ثانیه بعد وزنه متوقف شود.  $BC = x'$  مسافت پیموده شده در واحد زمان یا سرعت وزنه در نقطهٔ  $B$  است. مسافت‌های  $x$  و  $x'$  را اندازه بگیرید و در جدول یادداشت کنید.

میانگین $a$	$a = \frac{v}{t}$	$x' = v$	$x$	زمان پیمودن مسافت $x$

آزمایش (ت) ۵ عدد سربار ۵ گرمی انتخاب کنید و روی یکی از وزنه‌ها ۴ سربار و روی دیگری یک سربار بگذارید. هر بار یک سربار از روی اولی بردارید و روی دیگری قرار دهید و دستگاه را به حرکت در آورید. با جابه‌جا کردن سکوی نگهدارنده مسافت پیموده شده در ۲ یا ۳ ثانیه را به دست آورید. نیروی مؤثر وارد بر دستگاه برابر اختلاف وزنه‌ها در دو طرف است. نتایج به دست آمده را در جدول زیر یادداشت کنید.

$F$	$t$	$x$	$a = \frac{v}{t}$	$\frac{F}{a}$
$1mg$				
$3mg$				
$5mg$				

### پرسشها

- ۱- کشش نخ را در ماشین آتود محاسبه کنید.
- ۲- اگر جرم قرقره قابل چشمپوشی نباشد، فرمول حرکت به چه صورت در می‌آید؟

# آزمایش ۱۱ گشتاور ماند دیسک

## مقدمه

در صنعت و زندگی روزمره با حرکت دورانی، زیاد مواجه هستیم، انواع چرخ‌لنگر، محورهای گردان، موتورها و مولدها، پیچها و مته‌ها و غیره از آن جمله‌اند.

در حرکت دورانی تمام نقاط جسم روی دایره‌هایی هم‌مرکز، که محل آن محور دوران است در حال حرکتند. این نقاط دارای سرعت‌های خطی متفاوتی هستند ولی سرعت زاویه‌ای همه آنها یکسان و برابر است.  $\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \alpha}{\Delta t}$

در حرکت لغزشی، چون تمام نقاط جسم در امتداد مسیریایی مانند هم حرکت می‌کنند و دارای سرعت‌های مساوی هستند معادله اندازه حرکت خطی یا انرژی جنبشی جسم کاملاً مانند معادله مربوط به ذره است. ولی موقعی که جسم دارای حرکت دورانی است، سرعت ذرات با یکدیگر متفاوت است و تمام مشخصات دینامیکی باید بر حسب سرعت زاویه‌ای بیان شوند. به همین علت با کمیتهای فیزیکی دیگری نظیر گشتاور ماند، سروکار خواهیم داشت.

در دستگاهی که دارای حرکت دورانی با سرعت زاویه‌ای  $\omega$  است دو ذره را به جرمهای  $m_1$  و  $m_2$  در نظر می‌گیریم. این دو ذره به فاصله  $l$  از یکدیگر قرار گرفته‌اند، شکل ۲ - ۳۲. سرعت ذره اول  $v_1 = r_1 \omega$  و سرعت ذره دوم  $v_2 = r_2 \omega$  که  $r_1$  و  $r_2$  فواصل ذرات تا محور دوران است. انرژی جنبشی آنها برابر است با

$$E_1 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 r_1^2 \omega^2$$

$$E_2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_2 r_2^2 \omega^2$$

انرژی جنبشی دستگاه برابر مجموع انرژیهای جنبشی ذرات تشکیل‌دهنده آنهاست. در مورد ذرات مختلف می‌توان نوشت

$$E = E_1 + E_2 + \dots = \frac{1}{2} \omega^2 (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \dots)$$

داخل پرانتز  $\sum m r^2$  (مجموع حاصل ضرب جرم در مجذور فاصله از محور) را گشتاور ماند گویند و با حرف  $I$  نشان می‌دهند. بنابراین رابطه بالا به صورت زیر در می‌آید

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2$$

در نتیجه، انرژی جنبشی دستگاهی مرکب از ذرات، برابر با نصف حاصل ضرب گشتاور ماند دستگاه در مجذور سرعت زاویه‌ای دوران است.

واحد گشتاور ماند، کیلوگرم - متر - متر است ( $\text{kg} - \text{m}^2$ )

شرح دستگاه - دیسکی برنجی دارای محور نسبتاً طولیلی است. طرفین محور روی دو پایه قائم قرار گرفته‌اند. روی محور زائده‌ای است که یک سر نخ‌ی به آن وصل می‌شود. نخ چند مرتبه دور

دیسک می‌پیچد و سر دیگرش به وزنه‌ای وصل می‌شود. جرم وزنه  $m$  است. در پایین دستگاه، تقریباً در ۵ سانتیمتری سطح زمین، صفحه مسطح  $p$  قرار گرفته است.

روی صفحه  $p$  صفحه مسطح کوچک  $p$  واقع شده است، شکل ۲-۳۳. هنگام برخورد وزنه با صفحه  $p'$  دو کلید به کار می‌افتد. یکی از کلیدها لامپی را روشن می‌کند و با دیگری زمانسنج شروع به کار می‌کند. ارتفاع وزنه از صفحه  $p'$  برابر  $h$  است. همچنین در کنار دیسک و روی پایه پیچی نصب شده است که از آن به عنوان ترمز استفاده می‌شود. اگر ترمز را آزاد کنیم چرخ دوران می‌کند، نخ از دور محور باز می‌شود و وزنه مربوط به آن پایین می‌آید. طول نخ را طوری انتخاب می‌کنند که هنگام رسیدن به صفحه‌ای که در پایین قرار گرفته است (صفحه  $p'$ )، نخ از زائده خارج می‌شود. وزنه در بالای مسیر دارای انرژی پتانسیل  $mgh$  است. این انرژی در اثر سقوط وزنه به ۳ بخش تقسیم می‌شود:

۱- موقعی که وزنه به پایین مسیر می‌رسد دارای سرعت  $v$  و در نتیجه انرژی جنبشی آن  $\frac{1}{2}mv^2$  است.

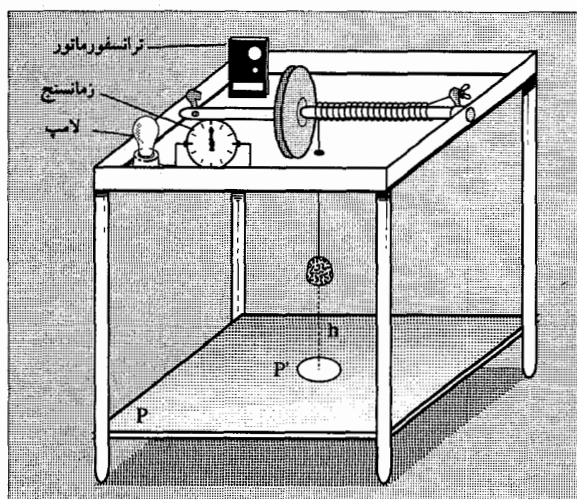
۲- سرعت زاویه‌ای چرخ  $\omega$  و انرژی جنبشی دورانی آن  $\frac{1}{2}I\omega^2$  است.

۳- هنگام سقوط وزنه، مقداری از انرژی، صرف غلبه بر نیروی مقاوم اصطکاک می‌شود. اگر این انرژی برای یک دور  $W_f$  باشد برای  $n_1$  دور برابر  $n_1 W_f$  است.

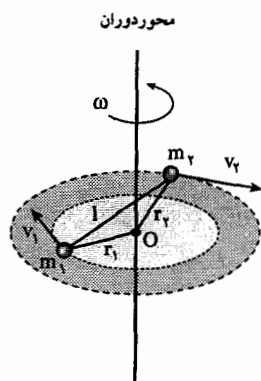
بنابر قانون بقای انرژی

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 + n_1 W_f \quad (۱)$$

پس از آنکه وزنه به صفحه  $p$  رسید، سرعت زاویه‌ای چرخ به علت وجود اصطکاک کند می‌شود و



شکل ۲-۳۳



شکل ۲-۳۲

پس از  $t$  ثانیه می‌ایستد. اگر  $n_p$  تعداد دورهایی باشد که چرخ دوران می‌کند تا بایستد سرعت زاویه‌ای متوسط برابر است با

$$\bar{\omega} = \frac{0 + \omega}{2}$$

چون  $\bar{\omega} = \frac{2\pi n_p}{t}$  رادیان بر ثانیه است، بنابراین

$$\frac{\omega}{2} = \frac{2\pi n_p}{t}$$

یا

$$\omega = \frac{4\pi n_p}{t}$$

سرعت خطی برابر است با

$$v = R\omega = \frac{4\pi n_p R}{t}$$

$R$  شعاع محور است که نخ دور آن پیچیده شده است.

انرژی جنبشی پس از  $n_p$  دور دوران به نیروی اصطکاک غلبه می‌کند، پس

$$n_p W_f = \frac{1}{2} I \omega^2$$

یا

$$W_f = \frac{I \omega^2}{2 n_p} = \frac{8\pi^2 n_p}{t^2} I$$

مقادیر  $v$  و  $\omega$  و  $W_f$  را در رابطه (۱) قرار می‌دهیم پس از ساده کردن نتیجه می‌شود

$$I = \frac{m}{n_1 + n_p} \left( \frac{g h t^2}{8\pi^2 n_p} - R^2 n_p \right)$$

هدف آزمایش: تعیین گشتاور ماند دیسک

روش آزمایش: نخ را به دور محور بپیچید تا وزنه به اندازه ارتفاع مورد نظر بالا آید ( $h$ ). از چرخش دیسک توسط ترمز جلوگیری کنید و آن را ثابت نگهدارید. قطر محور را به وسیله کولیس اندازه‌گیری کنید و سپس  $R$  شعاع محور را به دست آورید. دور شمار و زمانسنج را روی صفر تنظیم کنید. ترمز را رها و دیسک را آزاد کنید. به مجرد اینکه وزنه به صفحه برخورد کرد لامپ روشن می‌شود.  $n_p$  تعداد دورها را در این موقع بخوانید. دیسک به حرکت خود ادامه می‌دهد، موقعی که ایستاد، زمانسنج را متوقف کنید.  $t$  زمان حرکت کند شونده و  $n_p$  تعداد دورها را بخوانید.

آزمایش را ۳ مرتبه با  $h$ های مختلف انجام دهید و سایر مقادیر مورد نظر را به دست آورید. نتایج به دست آمده را در جدول یادداشت و مقدار  $I$  را از فرمول مربوط حساب کنید.

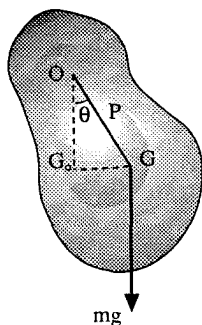
m	R	h	$n_1$	t	$n_2$	I
میانگین						

### پرسشها

- ۱- واحد گشتاور ماند را در دستگاه  $c \cdot g \cdot s$  و SI بنویسید.
- ۲- کاربرد گشتاور ماند را شرح دهید.
- ۳- گشتاور ماند یک کره توپر را نسبت به مرکز آن حساب کنید.

# آزمایش ۱۲ آونگ

## مقدمه



آونگ جسم جامدی است که حول محوری افقی خارج از گرانیگاه می‌تواند نوسان کند. در شکل ۲-۳۴ نقطه غیرمشخص P که به فاصله r از محور آویز قرار دارد، روی کمان دایره‌ای به شعاع r حرکت می‌کند. اگر y فاصله P از صفحه قائمی که بر محور O می‌گذرد و سرعت زاویه‌ای جسم باشد، سرعت خطی نقطه P برابر rw و شتاب مماس آن  $r \frac{d\omega}{dt}$  و نیرویی که حرکت را به وجود می‌آورد  $mr \frac{d\omega}{dt}$  است. گشتاور این نیرو نسبت به نقطه O برابر  $mr^2 \frac{d\omega}{dt}$  و مجموع گشتاورهای نقاط مختلف جسم برابر است با

شکل ۲-۳۴

$$\frac{d\omega}{dt} \sum mr^2$$

این گشتاور با گشتاور نیروی وزن جسم Mg که بر گرانیگاه وارد می‌شود برابر است. OG فاصله گرانیگاه تا نقطه آویز را با a و زاویه بین OG با امتداد قائم در نقطه آویز را با  $\theta$  نشان می‌دهیم. گشتاور نیروی وزن  $-Mga \sin \theta$  خواهد بود. علامت منها به خاطر آن است که اثر گشتاور نزدیکتر کردن جسم به وضعیت تعادل است. بنابراین

$$\frac{d\omega}{dt} \sum mr^2 = -Mga \sin \theta$$

$\sum mr^2$  گشتاور ماند آونگ نسبت به O است. در نتیجه معادله بالا به صورت زیر در می‌آید

$$I \frac{d\omega}{dt} + Mga \sin \theta = 0$$

چون  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  است بنابراین

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + Mga \sin \theta = 0$$

اگر دامنه نوسان کوچک باشد  $\sin \theta = \theta$  و در نتیجه

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{M}{I} ga \theta = 0$$

جواب معادله دیفرانسیل فوق یک معادله سینوسی است به صورت  $\theta = a \sin(\omega t + \varphi)$  که در آن

$\omega$  سرعت زاویه‌ای حرکت نوسانی است و مقدار آن  $\omega^2 = \frac{Mga}{I}$  یا  $\frac{T}{2\pi} = \sqrt{\frac{I}{Mga}}$  است. در نتیجه

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{Mga}} \quad (۱)$$



آونگ ساده، جرم نقطه مادی وزینی است که توسط نخ غیرالاستیک به نقطه O آویخته شده است. چون گشتاورماند گلوله آونگ که به فاصله 1 (طول آونگ) از نقطه O قرار دارد برابر  $I = ml^2$  است، با توجه به  $l = a$  رابطه (۱) به صورت زیر درمی آید

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{g}}$$

توجه دارید که فرمول فوق برای نوسانهای کم دامنه است. اگر دامنه نوسان کوچک نباشد دوره آونگ به صورت زیر است

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{g}} \left( 1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\theta_m}{2} + \frac{1}{64} \sin^4 \frac{\theta_m}{2} + \dots \right)$$

$\theta_m$  جابه جایی زاویه ای ماکسیمم است و به طوری که ملاحظه می شود جمله های معادله رفته رفته کوچکتر می شوند.

آونگ ساده دارای چهار قانون به شرح زیر است:

- ۱- نوسانهای کم دامنه همزمان اند.
  - ۲- دوره آونگ به جرم و جنس گلوله آن بستگی ندارد.
  - ۳- دوره آونگ با جذر طول آن نسبت مستقیم دارد.
  - ۴- دوره آونگ با جذر شتاب گرانی نسبت معکوس دارد.
- اگر طول آونگ 1 و مقدار انحراف گلوله  $\frac{1}{10}$  باشد زاویه انحراف تقریباً برابر  $6^\circ$  است. بنابراین در آزمایشهای مربوط به آونگ ساده، همواره باید مقدار انحراف  $\frac{1}{10}$  یا کمتر از آن باشد.
- اگر شعاع گلوله و a فاصله نقطه آویز تا مرکز گلوله باشد طول حقیقی آونگ برابر است با

$$l = a + \frac{2}{5} \frac{r^2}{a}$$

هدف آزمایش: تحقیق قوانین آونگ ساده و تعیین شتاب گرانی

روش آزمایش: برای به حرکت درآوردن گلوله آونگ، بدون سرعت اولیه، سرنخی را حلقه کنید و به کنار گلوله بیندازید و بکشید تا گلوله آونگ به اندازه ای که می خواهید منحرف شود. سردیگر نخ را به نقطه ثابتی وصل کنید. اگر نخ را بسوزانید، گلوله آونگ بدون سرعت اولیه رها می شود.

دوره آونگ، زمان بین دو عبور متوالی آونگ از یک طرف وضعیت تعادل است. پس از ۲ یا ۳ نوسان موقعی که آونگ در وضعیت تعادل است زمانسنج را به کار بیاندازید و تعداد n نوسان کامل ( $n \geq 30$ ) را بشمارید و زمانسنج را متوقف کنید. زمان t را به دست آورید و از رابطه  $T = \frac{t}{n}$  دوره آونگ را تعیین کنید.

به جای نخ و سوزاندن آن می توان از یک آهنربای الکتریکی استفاده کرد و گلوله آونگ را که آهنی است به آن چسباند و به مقدار لازم منحرف کرد. موقعی که جریان الکتریسیته قطع شود گلوله

بدون سرعت اولیه رها می شود.

آزمایش الف) طول آونگ را ۱۰۰ سانتیمتر انتخاب کنید و به اندازه های ۶ و ۸ و ۱۰ و ۳۰ سانتیمتر منحرف کنید و هر بار T دوره آونگ را به دست آورید و درستی قانون اول را تحقیق کنید.

مقدار انحراف \ زمان نوسان	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
n نوسان کامل				
یک نوسان کامل				

آزمایش ب) گلوله های مختلفی را که دارای جنسها و اندازه های متفاوتند از نخ آونگ آویزان کنید و با یک طول معین مثلاً ۱۰۰ سانتیمتر دوره ها را به دست آورید و درستی قانون دوم آونگ را تحقیق کنید.

نوع گلوله			
پریود			

آزمایش پ) با یکی از گلوله ها و طولهای مختلف، دوره آونگ را هر بار به دست آورید و در جدول زیر یادداشت کنید. با بررسی اعداد جدول، رابطه بین دوره و طول آونگ را نتیجه گیری کنید.

ترتیب آزمایش	l	n	t	T	T <sup>2</sup>

منحنی نمایش تغییرات l را بر حسب T<sup>2</sup> رسم کنید. شیب خط  $\tan \alpha = \frac{l}{T^2}$  را به دست آورید و از رابطه  $g = 4\pi^2 \tan \alpha$  مقدار شتاب گرانی را پیدا کنید.

## پرسشها

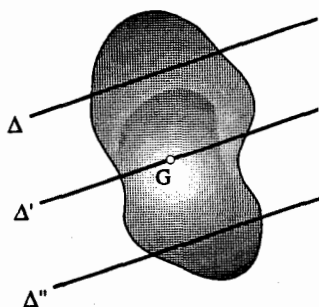
- آیا زمان نوسان یک آونگ در ارتفاعهای مختلف از سطح زمین تغییر می کند، یا خیر، چرا؟
- برای تحقیق قانون چهارم آونگ در آزمایشگاه چه تدبیری می توان اتخاذ کرد؟
- اگر آونگی را از سطح زمین به کره ماه ببریم، دوره آن چه تغییری می کند؟
- در آزمایش تعیین مقدار g خطا را حساب کنید.

# آزمایش ۱۳ = آونگ مرکب، آونگ دو طرفه

## مقدمه

به علت عدم دقت کافی در اندازه گیری طول آونگ ساده، در آزمایشگاهها برای تعیین  $g$  به جای آونگ ساده از آونگ مرکب استفاده می کنند و طول آونگ ساده همزمان با آن را به کار می برند. این روش نخستین بار در سال ۱۸۱۸ به وسیله کاتر به کار رفت و یکی از روشهای دقیق اندازه گیری  $g$  است. ملاحظه شد که دوره آونگ مرکب حول محوری که در فاصله  $a$  از گرانیگاه واقع شده باشد برابر  $T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{Mga}}$  است. گشتاورماند آونگ نسبت به محور آویز را می توان به صورت زیر نوشت:

$$I = I_G + Ma^2$$



شکل ۳۵-۲

مطابق شکل ۲-۳۵ در این رابطه  $I_G$  گشتاورماند آونگ نسبت به محور  $\Delta'$  است که از گرانیگاه گذشته و موازی محور  $\Delta$  باشد و  $Ma^2$  گشتاورماند نقطه ای است نسبت به محور  $\Delta$  به طوری که آن نقطه در گرانیگاه واقع شده و جرم آن برابر جرم آونگ باشد.  $I_G = MK^2$  را به صورت  $I_G = MK^2$  نشان می دهند.  $K$  را شعاع چرخش یا شعاع ژیراسیون گویند، بنابراین

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{MK^2 + Ma^2}{Mga}} = 2\pi\sqrt{\frac{K^2 + a^2}{ag}}$$

طول آونگ ساده که دوره نوسان آن مساوی دوره نوسان  $T$  این آونگ باشد به طول آونگ ساده همزمان با آونگ مرکب موسوم است و مقدار آن برابر است با

$$l = \frac{a^2 + K^2}{a} = a + \frac{K^2}{a}$$

اگر در طرف دیگر آونگ، محور  $\Delta''$  را طوری انتخاب کنیم که  $\Delta$  و  $\Delta''$  به موازات هم و در صفحه ای شامل  $G$  باشند و زمان نوسان آونگ حول این دو محور با یکدیگر برابر باشند در صورت نشان دادن فاصله محور  $\Delta''$  تا گرانیگاه با  $a'$  می توان نوشت

$$l = a + \frac{K^2}{a} = a' + \frac{K^2}{a'}$$

$$K^2\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a'}\right) = a' - a$$

$$l = a + a' \quad \text{و} \quad aa' = K^2$$

یا

در نتیجه

بنابراین، هرگاه آونگ حول دو محور موازی واقع در دو طرف گرانیگاه و به فواصل غیرمساوی از

آن، به نوسان درآید و دوره حرکت برای هردو یکسان باشد، فاصله دو محور را طول آونگ ساده همزمان با آونگ مرکب گویند به شرط آنکه گرانیگاه روی صفحه‌ای باشد که از دو محور می‌گذرد. در این صورت یکی از محورها را محور آویز و دیگری را محور نوسان گویند.

برای پیدا کردن طول آونگ ساده همزمان با آونگ مرکب، آونگ را حول دو تیغه که به منزله محورها هستند به نوسان در می‌آورند و موقعی که گرانیگاه به یک فاصله از دو محور نیست و دوره نوسان در دو حالت مساوی می‌شود، فاصله دو تیغه مقدار مطلوب است.

چون پیدا کردن این حالت وقت‌گیر است در آزمایشگاه از روش زیر استفاده می‌شود. اگر فاصله گرانیگاه را از دو تیغه به ترتیب با  $a_1$  و  $a_2$  و دوره‌ها را با  $T_1$  و  $T_2$  نشان دهیم خواهیم داشت

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{K^2 + a_1^2}{a_1 g}} \quad \text{و} \quad T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{K^2 + a_2^2}{a_2 g}}$$

پس از حذف  $K$  در این دو رابطه

$$\frac{4\pi^2}{g} = \frac{a_1 T_1^2 - a_2 T_2^2}{a_1^2 - a_2^2}$$

$$\frac{4\pi^2}{g} = \frac{T_1^2 + T_2^2}{2(a_1 + a_2)} + \frac{T_1^2 - T_2^2}{2(a_1 - a_2)}$$

یا

هدف آزمایش: تعیین شتاب گرانی توسط آونگ دو طرفه و بررسی گشتاورمانند اجسام

آزمایش الف) آونگ را روی رأس منشور مثلث القاعده‌ای قرار دهید و آن قدر آن را جابه‌جا کنید تا تعادل برقرار شود. محل رأس منشور، محل گرانیگاه آونگ است. فاصله آن را از دو تیغه دو طرف آونگ اندازه بگیرید و  $a_1$  و  $a_2$  را به دست آورید.  $t$  زمان  $n$  نوسان آونگ را حول هریک از تیغه‌ها با زمانسنج تعیین کنید و از رابطه  $T = \frac{t}{n}$  دوره نوسان را اندازه بگیرید و از رابطه بالا مقدار  $g$  را به دست آورید.

اگر  $T_1$  و  $T_2$  خیلی به هم نزدیک باشند از جمله دوم رابطه بالا می‌توان صرف‌نظر کرد و نوشت

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T_1^2 + T_2^2} \quad \text{یا} \quad g = \frac{4\pi^2 (a_1 + a_2)}{T_1^2 + T_2^2}$$

موقع انجام آزمایش، ابتدا با جابه‌جا کردن پایه، تیغه‌ها را به صورت افقی درآورید و دقت کنید که تیغه کاملاً در شیار قرار گیرد. دیسکی را که روی میله آونگ ثابت شده است ۵ سانتیمتر به ۵ سانتیمتر تغییر محل دهید و هربار دوره آونگ را حول هریک از محورها، به دست آورید. در محلی که دوره‌ها به هم نزدیک می‌شوند، تغییرات یک سانتیمتری به دیسک بدهید و جایی را پیدا کنید که دوره‌ها تقریباً باهم مساوی باشند. با در دست داشتن آنها و ۱ فاصله دو تیغه، از فرمول بالا مقدار  $g$  را به دست آورید. منحنی نمایش تغییرات دوره بر حسب فاصله دیسک از تیغه را برای هریک از محورها روی یک دستگاه محورهاى مختصات رسم کنید. دوره مربوط به نقطه تلاقی دو محور، دوره آونگ ساده همزمان

با آونگ مرکب را نشان می‌دهد. با تعیین این دوره و 1 فاصله دو تیغه مقدار  $g$  را از رابطه  $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$  به دست آورید. دو مقداری را که برای  $g$  به دست آورده‌اید با یکدیگر مقایسه کنید.

آزمایش ب) ابعاد و جرم اجسام هندسی مختلفی را که در اختیار دارید اندازه‌گیری کنید و از روی فرمولهای مربوط گشتاورمانند هرکدام را به دست آورید.

اجسام مذکور را توسط نخ آویزان کنید و توسط زمانسنج، زمان ۲۰ نوسان هرکدام را به دست آورید. فاصله گرانیگاه تا نقطه آویز را اندازه بگیرید و از فرمول  $T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mga}}$  گشتاورمانند اجسام را پیدا کنید. نتایج به دست آمده را در جدول زیر یادداشت کنید.

I از فرمول و محاسبه	I از آزمایش	T دوره	n تعداد نوسانها	T زمان نوسانها	a فاصله	m جرم	نوع جسم

## پرسشها

- ۱- تفاوت آونگ ساده و مرکب چیست؟
- ۲- گشتاورمانند یک جسم به چه عواملی بستگی دارد؟
- ۳- نشان دهید که دوره آونگ مرکبی به شکل مربع به ضلع 1، موقعی که از یک گوشه شروع به نوسان می‌کند از رابطه زیر به دست می‌آید

$$T = 2\pi\sqrt[3]{\frac{I}{mg}}$$

# آزمایش ۱۴ حرکت پرتابی

## مقدمه

نقطه مادی  $M$  در مسیر منحنی شکلی حرکت می‌کند (شکل ۲-۳۶). تصاویر  $M$  روی دو محور مختصات  $M_x$  و  $M_y$  است که روی محورهای  $Ox$  و  $Oy$  حرکت می‌کنند.

در لحظه  $t$  سرعت متحرک  $M$  با بردار  $v$  و شتاب آن با بردار  $a$  نمایش داده می‌شود. در همین لحظه مؤلفه‌های  $v$  یعنی  $v_x$  و  $v_y$  و مؤلفه‌های  $a$  یعنی  $a_x$  و  $a_y$  سرعتها و شتابهای  $M_x$  و  $M_y$  را نشان می‌دهند

$$v = v_x + v_y \quad a = a_x + a_y$$

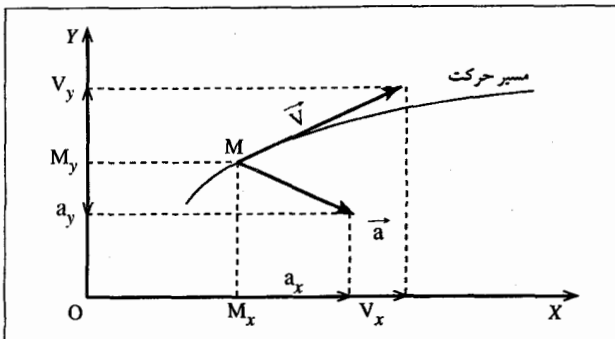
بنابراین با بررسی حرکت تصاویر یک نقطه روی محورهای مختصات، می‌توان حرکت نقطه را در صفحه یا در فضا (سه‌بعدی) مورد مطالعه قرار داد.

حرکت پرتابی در خلأ - گلوله‌ای با سرعت اولیه  $v_0$  از نقطه  $O$  که به‌عنوان مبدأ مختصات انتخاب می‌شود، تحت زاویه  $\alpha$  با سطح افقی، پرتاب می‌شود.

اگر نیرویی به گلوله وارد نشود، دارای حرکت مستقیم‌الخط یکنواخت خواهد بود که تصاویر آن روی محور  $x$  برابر  $v_0 \cos \alpha$  و روی محور  $y$  برابر  $v_0 \sin \alpha$  است. ولی پرتابه تحت اثر نیروی گرانش زمین است (وزن گلوله) و دارای شتابی در امتداد قائم در خلاف جهت مثبت انتخابی محور  $y$  است. در نتیجه  $a_y = -g$  و در ضمن  $a_x = 0$  است.

بنابراین معادلات حرکت پرتابه به‌صورت زیر خواهد بود

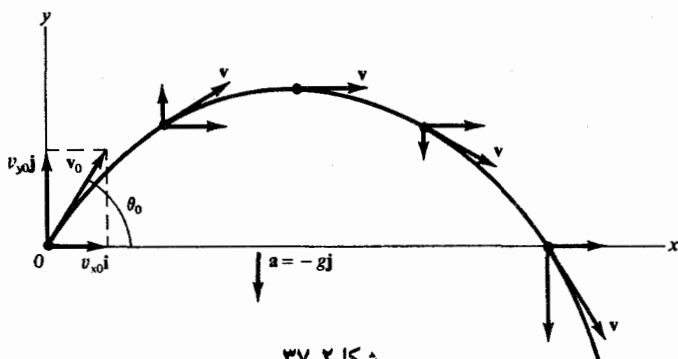
$$x = v_0 \cos \alpha \cdot t \quad , \quad y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 \sin \alpha \cdot t$$



t را در دو معادله بالا حذف می‌کنیم، معادله مسیر حرکت به دست می‌آید

$$y = x \tan \alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}$$

این معادله نشان می‌دهد که مسیر حرکت پرتابه سهمی است، (شکل ۲-۳۷).



شکل ۲-۳۷

پرتابه پس از مدتی در نقطه  $O'$  به افق مبدأ پرتاب می‌رسد. فاصله  $OO'$  را برد افقی گلوله نامند.

در معادله مسیر به ازای  $y = 0$  خواهیم داشت

$$x = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$$

حالت خاص - اگر پرتابه در امتداد افقی با سرعت اولیه  $v_0$  رها شود،  $\alpha = 0$  است. معادلات

حرکت و معادله مسیر به صورت زیر در می‌آیند

$$x = v_0 t, \quad y = -\frac{1}{2}gt^2, \quad y = \frac{-gx^2}{2v_0^2}$$

معمولاً در این حالت جهت محور  $y$  ها را به طرف پایین انتخاب می‌کنند، در نتیجه

$$y = \frac{gx^2}{2v_0^2}$$

هدف آزمایش: بررسی حرکتهای پرتابی در امتداد افقی و تحت زاویه  $\alpha$  با سطح افقی

(الف) حرکت پرتابی تحت زاویه  $\alpha$

شرح دستگاه - دستگاه مطابق شکل ۲-۳۸ استوانه‌ای است که روی پایه‌ای سوار شده است.

پایه با دو پیچ به میز محکم می‌شود. داخل استوانه پیستونی است که به دسته‌ای وصل است. در طرف دیگر پیستون گلوله کوچکی (به قطر یک سانتیمتر) را قرار می‌دهند. موقعی که دسته به طرف جلو کشیده می‌شود، پیستون از گلوله فاصله می‌گیرد و هنگام برگشت ضربه‌ای به آن می‌زند.

روی پیستون نزدیک به دسته، سه شیار وجود دارد و اهرمی شبیه ماشه تفنگ می‌تواند در یکی از شیارها قرار گیرد و پیستون را در همان حالت نگه‌دارد. اگر ضربه‌ای به اهرم بخورد، پیستون آزاد

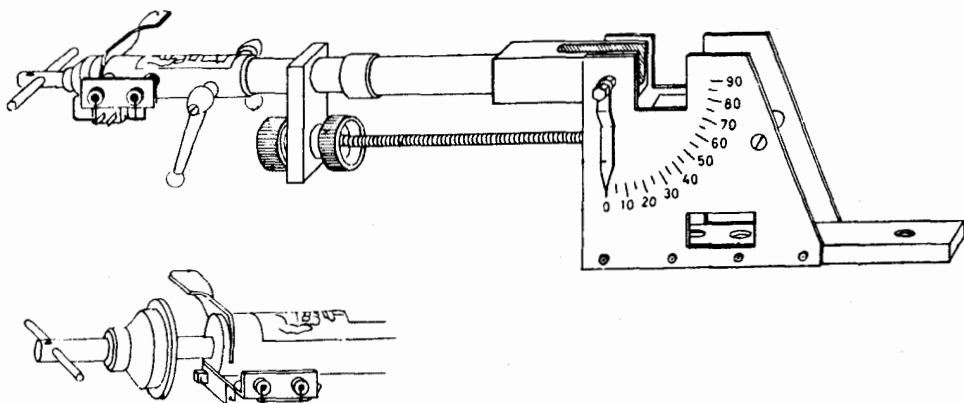
می‌شود و به گلوله برخورد می‌کند و سرعت اولیه‌ای به آن می‌دهد. چون سه شیار وجود دارد، می‌توان گلوله را با سه سرعت اولیه مختلف پرتاب کرد.

میله رزوه‌داری به استوانه مربوط است و توسط ۲ مهره زاویه پرتاب را تغییر می‌دهد. در بدنه پایه در دو طرف، صفحات مدرجی هستند که در هر طرف آن عقربه‌ای نصب شده است و می‌توان زاویه پرتاب را اندازه گرفت.

روش آزمایش: دسته را به جلو بکشید و اهرم را در شیار اول قرار دهید. مهره‌ها را شل کنید و عقربه صفحه مدرج را روی  $30^\circ$  تنظیم کنید. سپس هردو مهره را سفت کنید به طوری که زاویه پرتاب روی  $30^\circ$  ثابت بماند. در مقابل دستگاه، صفحه‌ای که با گرانیگاه گلوله در یک تراز باشد بگذارید و روی آن صفحه‌ای کاغذ سفید و یک برگ کاربن روی کاغذ قرار دهید.

پس از گذاشتن گلوله، در جای مخصوص خود، در طرف دیگر پیستون، با انگشت اهرم را به سرعت آزاد کنید. گلوله پس از طی مسیر سهمی شکلی روی صفحه کاغذ فرود می‌آید که محل فرود به وسیله کاربن مشخص می‌شود. فاصله بین جای اولیه گلوله و محل فرود را که برد پرتابه است اندازه‌گیری کنید. همین عمل را با شیارهای دوم و سوم انجام دهید و هر بار برد را اندازه بگیرید. زاویه پرتاب را تا  $80^\circ$  هر بار  $5^\circ$  تغییر دهید و برای هر کدام با سه سرعت اولیه گلوله را پرتاب کنید و بردها را به دست آورید. نتایج حاصل را در جدول زیر یادداشت کنید.

برد گلوله زاویه پرتاب	با سرعت اولیه $v_1$	با سرعت اولیه $v_2$	با سرعت اولیه $v_3$





منحنیهای نمایش تغییرات برد گلوله برحسب زاویه  $\alpha$  را رسم و تحقیق کنید که برد پرتابه با زاویه پرتاب  $45^\circ$  بیشترین مقدار خود را دارد.

### ب) حرکت پرتابی در امتداد افقی

**شرح دستگاه -** دستگاه مطابق شکل (۲-۳۹) سطح شیب‌داری است چوبی به شکل ربع دایره که روی پایه‌ای سوار شده است. اگر گلوله‌ای به جرم  $m$  در نقطه  $A$  قرار گیرد نسبت به سطح  $BC$  دارای انرژی پتانسیلی به اندازه  $E_p = mgh$  است. موقعی که از آن نقطه بدون سرعت اولیه رها می‌شود، به تدریج از انرژی پتانسیل گلوله کاسته و به انرژی جنبشی اضافه می‌شود. گلوله علاوه بر حرکت لغزشی، حرکت دورانی نیز دارد، در نتیجه دونوع انرژی جنبشی خواهد داشت. در نقطه  $C$  می‌توان نوشت

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

در این رابطه  $\omega$  سرعت زاویه‌ای و  $v$  سرعت خطی گلوله در نقطه  $C$  و  $I$  گشتاورمانند آن است. گشتاورمانند کره توپر  $I = \frac{2}{5}mR^2$  و  $\omega = \frac{v}{R}$  است. بنابراین

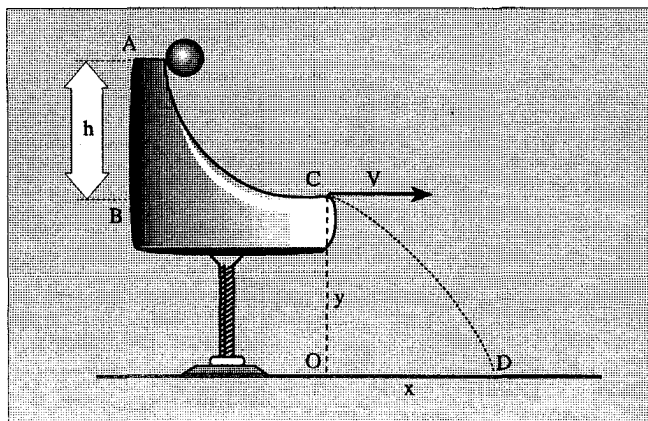
$$v = \sqrt{\frac{10gh}{7}} \quad \text{یا} \quad mgh = \frac{7}{10}mv^2$$

گلوله با این سرعت در امتداد افقی پرتاب می‌شود و در نقطه  $D$  به سطح می‌ز برخورد می‌کند.

در رابطه  $y = \frac{gx^2}{2v^2}$  به جای  $v$  سرعت گلوله در نقطه  $C$  را قرار می‌دهیم. پس  $y = \frac{vx^2}{20h}$  و در

نتیجه برد گلوله برابر است با

$$x = \sqrt{\frac{20hy}{v}}$$



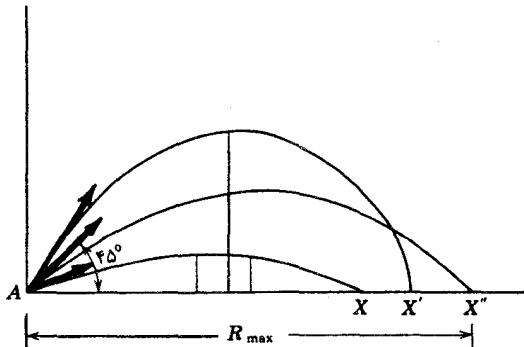
شکل ۲-۳۹

روش آزمایش: دستگاه را طوری میزان کنید که سطح BC آن کاملاً افقی و تراز باشد. گلوله را در بالای سطح شیبدار به شکلی قرار دهید که گرانیکه آن در راستای لبه بالایی سطح باشد. خطکش کوچکی را زیر گلوله بگذارید و آن را بکشید تا گلوله رها شود و در ضمن سرعت اولیه‌ای به آن داده شود. گلوله پس از ترک سطح، در نقطه D، که مانند آزمایش قبل به وسیله کاربن مشخص می‌شود، به سطح زمین برخورد می‌کند. OD برد افقی گلوله در حرکت پرتابی است. O محل برخورد قائم نقطه ترک گلوله (C) با سطح میز است. فواصل  $AB = h$  و  $OD = x$  و  $CO = y$  را اندازه‌گیری کنید. مقادیر  $h$  و  $x$  را در فرمول  $x = \sqrt{\frac{2^0 hy}{v}}$  قرار دهید و مقدار برد را حساب کنید. آیا مقدار برد که از راه آزمایش و اندازه‌گیری به دست آمده است با مقدار حاصل از راه فرمول و محاسبه یکسان است؟ اگر تفاوتی دارد علت آن را بیان کنید.

آزمایش را با ۳ گلوله با جرمهای مختلف تکرار کنید و برای هر کدام مقدار برد را به دست آورید. با اینکه رابطه  $x = \sqrt{\frac{2^0 hy}{v}}$  مستقل از جرم است و باید همواره به نتایج یکسانی برسید، ملاحظه می‌شود که در آزمایش مقادیر یکسانی به دست نمی‌آید. علت آن را شرح دهید.

## پرسشها

- ۱- حرکت پرتابی در امتداد قائم چگونه است؟
- ۲- اگر دو گلوله را در یک محل از ارتفاعهای یکسان پرتاب کنیم به طوری که سرعت اولیه هر دو مساوی باشد ولی یکی از آنها در امتداد قائم به طرف پایین و دیگری در امتداد افقی پرتاب شوند، زمان رسیدن آنها به زمین با یکدیگر چه رابطه‌ای دارند؟ چرا؟
- ۳- با صرف نظر کردن از مقاومت هوا، منحنیهای شکل ۲ - ۴۰ را که مسیرهای پرتابه‌ای هستند، تفسیر کنید.



شکل ۲-۴۰

# آزمایش ۱۵ ضربه و برخورد

## مقدمه

بنابر تعریف، اندازه حرکت خطی یک نقطه مادی، در هر لحظه برابر است با جرم آن نقطه در بردار سرعت لحظه‌ای آن

$$p = mv$$

اندازه حرکت یک جسم برابر است با برابند اندازه حرکت‌های اجزای آن، در صورتی که سرعت تمام نقاط جسم مساوی باشند، اندازه حرکت جسم در هر لحظه با حاصل ضرب جرم جسم در سرعت لحظه‌ای آن برابر خواهد شد

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n$$

قانون دوم نیوتون را به صورت زیر می‌توان نوشت

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} \quad \text{یا} \quad F \cdot dt = mdv$$

اگر دستگاه بسته یا منزوی باشد یعنی دو یا چند ذره به یکدیگر مربوط و تحت اثر نیروهای خارجی نباشند  $\sum F = 0$  و در نتیجه  $mdv = 0$ . بنابر این تغییرات اندازه حرکت‌های یک دستگاه منزوی برابر صفر است یا به عبارت دیگر، مجموع اندازه حرکت‌های هر دستگاه منزوی، مقداری است ثابت.

موقعی که دو یا چند ذره به هم برخورد کنند، در لحظه برخورد، نیروهای ایجاد شده به اندازه‌ای بزرگند که از کلیه نیروهای دیگری که اعمال می‌شوند، می‌توان چشمپوشی کرد و اثر آنها را در نظر نگرفت و دستگاه را منزوی دانست. در این حالت قانون بقای اندازه حرکت در مورد آنها صدق می‌کند.

جسم A به جرم  $m$  با سرعت  $v$  حرکت می‌کند و جسم B به جرم  $m'$  با سرعت  $v'$  در حرکت است. این دو جسم به هم برخورد می‌کنند. سرعت آنها پس از برخورد  $v$  و  $v'$  می‌شود. مطابق اصل بقای اندازه حرکت می‌توان نوشت

$$mv + m'v' = mv + m'v'$$

بدیهی است در صورتی که امتداد سرعتها یکی باشد، مجموع برداری به مجموع جبری تبدیل می‌شود

$$mv + m'v' = mv + m'v'$$

ضریب بازگشت - در صورتی که سرعت‌های دو جسم قبل و بعد از برخورد در یک امتداد باشند نسبت سرعت نسبی دو جسم بعد از برخورد به سرعت نسبی آنها قبل از برخورد (با علامت منفی) را ضریب بازگشت می‌نامند

$$e = \frac{v - v'}{v_0 - v'_0}$$

اگر  $e = 1$  باشد برخورد را الاستیک و اگر  $e = 0$  باشد آن را غیرالاستیک گویند. در برخورد الاستیک مجموع انرژیهای جنبشی دستگاه قبل از برخورد برابر است با مجموع انرژیهای آن پس از برخورد

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}m'v'^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}m'v'^2$$

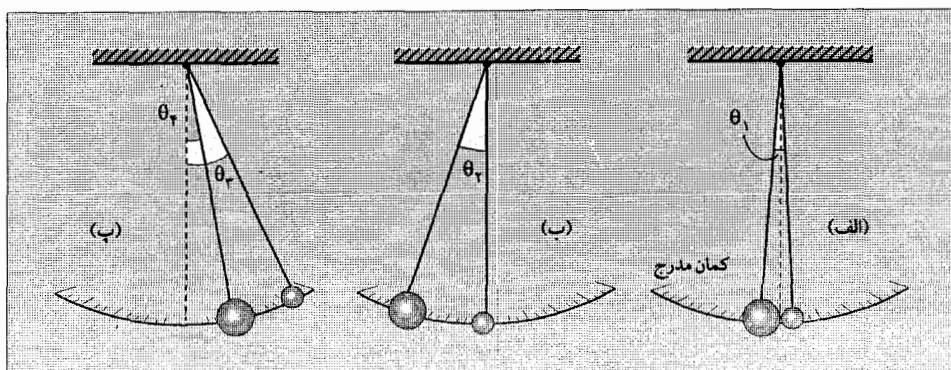
درحالی که در مورد برخورد غیرالاستیک، قانون بقای انرژی جنبشی صادق نیست. ممکن است از انرژی جنبشی مقداری کاسته شود و به انرژی گرمایی یا انرژی پتانسیل وابسته به تغییر شکل تبدیل شود. یا اینکه انرژی جنبشی پس از برخورد، بیشتر از انرژی جنبشی قبل از برخورد باشد، مانند برخوردی که در آن انرژی پتانسیل آزاد می شود.

هدف آزمایش: بررسی برخوردهای الاستیک و غیرالاستیک و قوانین بقای اندازه حرکت و انرژی در مورد آنها.

وسایل آزمایش: کمان مدرج - دو گلوله بزرگ و کوچک - استوانه برنجی با موم - نخ.

روش آزمایش

الف) برخورد الاستیک. گلوله ها را وزن کنید و مطابق شکل ۲ - ۴۱ (الف)، آنها را توسط نخ به نقطه O بیاویزید، به طوری که محل تماس دو گلوله روی صفر کمان مدرج باشد. زاویه بین دو نخ در این حالت  $\theta_1$  است. گلوله بزرگ را به اندازه  $\theta_1$  منحرف بدون سرعت اولیه آن را رها کنید (شکل ۲ - ۴۱ ب). برای اینکه گلوله سرعت اولیه نداشته باشد یا باید آن را با نخ ببنیدید و نخ را بسوزانید تا گلوله رها شود، یا اینکه در محل مورد نظر یک آهنربای الکتریکی قرار دهید و گلوله را آهنی انتخاب کنید تا جذب آن شود. با قطع جریان برق گلوله از حال سکون بدون سرعت اولیه رها می شود. گلوله بزرگ به گلوله کوچک برخورد می کند و هر دو منحرف می شوند. پس از انحراف، زاویه های گلوله ها با صفر کمان برای گلوله بزرگ و گلوله کوچک به ترتیب  $\theta_1$  و  $\theta_2$  می شود (شکل ۲ - ۴۱ پ).



1 طول نخ و مقادیر زاویه‌ها را به دقت اندازه بگیرید و از فرمولهای زیر سرعت هرکدام را به دست آورید

$$v_1 = \sqrt{2gl(\cos\theta_1 - \cos\theta_p)}$$

سرعت گلوله بزرگ قبل از برخورد

$$v'_1 = 0$$

سرعت گلوله کوچک قبل از برخورد

$$v = \sqrt{2gl(\cos\theta_1 - \cos\theta_p)}$$

سرعت گلوله بزرگ پس از برخورد

$$v = \sqrt{2gl(1 - \cos\theta_p)}$$

سرعت گلوله کوچک پس از برخورد

اعداد حاصل را در جدول زیر یادداشت کنید و ضریب بازگشت را به دست آورید.

ترتیب آزمایش	$m_1$	$m_2$	$l$	$\theta_1$	$\theta_2$	$v_1$	$v'_1$	$\theta_1$	$\theta_2$	$v$	$v'$	$e$

با داشتن سرعت و جرم گلوله‌ها اندازه حرکتها و انرژی جنبشی گلوله‌ها را پیش از برخورد و پس از برخورد حساب کنید.

$m_1 v_1 + m_2 v'_1$	$m_1 v + m_2 v'$	$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v'^2$	$\frac{1}{2} m_1 v^2 + \frac{1}{2} m_2 v'^2$

ب) برخورد غیرالاستیک. قطعه‌ای موم به یکی از قاعده‌های استوانه برنجی بچسباند. استوانه و یکی از گلوله‌ها را آویزان کنید. گلوله را به استوانه بچسباند و نشانه روی بدنه استوانه را جابه‌جا کنید تا در حالت آزاد روی صفر کمان قرار گیرد، (شکل ۲ - ۴۲ الف). در حقیقت امتداد گرانیگاه دستگاه روی صفر کمان است. گلوله را از استوانه برنجی جدا کنید. استوانه قدری منحرف می‌شود و نشانه با صفر کمان زاویه کوچکی مانند  $\theta_1$  تشکیل می‌دهد (شکل ۲ - ۴۲ ب).

در این حالت استوانه را با دست نگه‌دارید. گلوله را دوباره به آن بچسباند و  $\theta_p$  و زاویه بین امتداد نخ و صفر کمان را بخوانید (شکل ۲ - ۴۳ الف) و سپس گلوله را به اندازه زاویه  $\theta_p$  منحرف کنید (شکل ۲ - ۴۳ ب). گلوله را بدون سرعت اولیه رها کنید. گلوله به استوانه می‌چسبد و هردو باهم منحرف می‌شوند. زاویه بین نشانه و صفر کمان برابر  $\theta_p$  است.

$m_1$  و  $m_2$  جرمهای استوانه و گلوله و  $l$  طول نخ از مرکز آویز تا گرانیگاه گلوله را اندازه‌گیری کنید.

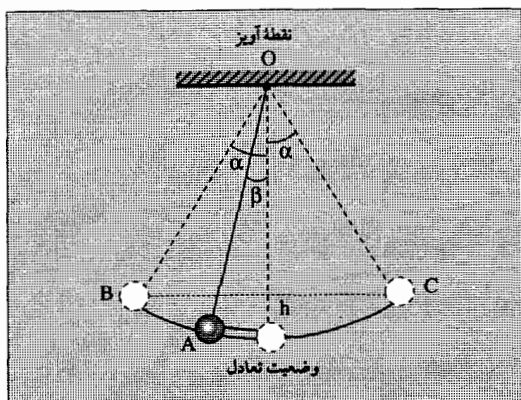


$m_1 v_1 + m_2 v_2$	$(m_1 + m_2) v$	$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2$	$\frac{1}{2} (m_1 + m_2) v^2$

## پرسشها

- ۱- در آزمایشهای بالا آیا می‌توان به جای سرعت، زاویه انحراف را به کار برد؟
- ۲- اگر جسمی به جرم  $2m$  با سرعت  $v$  به جسم ساکنی به جرم  $m$  برخورد کند و برخورد الاستیک باشد جسم دوم با چه سرعتی به حرکت درمی‌آید؟
- ۳- ضریب بازگشت را تعریف کنید.
- ۴- با توجه به شکل ۲-۴۴ ثابت کنید که اگر گلوله‌ای از نقطه  $A$  به نقطه  $B$  یا  $C$  برود به طوری که فاصله قائم آنها از یکدیگر در دو حالت برابر  $h$  باشد، سرعت در نقطه  $B$  یا  $C$  از رابطه زیر به دست می‌آید

$$v = \sqrt{2gl(\cos \beta - \cos \alpha)}$$



شکل ۲-۴۴

# ۳ مکانیک مایعات

## آزمایش ۱۶ = بررسی فشار سیالات ساکن

### مقدمه

سیال یا شاره حالتی از جسم است که به سهولت تغییر شکل می‌یابد و برخلاف اجسام صلب که فاصله ذرات آنها از یکدیگر ثابت است، فاصله بین ذرات شاره تغییر می‌یابد و شکل ثابت و معینی ندارند. شاره‌ها شامل گازها، بخارها و مایعات هستند. اختلاف اساسی بین مایع و گاز در قابلیت تراکم آنها و در حقیقت نیروی اتصال بین مولکولهای تشکیل دهنده آنهاست.

کم شدن حجم مایع بر اثر فشار به مقدار خیلی کم، در اثر فشار زیاد میسر است، در صورتی که در گازها، نیروی اتصال بین مولکولها بسیار کم و ناچیز است، به طوری که می‌توان هر مولکول را بدون بستگی با دیگری فرض کرد. فاصله مولکولها نسبت به ابعاد آنها بسیار بزرگ است، از این رو موقعیت و حرکت آنها نامنظم بوده و دارای حجم و شکل ثابتی نیستند.

مطابق شکل ۳-۱، حجم کوچکی از مایع را در نظر می‌گیریم. سطح آن  $A$  و ضخامتش  $\Delta z$  است. جرم این مایع  $\rho A \Delta z$  و وزن آن  $\rho g A \Delta z$  است.

نظر به اینکه مایع ساکن است، برابری نیروهای وارد بر آن صفر است و نیروهایی که در یک سطح هستند و به اطراف جسم وارد می‌شوند دوه‌دو در مقابل هم قرار می‌گیرند و اثر یکدیگر را خنثا می‌کنند. نیروهایی که در امتداد قائم وارد می‌شوند عبارتند از

۱-  $PA$  نیروی وارد از پایین به بالا که در آن  $P$  فشاری است که مولکولهای پایین به این قسمت مایع وارد می‌کنند.

۲-  $(P + \Delta P)A$  نیروی وارد از بالا به پایین که در آن  $P + \Delta P$  فشاری است که مولکولهای قسمت بالا به این قسمت مایع وارد می‌کنند.

۳- نیروی وزن مایع مورد نظر که برابر  $\rho g A \Delta z$  است.

در حالت تعادل می‌توان نوشت

$$PA - (P + \Delta P)A - \rho g A \Delta z = 0$$



جهت مثبت به طرف بالا فرض شده است. بنابراین

$$\Delta P = -\rho g \Delta z$$

اگر فشار وارد بر سطوحی به ارتفاعهای  $z_1$  و  $z_2$  نسبت به مبدأ  $P_1$  و  $P_2$  باشد، می‌توان نوشت

$$P_2 - P_1 = -\rho g(z_2 - z_1)$$

اگر فشار مایع بر سطح مایع را با  $P_a$  نشان دهیم فشار نقطه‌ای که به فاصله  $h$  از سطح مایع واقع شده برابر است با

$$P = P_a + \rho gh$$

شکل ۱-۳

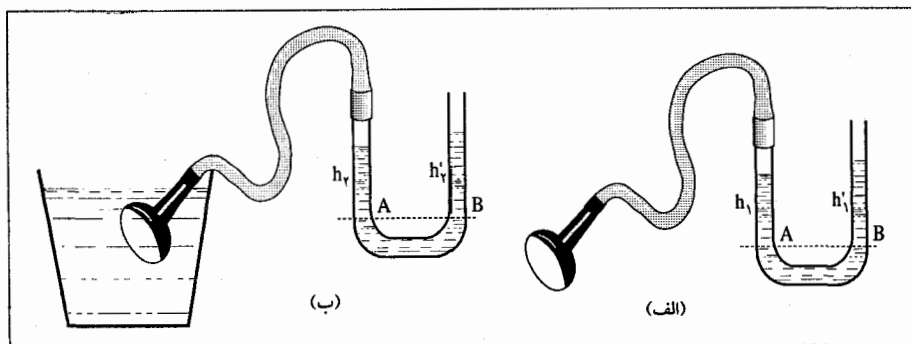
**شرح دستگاه -** برای تعیین فشار در مایعات، از وسیله‌ای به نام فشارسنج مایعات استفاده می‌شود. دستگاه لوله‌ای شیشه‌ای به شکل U است که توسط شیلنگ لاستیکی به قیفی متصل است و دهانه قیف با پوست یا پلاستیک نازکی پوشیده شده است.

در داخل لوله U شکل، مایعی ریخته شده است. اگر فشار وارد بر سطوح مایع در دو شاخه یکسان باشد، مطابق قانون ظروف مرتبط سطح آنها یکسان خواهد بود. ولی به یک طرف هوای آزاد و طرف دیگر هوای محبوس فشار وارد می‌کنند که معمولاً هوای محبوس قدری متراکم‌تر و فشار آن کمی بیشتر است. در نتیجه اختلاف سطح کوچکی در دو شاخه به وجود می‌آید.

در شکل ۲-۳ (الف) که قیف خارج مایع قرار دارد ارتفاع مایع طرفین لوله از یک سطح فرضی که به عنوان مبدأ انتخاب شده است  $h_1$  و  $h'_1$  است. چون نقاط واقع در یک سطح در حال تعادل دارای فشار یکسان هستند، در مورد نقاط A و B واقع در سطح فرضی می‌توان نوشت

$$\rho gh_1 + P' = \rho gh'_1 + P_a$$

در این رابطه  $P'$  فشار هوای محبوس در سمت چپ،  $P_a$  فشار هوا در سمت راست، و  $\rho$  جرم حجمی



شکل ۲-۳

مایعی است که در لوله U شکل قرار دارد.

اگر فشاری به پوسته قیف وارد شود، سطح مایع داخل لوله در سمت چپ متناسب با فشار وارده پایین می آید و در سمت راست بالا می رود. موقعی که قیف را درون مایعی قرار دهیم که فشار حاصل از مایع در محل قیف  $P$  باشد، در این حالت خواهیم داشت

$$\rho g h_p + P' + P = \rho g h'_p + P_a$$

دو رابطه فوق را از هم کم می کنیم، نتیجه می شود

$$P + \rho g (h_p - h_a) = \rho g (h'_p - h'_a)$$

هدف آزمایش: اندازه گیری فشار آب یا هر مایع دیگری در عمقهای مختلف.

روش آزمایش: موقعی که قیف فشارسنج خارج مایع است ارتفاعهای  $h_a$  و  $h'_a$  را اندازه گیری کنید. سپس قیف را در مایع مورد نظر در ارتفاعهای مختلف خواسته شده قرار دهید و برای هر کدام  $h_p$  و  $h'_p$  را به دست آورید.  $\rho$  جرم حجمی مایع درون لوله و  $g$  شتاب گرانی در محل آزمایش است. با توجه به فرمول، فشار مایع را در ارتفاعهای مختلف محاسبه و اعداد حاصل را در جدول زیر یادداشت کنید.

$h_a$	$h'_a$	$h_p$	$h'_p$	$\rho$	$g$	$P$

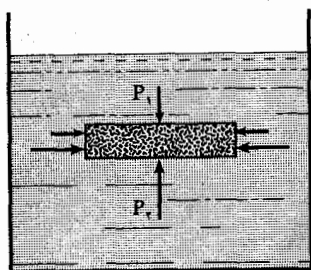
### پرسشها

- ۱- مزایا و معایب جیوه در فشارسنج را نسبت به مایعات دیگر شرح دهید.
- ۲- در فرمول بالا اگر بخواهیم فشار بر حسب پاسکال باشد واحد کمیتهای دیگر چگونه باید باشند؟

# آزمایش ۱۷ قانون ارشمیدس

## مقدمه

مطابق شکل ۳-۳، حجمی از مایع را درون آن در نظر می‌گیریم. از طرف مولکولهای مجاور، به این حجم فرضی مایع، نیروهای وارد می‌شود که فشار حاصل از آنها، برای یک فاصله معین از سطح آزاد مایع، ثابت است. در نتیجه مؤلفه‌های افقی فشارهایی که به آن وارد می‌شوند اثر یکدیگر را خنثا می‌کنند. مؤلفه‌های قائم فشار به علت اختلاف ارتفاع قسمت پایین و بالای مایع فرضی نمی‌توانند اثر یکدیگر را خنثا کنند. در مورد هر عنصر حجمی کوچکی می‌توان نوشت



$$P_2 = \rho gh_2 + P_a$$

$$P_1 = \rho gh_1 + P_a$$

شکل ۳-۳

$$P_2 - P_1 = \rho g(h_2 - h_1) = \rho g\Delta h$$

چون  $\frac{\Delta F}{\Delta A} = P_2 - P_1$  است که در آن  $\Delta F$  نیروی مؤثر وارد بر عنصر حجمی و  $\Delta A$  سطح مقطع آن است. بنابراین

$$\Delta F = (P_2 - P_1)\Delta A = \rho g\Delta h\Delta A$$

$$\Delta F = \rho g\Delta v$$

یا

برای تمام جسم می‌توان نوشت

$$F = \rho gv = mg$$

اگر به جای این مایع فرضی جسمی به همان شکل و حجم قرار گیرد، نیرویی از پایین به بالا، برابر وزن مایع هم حجم جسم به آن وارد می‌شود که به آن نیروی ارشمیدس گویند. چون نیروی ارشمیدس در خلاف جهت نیروی وزن است باعث سبکی جسم می‌شود و جسم در داخل سیال دارای وزن ظاهری است که برابر است با تفاضل وزن جسم و نیروی ارشمیدس.

## هدف آزمایش: تحقیق قانون ارشمیدس

وسایل آزمایش: ترازو- مایعات مختلف- آب- کولیس- نخ- بشر نسبتاً بزرگ.

آزمایش- گلوله‌ای را به زیر کفه ترازویی ببندید و در کفه دیگر وزنه بگذارید و تعادل را برقرار کنید. بشر/محتوی آب را زیر گلوله طوری قرار دهید تا کاملاً در آب غوطه‌ور شود. تعادل ترازو به هم می‌خورد. در کفه مربوط به گلوله وزنه بگذارید و تعادل را دوباره برقرار کنید و مقدار سبک شده را

به دست آورید. آزمایش را با دو نوع مایع دیگر تکرار کنید و هر بار مقدار سبک شده را تعیین کنید. با کولیس، قطر گلوله را به دست آورید و حجم آن را محاسبه کنید. حجم را در جرم حجمی مایع ضرب و حاصل را با مقدار سبک شده مقایسه کنید.

نتایج حاصل را در جدول زیر بنویسید.

وزن مایع هم حجم $v\rho g$	حجم گلوله $v$	قطر گلوله $D$	مقدار سبک شده $mg$	کاهش جرم گلوله $m$	نوع مایع

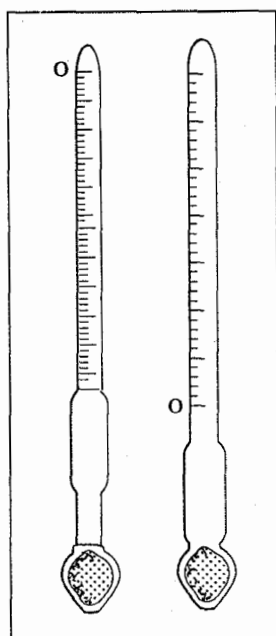
### پرسشها

- ۱- چند مورد از کاربردهای قانون ارشمیدس را ذکر کنید.
- ۲- عکس قانون ارشمیدس را شرح دهید.

## آزمایش ۱۸ = چگالی سنجها

### مقدمه

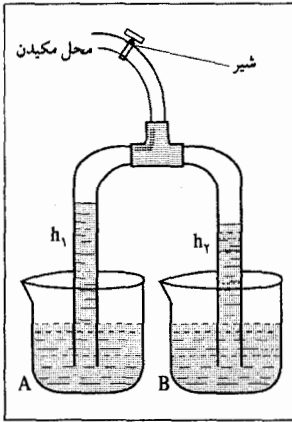
ساختمان چگالی سنجها بر اساس قانون ارشمیدس است. موقعی که وزن مخصوص جسم کمتر از وزن مخصوص مایع باشد، نیروی ارشمیدس بیشتر از وزن جسم است و جسم به طرف بالا رانده و شناور می شود. شرط تعادل اجسام شناور آن است که وزن کل جسم برابر وزن مایع قسمت غوطه ور باشد. در مورد یک جسم هر چه چگالی مایع بیشتر باشد وزن مایع جابه جا شده بیشتر شده و در نتیجه جسم بالاتر می آید و بیشتر از مایع خارج می شود. در صورتی که چگالی مایع کمتر شود جسم در مایع بیشتر فرو می رود.



شکل ۳-۴

چگالی سنج تشکیل شده است از یک لوله شیشه ای نسبتاً بلند که قسمت بالای آن مسدود و از طرف پایین به یک مخزن پر از جیوه یا ساچمه های سربی منتهی است (شکل ۳ - ۴). برای اینکه حجم وسیله بیشتر شود، لوله قسمت بالای مخزن گشادتر است. چگالی سنج طوری درست شده است (پایین بودن گرانیگاه و تنظیم محل آن) که همواره به طور قائم قرار می گیرد و قسمتی از آن خارج مایع باقی می ماند. داخل لوله کاغذ مدرجی چسبانده شده است که مستقیماً چگالی مایع را نشان می دهد. برای مایعات سنگینتر از آب، صفر اسباب در قسمت بالا و برای مایعات سبکتر از آب، صفر اسباب در قسمت پایین قرار گرفته است. برای مایعات سنگینتر از آب، چگالی سنج را معمولاً به صورت بومه درجه بندی می کنند. چگالی سنج را در آب مقطر قرار می دهند و صفر آن را به دست می آورند. سپس آن را در محلول آب و نمک به نسبت ۱۵ گرم نمک و ۸۵ گرم آب قرار می دهند و سطح مایع را روی لوله با عدد ۱۵ مشخص می کنند. بین صفر و ۱۵ را به ۱۵ قسمت مساوی تقسیم و تقسیمات را تا پایین لوله ادامه می دهند. این تقسیمات را درجه بندی بومه گویند و با علامت  $Be'$  نشان می دهند.

تعیین چگالی با استفاده از دستگاه هیر (Hare) - دستگاه مطابق شکل (۳ - ۵) تشکیل شده است از دو لوله شیشه ای که از قسمت بالا توسط شیلنگ لاستیکی به یک سه راهی وصل شده است و سه راهی به یک شیر مربوط می شود. یکی از لوله ها را داخل ظرف A محتوی مایع مورد نظر و دیگری را داخل ظرف B محتوی آب می کنند و از بالا، هوای داخل لوله ها را می مکند. مایعات در لوله ها بالا می روند به طوری که می توان نوشت



شکل ۵-۳

$$\rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2$$

چون برای آب  $\rho_2 = 1$  است نتیجه می شود

$$\rho_1 = \frac{h_2}{h_1}$$

هدف آزمایش: بررسی ساختمان چگالی سنجها و کاربرد آنها

آزمایش - لوله ها را به طور قائم در مایعات فرو برید، شیر را باز کنید، هوای درون لوله را بکشید، شیر را ببندید و  $h_1$  و  $h_2$  را اندازه بگیرید. آزمایش را چند مرتبه تکرار و مقادیر  $h_1$  و  $h_2$  را یادداشت کنید.

$h_1$	
$h_2$	

مقادیر  $h_1$  را روی محور x و مقادیر  $h_2$  را روی محور y منتقل کنید. نمودار تغییرات  $h_2$  بر حسب  $h_1$  را رسم کنید. شیب خط، چگالی مایع مورد نظر است.

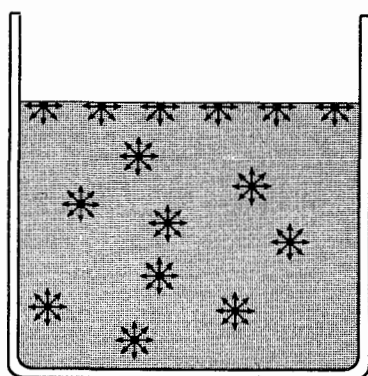
### پرسشها

- ۱ - چرا بعضی از اجسام در برخی از مایعات فرو نمی روند؟ علت را شرح دهید.
- ۲ - شرط تعادل اجسام شناور چیست؟

# آزمایش ۱۹ کشش سطحی

## مقدمه

توزیع مولکولهای مایع به طور اتفاقی است ولی با توجه به زیادی تعداد مولکولها، توزیع متوسط آنها را می توان یکنواخت فرض کرد. مولکولهای داخلی مایعات در فاصله خیلی نزدیک روی یکدیگر نیروی جاذبه ای وارد می کنند که مقدار آن مطابق قانون گرانش عمومی با جرم آنها نسبت مستقیم و با مجذور فاصله نسبت معکوس دارد. اگر مولکولی را داخل مایع در نظر بگیریم، برآیند نیروهایی که مولکولهای مجاور به آن وارد می کنند صفر است، زیرا مولکولهای مجاور دو به دو در یک راستا و در دو جهت مخالف هم قرار گرفته و اثر یکدیگر را خنثا می کنند (شکل ۳-۶).



شکل ۳-۶

برآیند نیروهای وارد بر یک مولکول واقع در سطح مایع صفر نیست چون از اثر مولکولهای هوا که ناچیزند چشمپوشی شده است و نیروی دیگری وجود ندارد تا بتواند با نیروهایی که از طرف مولکولهای داخل مایع بر مولکولهای سطحی وارد می شود مقابله و اثر آنها را خنثا کند. لذا برآیند نیروهای وارد از سوی مولکولهای پایین بر سطح مایع عمود و جهت آن به طرف داخل مایع است. این نیرو را، نیروی کشش سطحی گویند. کیفیت فوق باعث می شود که سطح آزاد مایعات اولاً کمترین مساحت ممکن را دارا باشد و ثانیاً از طرف این سطح مانند یک غشاء لاستیکی فشاری بر لایه های زیرین مایع وارد شود.

برای اینکه مولکول داخلی را به سطح مایع بیاوریم، یا به عبارت دیگر برای افزودن به سطح مایع باید کاری انجام دهیم، این کار به صورت انرژی پتانسیل در آن مولکول ذخیره می شود. می توان گفت که مولکولهای سطحی مایع، مقداری انرژی اضافی دارند. چون هر گونه ازدیاد سطح مایع به میزان  $\Delta A$  مستلزم صرف انرژی به مقدار  $\Delta W$  است. بنابراین

$$\Delta W = \gamma \Delta A$$

$\gamma$  ضریب تناسب رابطه فوق ضریب کشش سطحی است که به اختصار به آن کشش سطحی نیز می گویند و مقدارش به جنس و دمای مایع بستگی دارد. ملاحظه می شود که کشش سطحی عبارت است از مقدار کار لازم برای ازدیاد سطح مایع به میزان واحد سطح. در سطح مایع، یک عنصر سطحی کوچک به شکل مستطیل به طول  $l$  و عرض  $\Delta x$  در نظر می گیریم. در نتیجه

$$\gamma = \frac{\Delta W}{\Delta x \cdot l} \quad \text{یا} \quad \Delta W = \gamma \cdot l \cdot \Delta x$$

با در نظر گرفتن اینکه مقدار کار برابر حاصل ضرب نیرو در جابه‌جایی است، یعنی

$$\Delta W = F \cdot \Delta x$$

$$\gamma = \frac{F}{L}$$

می‌توان نوشت

به عبارت دیگر کشش سطحی، برابر است با نسبت نیروی سطحی  $F$  بر طول خطی که در نقاط مختلف آن و در امتداد عمود بر خط، بر آن خط اثر می‌کند. واحد کشش سطحی در دستگاه c.g.s عبارت است از دین بر سانتیمتر و در SI نیوتون بر متر.

هدف آزمایش: درک مفهوم کشش سطحی و اندازه‌گیری ضریب کشش سطحی آب.

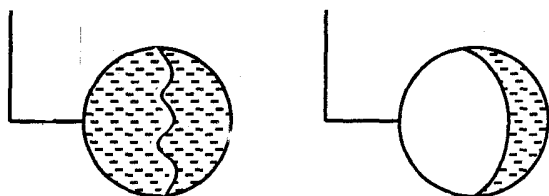
### الف) مشاهده کشش سطحی

به علت نیروی کشش سطحی، ذرات گرد و غباری که جرم حجمی آنها بیشتر از آب است اغلب در سطح آب پراکنده می‌شوند و به داخل آن فرو نمی‌روند. سوزن چرب در سطح آب باقی می‌ماند و بعضی از حشرات در سطح آب راه می‌روند یا لارو آنها روی آب به طور شناور می‌ماند.

آزمایش الف) یک تیغ صورت تراشی یا سوزن را با احتیاط در سطح آب قرار دهید. به طور شناور روی آب می‌ماند و فرو نمی‌روند. اگر فشار خفیفی به آنها بدهید در آب غوطه‌ور می‌شوند.

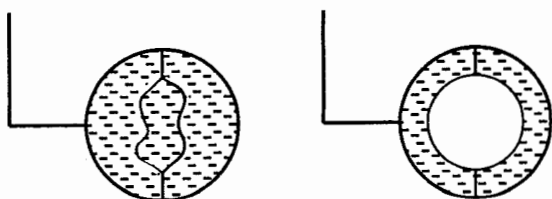
آزمایش ب) مطابق شکل ۳-۷ دو سر نخ را به حلقه سیمی وصل و آن را وارد محلول گلیسیرینی صابون کنید. لایه نازکی از کف صابون، قسمت داخلی حلقه را می‌پوشاند و نخ به شکل نامشخصی درمی‌آید. اگر لایه صابون را در یک طرف سوراخ کنید، لایه در طرف دیگر طوری جمع می‌شود که سطح آن به حداقل مقدارش برسد. در این صورت نیروهای کشش سطحی که در امتداد مماسهای سطح لایه، متوجه قسمت داخلی هستند، نخ را به حالت کشیده نگه می‌دارند.

همچنین اگر حلقه نخ را توسط دو تکه نخ، مطابق شکل ۳-۸ به حلقه سیمی وصل و آن را وارد محلول گلیسیرینی صابون کنید، لایه نازک کف صابون در تمام سطح به وجود می‌آید. آن را از محلول خارج کنید، حلقه نخ به طور نامنظم دیده می‌شود. اگر مایع وسط حلقه را پاره کنید، چون



شکل ۳-۷

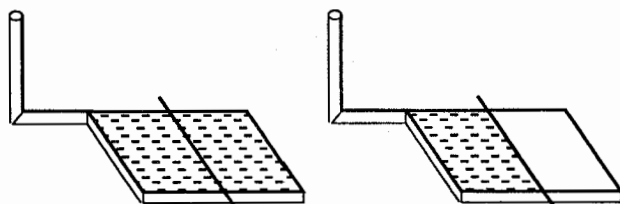




شکل ۸-۳

مایعات دولایه طرفین نخ باید حداقل سطح را دارا باشند از دو طرف نخ را به سوی خود می کشند، در نتیجه نخ به صورت دایره منظمی درمی آید.

آزمایش پ) انتهای سیمی را مطابق شکل ۳ - ۹ به صورت مستطیلی درآوريد و روی آن، سیم مستقیم نازکی را به طور آزاد قرار دهید و مجموعه را داخل محلول گلیسیرینی صابون فرو برید. لایه نازکی درون چهار ضلعی به وجود می آید و سیم آزاد در جای خود ساکن باقی می ماند. لایه صابون را در یک طرف سیم آزاد با انگشت پاره کنید. می بینید که سیم در جهت مخالف حرکت می کند تا سطح لایه دیگر را به حداقل مقدارش برساند.



شکل ۹-۳

ب) اندازه گیری کشش سطحی آب

اگر بر سطح مایع، نیروی دیگری وارد نشود، شکل آن طوری تغییر می کند تا برای حجم معین دارای مینیمم سطح باشد. نظر به اینکه در اجسام هم حجمی که دارای اشکال گوناگونند، کره کمترین سطح را دارد، مایعات به صورت قطره های کروی درمی آیند. مطابق قانون تات، وزن قطره در هنگام سقوط متناسب است با کشش سطحی مایع

$$mg = k \cdot \gamma$$

ضریب  $k$  به شکل لوله ای که قطره از آن خارج شده است و همچنین به شرایط آزمایش بستگی دارد. مقدار  $k$  در بهترین شرایط نزدیک به  $2\pi r$  یعنی محیط خارجی در محل سقوط قطره است. چون قطره در حال سقوط است با توجه به قوانین دینامیک، چسبندگی مایع و سرعت خروج آن مؤثر بوده و جرم قطره نمی تواند در تمام حالتها یکسان باشد. اگر تشکیل قطره به کندی صورت گیرد، قبل از جدا شدن

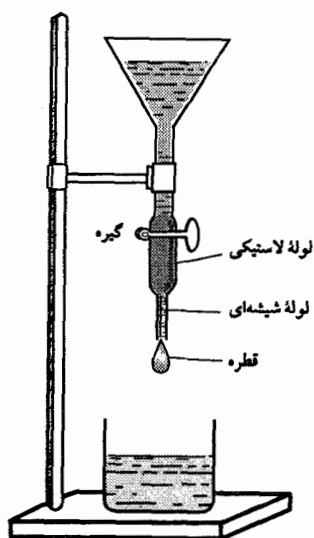
قطره می‌توان حالت پایداری برای آن فرض کرد. برای اینکه این شرط عملی شود، زمان تشکیل قطره باید در حدود یک دقیقه باشد، در این صورت تقریباً جرم قطره‌های گوناگون با هم برابرند و کمی قبل از افتادن قطره، بین نیروهای وارده تعادل برقرار است.

برای قطره‌های در حال سقوط از فرمول تجربی زیر استفاده می‌شود

$$\gamma = \frac{mg}{\Delta r}$$

وسایل آزمایش: قیف - لوله لاستیکی - لوله شیشه‌ای باریک - ظرف - ترازو با وزنه‌های

مربوطه - کولیس - زمانسنج - گیره - آب.



شکل ۳-۱۰

روش آزمایش (الف) دستگاه را مطابق شکل ۳-۱۰ سوار کنید و آب داخل قیف بریزید. با گیره خروج آب را طوری تنظیم کنید که در حدود دقیقه‌ای یک باریک قطره آب سقوط کند.  $m_1$  جرم ظرف کوچکی را به دست آورید و ظرف را زیر لوله شیشه‌ای قرار دهید تا قطرات آب در آن جمع شود. تعداد  $n \geq 30$  قطره در آن جمع کنید و ظرف را دوباره وزن کنید ( $m_2$ ). تفاضل  $m_2 - m_1$  جرم  $n$  قطره است، آن را بر  $n$  تقسیم کنید،  $m$  جرم متوسط یک قطره به دست می‌آید. شعاع لوله را با کولیس اندازه‌گیری کنید و نتایج حاصل را در زیر یادداشت و مقدار  $\gamma$  را حساب کنید.

$m_1$	$m_2$	$n$	$m = \frac{m_2 - m_1}{n}$	$r$	$\gamma = \frac{mg}{\Delta r}$

آزمایش (ب) دستگاه یک پی‌پت مدرج به گنجایش ۵ سانتیمتر مکعب است که به لوله موئین با ضخامت خارجی نسبتاً زیاد و تقریباً مخروطی شکل منتهی می‌شود. دو نشانه روی لوله وجود دارد که حجم آب در آن محل تقریباً معادل ۱۰۰ قطره است.

در پی‌پت یک بار آب و بار دیگر مایع مورد نظر را بریزید و هر دفعه بگذارید که حجم به اندازه بین دو نشانه کمتر شود و  $n$  و  $n'$  تعداد قطرات آب و مایع مورد نظر را موقعی که کاهش حجم  $v$  به اندازه فاصله دو نشانه است بشمارید.

رابطه تات برای هر دو مورد به صورت زیر است

$$mg = k\gamma \quad \text{برای آب}$$

$$m'g = k'\gamma' \quad \text{برای مایع مورد نظر}$$

از تقسیم دو رابطه بر یکدیگر نتیجه می‌شود

$$\frac{m}{m'} = \frac{\gamma}{\gamma'}$$

چون  $m = \rho \frac{V}{n}$  و  $m' = \rho' \frac{V}{n'}$ ، رابطه به صورت زیر درمی‌آید

$$\frac{\rho}{n} \cdot \frac{n'}{\rho'} = \frac{\gamma}{\gamma'}$$

$$\gamma' = \gamma \frac{n}{n'} \cdot \frac{\rho'}{\rho}$$

در نتیجه

با در دست داشتن  $\gamma$  کشش سطحی آب و  $\rho$  جرم حجمی آب و  $\rho'$  جرم حجمی مایع و با شمارش  $n$  و  $n'$  تعداد قطرات،  $\gamma'$  کشش سطحی مایع مورد نظر را به دست آورید.

### پ) کشش سطحی در لوله‌های مویین

مایعی مانند آب را در لوله مویینی که داخل ظرف آب است در نظر می‌گیریم. مطابق شکل ۱۱-۳ سه نیروی کشش سطحی وجود دارد.  $F_{lv}$  کشش سطحی بین مایع و هوا و  $F_{ls}$  کشش سطحی بین مایع و جامد (ظرف) و  $F_{vs}$  کشش سطحی بین هوا و جامد است. در حال تعادل برآیند این سه نیرو باید صفر باشد. بنابراین

$$F_{lv} \cos \alpha + F_{vs} + F_{ls} = 0 \quad \text{یا}$$

$$F_{lv} \cos \alpha = F_{ls} - F_{vs}$$

چون محیط لوله برابر  $2\pi r$  است بنابراین

$$F_{lv} \cos \alpha = \gamma \cdot 2\pi r \cos \alpha$$

در حال تعادل اضافه ارتفاع مایع در لوله مویین باید به اندازه‌ای باشد که با  $F_{lv} \cos \alpha$  برابر شود در نتیجه

$$\gamma = \frac{r\rho gh}{2 \cos \alpha} \quad \text{یا} \quad \gamma 2\pi r \cos \alpha = \pi r^2 h \rho g$$

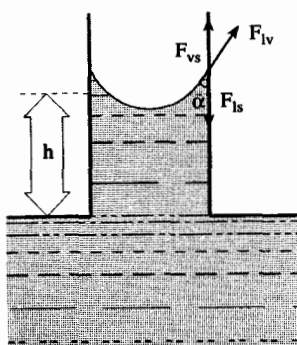
برای لوله‌های باریک ( $r < 0.5 \text{ mm}$ ) تقریباً  $\alpha = 0$  و  $\cos \alpha = 1$  است، و با این تقریب می‌توان نوشت

$$\gamma = \frac{r\rho gh}{2}$$

رابطه فوق را به صورت  $h = \frac{2\gamma}{r\rho g}$  نیز می‌توان نوشت که بیان‌کننده قانون ژورن است. مطابق قانون ژورن، ارتفاع مایع در لوله‌های مویین با شعاع لوله و جرم حجمی مایع نسبت معکوس و با کشش سطحی مایع نسبت مستقیم دارد.

وسایل آزمایش: لوله مویین - کولیس - دو ظرف برای آب و الکل - خطکش.

روش آزمایش - شعاع داخلی لوله مویین را با کولیس اندازه‌گیری کنید. لوله را یک بار در آب و بار دیگر در الکل فرو برید و هر دفعه ارتفاع مایع را از سطح آن در داخل لوله تا سطح آزاد مایع با



شکل ۱۱-۳

خطکش به دست آورید. چگالی آب  $1 \text{ g/cm}^3$  و چگالی الکل  $0.8 \text{ g/cm}^3$  است. جدول زیر را پر کنید و کشش سطحی آب و الکل را به دست آورید.

نوع مایع	r	h	$\rho$	g	$\gamma = \frac{r\rho gh}{\gamma}$
آب					
الکل					

### پرسشها

۱- در لوله‌های موئین به ازای  $\frac{\pi}{4} \geq \alpha \geq \frac{\pi}{4}$  با ذکر مثال بحث کنید.

۲- قوانین تات و ژورن را تعریف کنید.

۳- صعود شیره خام در گیاهان به خاطر چیست؟

# آزمایش ۲۰ = بررسی معادله برنولی

## مقدمه

فرض می‌کنیم در لوله‌ای مطابق شکل ۳-۱۲ مایع غیر قابل تراکمی جریان دارد. در زمان معینی مقدار مایعی که از مقاطعی به سطوح  $A_1$  و  $A_2$  عبور می‌کند برابر است با

$$V = A_1 l_1 = A_2 l_2$$

$l_1$  مسیر مایع در مقطع  $A_1$  و  $l_2$  مسیر مایع در مقطع  $A_2$  و  $V$  حجم مایعی است که عبور کرده است. اگر جرم حجمی مایع  $\rho$  و جرم آن در این عنصر حجمی کوچک  $m$  باشد  $V = \frac{m}{\rho}$  در نتیجه

$$A_1 l_1 = A_2 l_2 = \frac{m}{\rho}$$

اگر  $P_1$  و  $P_2$  فشارهای خارجی در  $A_1$  و  $A_2$  باشند، کار نیرویی که موجب جریان مایع در فاصله بین دو مقطع می‌شود برابر است با

$$W = F.l = (P_1 - P_2)Al = (P_1 - P_2)V = (P_1 - P_2)\frac{m}{\rho}$$

این کار مساوی تغییرات انرژیهای جنبشی و پتانسیل در این فاصله است، یعنی

$$(P_1 - P_2)\frac{m}{\rho} = \frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2) + mgZ_2 - mgZ_1$$

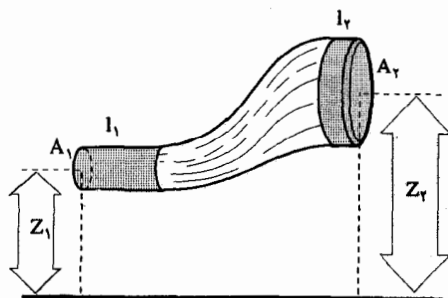
$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gZ_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gZ_2$$

در نتیجه

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gZ = cte$$

یا

رابطه فوق به معادله برنولی موسوم است.



شکل ۳-۱۲

لولهٔ وینچوری - موقعی که شاره‌ای در یک لولهٔ افقی جریان می‌یابد به علت اینکه اختلاف ارتفاع در مقاطع مختلف لوله صفر است رابطهٔ برنولی به صورت زیر درمی‌آید

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (۱)$$

چون حاصل ضرب سرعت در سطح مقطع لوله در نقاط مختلف یکسان است می‌توان نوشت

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (۲)$$

هنگامی که سطح مقطع لوله کم می‌شود، سرعت جریان افزایش می‌یابد و با توجه به رابطهٔ برنولی با ازدیاد سرعت جریان، فشار در آن مقطع کمتر می‌شود. یعنی در یک لولهٔ افقی وقتی سطح مقطع لوله کوچکتر می‌شود، فشار در آن مقطع نیز کمتر می‌شود.

لولهٔ وینچوری مطابق شکل ۳-۱۳ لوله‌ای است افقی که سطح مقاطع آن در نقاط مختلف یکسان نیست و مایعی در آن جریان دارد. در جدار لوله در قسمتهای تنگ و گشاد آن لوله‌های کوچکی به طور قائم نصب شده است. دیده می‌شود که سرعت در مقطع کم زیاد است و ارتفاع آب در لولهٔ قائم در این قسمت نیز کمتر از ارتفاع آب در لولهٔ قائم در قسمت گشادتر لوله خواهد بود (شکل ۳-۱۳). رابطهٔ (۱) را می‌توان به صورت زیر نیز نوشت

$$P_2 - P_1 = \frac{1}{2}\rho v_1^2 \frac{A_1^2}{A_2^2} - \frac{1}{2}\rho v_2^2 \frac{A_2^2}{A_1^2}$$

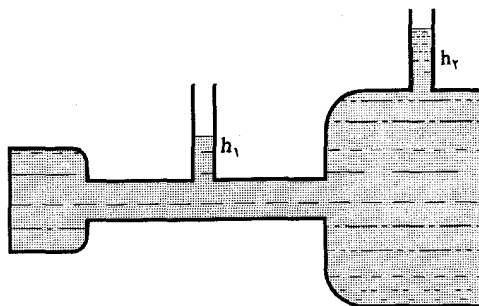
$vA$  مقدار آبی است که در واحد زمان جریان می‌یابد و دبی آب نامیده می‌شود و آن را با  $Q$  نشان

می‌دهند. بنابراین

$$P_2 - P_1 = \frac{1}{2}\rho Q^2 \left( \frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right)$$

چون  $P = \rho gh$  است، پس

$$\rho g(h_2 - h_1) = \frac{1}{2}\rho Q^2 \left( \frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right)$$



شکل ۳-۱۳

$$h_r - h_1 = \frac{Q^2}{2g} \left( \frac{A_1^2 - A_r^2}{A_1^2 A_r^2} \right) \quad \text{یا}$$

$$Q = A_1 A_r \sqrt{\frac{2g(h_r - h_1)}{A_1^2 - A_r^2}} \quad \text{در نتیجه}$$

هدف آزمایش: تحقیق قانون برنولی

روش آزمایش: دستگاه را تراز کنید. به وسیله پیچ مربوط سرعت جریان آب را تغییر دهید تا دبی آب ثابت شود.  $h_1$  و  $h_r$  ارتفاع آب در لوله‌های کوچک و  $D_1$  و  $D_r$  قطرهای داخلی لوله‌ها را اندازه‌گیری کنید. سطح مقاطع لوله‌ها را به دست آورید.

با استفاده از فرمول، دبی آب و همچنین سرعت‌های آب در مقاطع مختلف را محاسبه کنید و نتایج حاصل را در جدول زیر بنویسید.

$h_1$	$D_1$	$A_1$	$h_r$	$D_r$	$A_r$	$Q$	سرعت $v_A$	سرعت $v_B$

پرسشها

۱ - چرا سرعت آب در مقاطع مختلف متفاوت است؟

۲ - در آزمایش بالا چرا دستگاه را تراز می‌کنند؟

# ۴ امواج

## آزمایش ۲۱ ————— بررسی پدیده‌های موجی

هدف آزمایش: بررسی پدیده‌های موجی

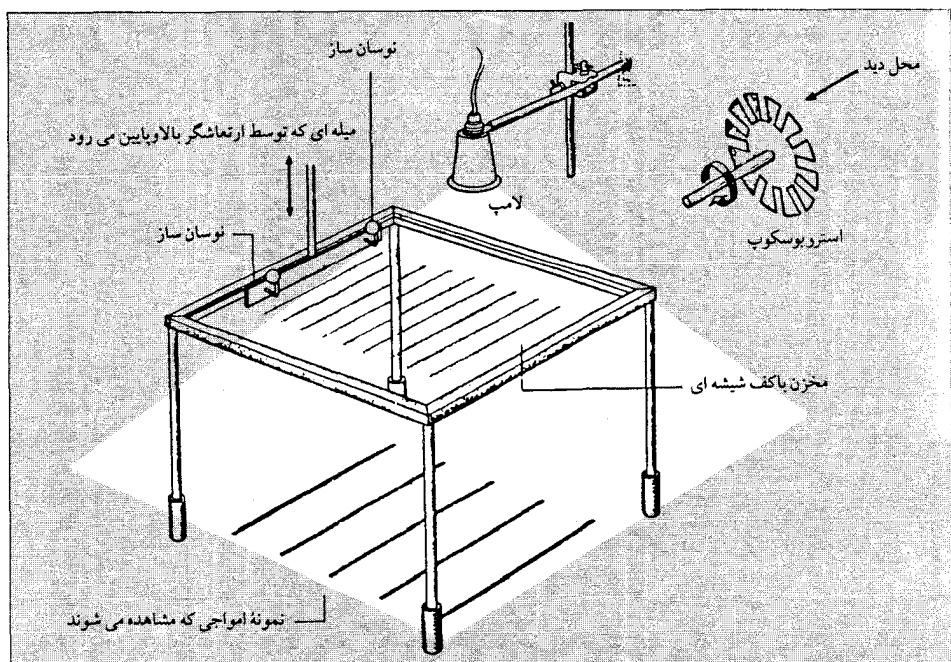
وسایل آزمایش: تشتک مخصوص آب با پایه‌های قائم - تراز آبی - ارتعاشگر - منبع تغذیه - ترانسفورماتور کاهنده جریان مستقیم - رثوستا - موج سازهای مختلف - مانعهای مختلف شیشه‌ای و فلزی.

شرح دستگاه - رفتار امواج را می‌توان به وسیله امواجی که در سطح آب پدید می‌آیند بررسی کرد. این امواج عرضی هستند، اگر به چوب‌پنبه شناوری نگاه کنید، می‌بینید موقعی که موج به آن می‌رسد بالا و پایین می‌رود.

دستگاه را مطابق شکل ۴ - ۱ سوار کنید و با تراز سطح تشتک را کاملاً به حالت افقی درآورید. در حدود یک لیتر آب در تشتک بریزید تا ارتفاع آب به ۸ میلیمتر برسد. در زیر دستگاه صفحه کاغذ بزرگی قرار دهید. می‌توان تخته یا قطعه فیبر یا صفحه فلزی سفید رنگی را به کار برد. لامپ را در قسمت بالای آب روی پایه مربوط در ارتفاع ۵۰ سانتیمتری سطح آب قرار دهید به طوری که امواج آب به وضوح در سطح کاغذ مشاهده شوند. ارتعاشگر را روی پایه ببندید به طوری که نوک سوزن موج ساز آن بر سطح آب مماس باشد. سپس آن را با یک رثوستا به طور سری ببندید و به جریان مستقیم مجاز (معمولاً حدود ۶ ولت) وصل کنید. با تغییر رثوستا ارتفاعهای ارتعاشگر را به دلخواه تنظیم کنید. علاوه بر این برای اینکه دامنه نوسانها کم و زیاد شود می‌توان بدنه استوانه‌ای ارتعاشگر را جلو و عقب برد. ارتعاشگر موج ساز را در جهت قائم به ارتعاش درآورید تا امواجی در سطح آب ایجاد شود. یک گوی کوچک در نوک موج ساز امواج دایره‌ای و یک باریکه چوب یا فلز امواج تخت تولید می‌کنند.

امواج آب با سرعت نسبتاً زیادی حرکت می‌کنند و مشاهده آنها قدری مشکل است. با یک استروپوسکوپ می‌توان امواج را ظاهراً ساکن و به خوبی مشاهده کرد. استروپوسکوپ قرصی با ۱۲





شکل ۱-۴

تیغه است که اگر در هر ثانیه ۲ بار دوران کند سطح آب ۲۴ بار در ثانیه دیده می شود و ظاهراً ساکن به نظر می رسد.

آزمایش الف) مشاهده امواج دایره ای شکل.

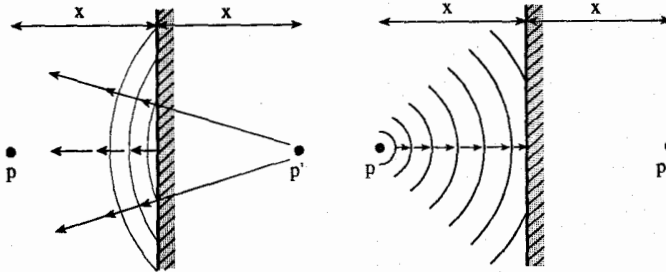
موج ساز نوک تیز را به دستگاه وصل کنید. ارتعاشگر را قدری جابه جا کنید تا نوک موج ساز مناسب بر سطح آب شود. ارتعاشگر را به کار اندازید و شکل امواج دایره ای را مشاهده کنید.

آزمایش ب) مشاهده اصل هویگنس درباره پوش امواج.

موج ساز دندانهای را به ارتعاشگر وصل کنید و آن را به کار اندازید. سر هر یک از دندانها یک منبع موج و پوش آنها موج تخت است.

آزمایش پ) مشاهده بازتاب امواج دایره ای شکل روی سطح تخت.

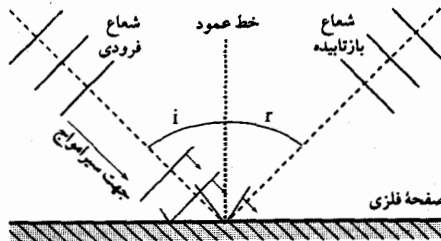
موج ساز نوک تیز را مانند آزمایش قبل به ارتعاشگر متصل و آن را تنظیم کنید. مانع تخت فلزی را در فاصله ۸ تا ۱۰ سانتیمتری آن قرار دهید. امواج به سطح تخت برخورد می کنند و بازتابیده می شوند. مشاهده می شود که جهت خمیدگی موج بازتابیده عکس جهت خمیدگی موج فرودی است (شکل ۴-۲).



شکل ۲-۴

چنین به نظر می‌رسد که امواج بازتابیده از نقطه‌ای که در پشت مانع واقع شده است، منتشر شده‌اند. آن نقطه که تصویر مجازی نوک موج‌ساز است، قرینه آن نسبت به سطح بازتاب‌کننده است. آزمایش (ت) مشاهده بازتاب امواج تخت.

موج‌ساز تخت را به دستگاه وصل کنید، مانع تخت را در مسیر امواج قرار دهید. امواج پس از برخورد به مانع بازتاب پیدا می‌کنند و دیده می‌شوند. صفحه کاغذی در پایین تشک قرار دهید و پرتوهای فرودی و بازتابی و خط عمود بر سطح را رسم کنید. تحقیق کنید که زاویه فرود و زاویه بازتاب مساویند (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴

آزمایش (ث) بازتاب امواج کروی و تخت روی آینه کاو.

موج‌ساز نوک‌تیز را به ارتعاشگر وصل کنید. داخل صفحه فلزی براقی که به شکل نیم استوانه خم شده باشد نقش آینه کاو را بازی می‌کند. اگر آن را در فاصله مناسبی در مسیر موج قرار دهید، امواج به سطح کاو برخورد می‌کنند و بازتابیده می‌شوند. امواج بازتابیده همگرا هستند و در نقطه‌ای جمع می‌شوند که تصویر منبع موج است.

موج‌ساز نوک‌تیز را بردارید و به جای آن موج‌ساز تخت را ببندید و پس از تنظیم ارتعاشگر را به کار اندازید. امواج تخت پس از برخورد به آینه کاو در نقطه‌ای که همان کانون آینه است جمع می‌شوند.

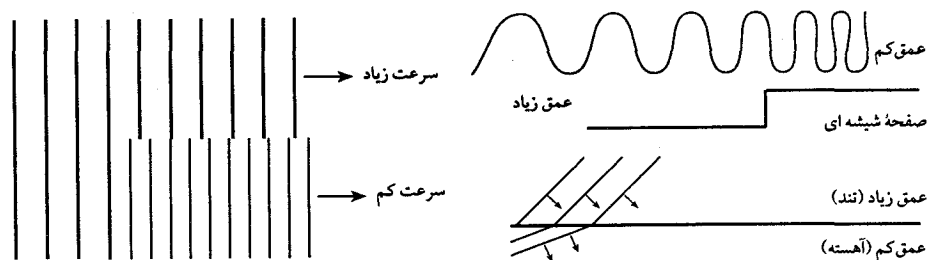
آزمایش ج) بازتاب امواج کروی یا تخت روی آینه کاو.

نیم استوانه‌ای فلزی را از طرف دیگر مقابل امواج قرار دهید به طوری که امواج با سطح کوژ آن برخورد کنند و سپس همان آزمایش قبل را تکرار کنید. ملاحظه می‌شود که امواج پس از برخورد به این سطح بازتابیده و از هم دور می‌شوند و مثل این است که از کانون آینه واقع در پشت آن منتشر شده‌اند.

آزمایش ج) مطابق شکل ۴-۴ صفحه شیشه‌ای را سر راه امواج تخت قرار دهید. سرعت انتشار امواج در سطح آب، در عمقهای مختلف، یکسان نیست و در آب کم عمق امواج با سرعت کمتر و در آب عمیقتر با سرعت بیشتر منتشر می‌شود.

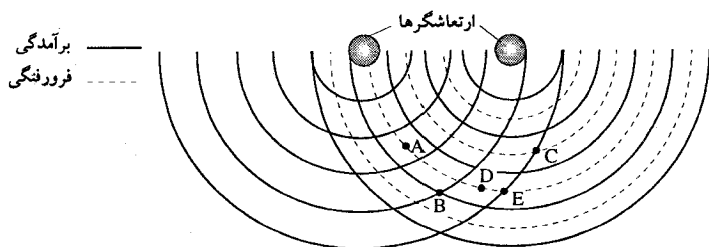
با توجه به رابطه  $\lambda = \frac{v}{\nu}$  به علت اینکه بسامد مربوط به موج ساز و برای هر دو عمق یکسان است، در اثر تغییر سرعت، طول موج نیز تغییر خواهد کرد.

صفحه شیشه‌ای را به طور مایل قرار دهید، آن قدر آب در مخزن بریزید که سطح آب در بالای صفحه شیشه‌ای به ۵ میلیمتر برسد. موج ساز تخت را به دستگاه وصل کنید و ارتعاشگر را به کار اندازید و پدیده شکست را مشاهده کنید.



شکل ۴-۴

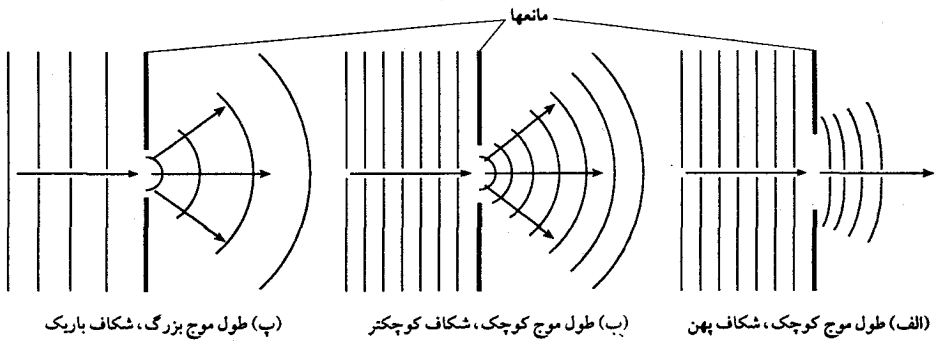
آزمایش ح) دو موج ساز نوک تیز را به دستگاه متصل کنید و ارتعاشگر را به کار اندازید (شکل ۴-۵). در این صورت دو منبع موج دارید که از لحاظ دامنه و بسامد کاملاً شبیه هم هستند. امواج منتشر شده از این دو منبع با هم تداخل می‌کنند و هذلولیهای ساکن و متحرک تشکیل می‌شوند که به خوبی قابل دیدن هستند.



شکل ۵-۴

## آزمایش (خ) پدیده پراش

موج ساز تخت را به دستگاه وصل کنید و ارتعاشگر را به کار اندازید. دو مانع فلزی را سر راه امواج و نزدیک به موج سازها قرار دهید به طوری که دو مانع در یک راستا باشند و به همدیگر نچسبند. اگر فاصله بین دو مانع نسبتاً زیاد باشد مطابق شکل ۴ - ۶ الف امواج در طرف دیگر مانعها پیشروی می کنند. ولی همان طور که در شکل ۴ - ۶ ب و پ دیده می شود اگر فاصله مانعها کم شود به طوری که به صورت شکاف باریکی درآیند، موقعی که امواج به این شکاف می رسند، شکاف به صورت منبع موج درمی آید و پدیده پراش ظاهر می شود و امواج به صورت دایره هم مرکزی که مرکز آنها همان شکاف باریک است منتشر می شوند.



شکل ۴-۶

## آزمایش ۲۲ ===== بررسی امواج ساکن در ریسمان و فنر

### مقدمه

حرکتهای ارتعاشی پس از برخورد به مانع بازتابیده می شوند و امواج رفت و برگشت در اثر تداخل، موجی به نام موج ساکن به وجود می آورند. بعضی از نقاط مسیر، کاملاً ثابتند و گره نامیده می شوند و برخی از نقاط که دارای ماکسیمم ارتعاش اند شکم نامیده می شوند.

موقعی که مانع سخت باشد، انتهای مسیر ثابت می ماند و در حقیقت موج با تغییر علامت بازتابیده می شود. به این ترتیب در طرفین گره و بین آنها با توجه به نیروی کشش مقداری گره و وسط گره ها، شکم ایجاد می شود. در این حالت فواصل گره ها از مانع مضرب زوجی از  $\frac{\lambda}{4}$  و فواصل شکمها از مانع مضرب فردی از  $\frac{\lambda}{4}$  خواهد بود.

اگر نخ به ارتعاش درآید و نیروی کشش تغییر یابد به ازای مقادیر معینی از نیروی کشش امواج ساکن به وجود می آیند و بسامد ارتعاشها از رابطه زیر به دست می آید

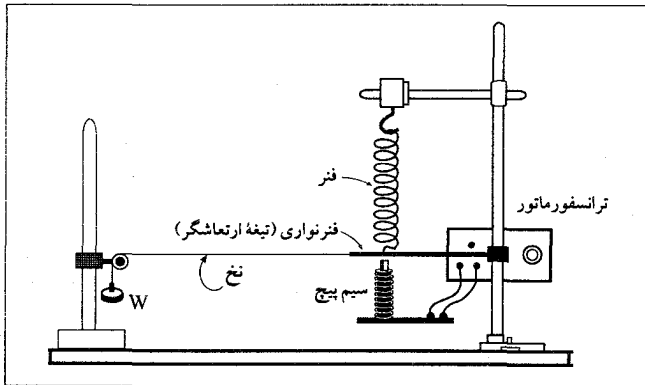
$$N = \frac{K}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

در این رابطه K بیان کننده هماهنگها یا به عبارتی دیگر تعداد شکمها در طول تار و l طول تار و F نیروی کشش و  $\mu$  جرم واحد طول تار است.

هدف آزمایش: بررسی ارتعاشهای طولی و عرضی و تعیین بسامد و سرعت ارتعاشها.

آزمایش الف) دستگاه ارتعاشگر تیغهای است آهنی که از یک طرف ثابت است و روی بوبینی قرار دارد. به دو سر سیم پیچ بوبین، جریان متناوبی در حدود ۶ ولت وصل کنید. سر آزاد تیغه در هر آلترانس یک مرتبه جذب و دفع می شود و ارتعاشهایی در نخ متصل به آن به وجود می آید. نخ را از روی قرقره ثابتی بگذرانید و به انتهای آن وزنه ای آویزان کنید. وزنه ها را طوری تغییر دهید تا یک شکم، دو شکم و سه شکم را به وضوح با ماکسیمم دامنه ببینید. با ثابت نگه داشتن نیروی کشش و تغییر طول نیز می توان آزمایش مذکور را انجام داد. با هر دو روش N را به دست آورید.

میانگین N	N	K	F = mg	$\mu$	l	ترتیب آزمایش



شکل ۷-۴

آزمایش ب) مطابق شکل ۷-۴ تیغه ارتعاشگر را به یک طرف فنری که به طور قائم قرار دارد وصل کنید. طرف دیگر فنر از بالا به نقطه ثابتی متصل است. امواج ساکن در فنر ایجاد می شود. فاصله دو گره متوالی یا دو شکم متوالی را از چند جا اندازه بگیرید و میانگین آنها را به دست آورید.  $\frac{\lambda}{4}$  به دست می آید. با در دست داشتن  $\lambda$  و  $N$  بسامد تیغه که در آزمایش قبل به دست آوردید از فرمول  $\lambda = \frac{v}{N}$  مقدار  $v$  سرعت انتشار ارتعاشها در فنر را محاسبه کنید.

## آزمایش ۲۳ پدیده تشدید (رزنانس) در تارها و لوله‌های صوتی

### مقدمه

اگر جسم قابل ارتعاشی، به نوسان درآید، به تدریج انرژی دریافتی جسم به صورت انرژی ارتعاشی به هوای مجاور منتقل می‌شود و مقداری نیز در خود محیط میرا می‌شود. در نتیجه دامنه ارتعاش به تدریج کوچکتر می‌شود. هنگامی که انرژی ارتعاشی در جسم به صفر می‌رسد جسم به حال تعادل درمی‌آید. این نوع ارتعاشها را میرا شونده می‌نامند.

در صورتی که انرژی از دست رفته جسم، با ضربه‌هایی به طور متناوب جبران شود دامنه ارتعاش محفوظ می‌ماند و به صفر برنمی‌گردد. این نوع ارتعاش را ارتعاش پایدار می‌گویند. مثلاً برای پایدار نگهداشتن نوسان یک تاب، باید انرژی کاسته شده جبران شود. یعنی وقتی تاب به انتهای مسیر خود رسید مجدداً ضربه‌ای به آن وارد شود. اگر دوره ضربه‌های وارده مضرب صحیحی از دوره تاب باشد، دامنه نوسان بزرگتر می‌شود و حرکت تاب تشدید می‌یابد.

سیم‌ی که بین دو نقطه کشیده شده، جسمی است که قابلیت ارتعاش دارد و با بسامد زیادی ارتعاش می‌کند. اگر وسط سیمی در میدان مغناطیسی یکنواختی قرار گیرد و از آن جریان متناوبی بگذرد، به علت تغییر جهت جریان در هر آلترنانس، جهت نیرو عوض می‌شود و در سیم امواج ساکنی به وجود می‌آید.

اگر بسامد ارتعاش با بسامدهای طبیعی سیم تطبیق نکند در محل گره نیز ارتعاش وجود دارد ولی دامنه از دامنه در سایر نقاط کمتر است. در صورتی که بسامد ارتعاش با یکی از بسامدهای طبیعی سیم مساوی باشد سیم با بسامد ارتعاش به حال تشدید درمی‌آید.

پدیده صوت نیز به همین ترتیب است. اگر یکی از دو سیمی که می‌توانند تنی را تولید کنند وادار به ارتعاش شود سیم دیگر خود به خود به ارتعاش درمی‌آید و همان صوت شنیده می‌شود. اگر سیمها در شرایطی باشند که دو صوت مختلف ایجاد کنند با ارتعاش یکی از آنها، دیگری مرتعش نخواهد شد. بنابر این شرط تشدید برابر بودن دوره‌هاست.

در لوله‌ای که یک انتهای آن بسته است، اگر امواج صوتی انتشار یابد، در لوله امواج ساکن تولید می‌شود و شکم ارتعاش در فاصله کمی خارج از لوله قرار می‌گیرد. این فاصله برابر  $e = a \cdot d$  است (d قطر داخلی لوله و a ضریب ثابتی در حدود  $\frac{1}{4}$  است).

در مورد ستونی از هوا به ارتفاع l که درون لوله صوتی به ارتعاش درمی‌آید رابطه زیر برقرار است

$$\frac{\lambda}{4} (2K - 1) = l + e$$

هدف آزمایش: ایجاد تشدید به منظور تعیین فرکانس برق شهر و سرعت انتشار صوت در هوا و تصحیح انتهای لوله صوتی بسته.

آزمایش الف) اندازه‌گیری دورهٔ برق شهر با استفاده از صداسنج (سونومتر).

وسایل آزمایش: دستگاه صداسنج - آهنربا - منبع تغذیه - وزنه.

روش آزمایش: مقداری از سیم را وزن کنید و با تقسیم کردن بر طول آن، جرم واحد طول سیم را به دست آورید. سیم را از یک طرف روی صداسنج ثابت کنید و از طرف دیگر وزنه‌هایی را به آن بیاویزید. ولتاژ برق شهر را پایین بیاورید و ولتاژی حدود ۶ ولت به دو سر سیم وصل کنید. فاصلهٔ بین دو خرک را که طول تار است اندازه بگیرید و آهنربا را درست وسط خرکها قرار دهید. مقدار وزنه‌ها را آن قدر تغییر دهید که دو گره در طرفین و یک شکم در وسط به وضوح دیده شوند. نیروی کشش را اندازه بگیرید و جای آهنربا را تغییر دهید به طوری که به فاصلهٔ  $\frac{1}{4}$  از یکی از خرکها واقع شود و با تغییر نیروی کشش سه گره و دو شکم را به دست آورید. به همین ترتیب هماهنگهای بعدی را مشاهده و جدول زیر را پر کنید.

میانگین N	N	K	F	$\mu$	l	ترتیب آزمایش

آزمایش ب) تعیین سرعت انتشار صوت در هوا.

وسایل آزمایش: لولهٔ شیشه‌ای - متر - کولیس - لولهٔ لاستیکی - مخزن آب - پایهٔ فلزی و گیره - انواع دیاپازون.

روش آزمایش: لولهٔ شیشه‌ای را به وسیلهٔ پایهٔ فلزی به طور قائم قرار دهید و لولهٔ لاستیکی را از یک طرف به مخزن آب، و از طرف دیگر به انتهای لولهٔ شیشه‌ای وصل کنید، به طوری که بالا و پایین آوردن مخزن آب، سطح آب در لوله تغییر کند. با پایین بردن سطح آب، ستونی از هوا در لوله به وجود می‌آید که هر چه سطح آب پایینتر برود طول ستون هوا بیشتر خواهد شد.

دیاپازونی را مرتعش کنید و شاخه‌های آن را در سطح قائم در مقابل دهانهٔ لوله قرار دهید. ارتفاع ستون هوا را تغییر دهید تا با دیاپازون به تشدید در آید. در این موقع صدا شدیدتر شنیده می‌شود. در این حالت با افزایش تدریجی ستون هوا تا طول معینی، بین هوای لوله و دیاپازون تشدید حاصل شده است و بسامد لولهٔ صوتی و دیاپازون مساویند. باید سطح آب را به مقدار خیلی کمی بالا و پایین برد تا دقیقاً محل ماکسیم تشدید به دست آید.

به همین ترتیب با تکرار آزمایش و پایین آوردن سطح آب در لوله، تا جایی که امکان دارد محل تشدیدهای دوم و سوم و غیره را پیدا کنید. در محل تشدیدها به ازای  $K=1$  و  $K=2$  و  $K=3$



غیره خواهیم داشت

$$\frac{\lambda}{4} = l_1 + e \quad (۱)$$

$$۳\frac{\lambda}{4} = l_2 + e \quad (۲)$$

$$۵\frac{\lambda}{4} = l_3 + e \quad (۳)$$

از تفاضل دو به دو روابط بالا نتیجه می شود

$$l_2 - l_1 = \frac{\lambda}{2}$$

$$l_3 - l_1 = \lambda$$

از ۲ رابطه بالا می توان مقدار متوسط  $\lambda$  را به دست آورد

$$\lambda = \frac{l_2 + 2l_3 - 3l_1}{2}$$

با داشتن مقدار  $\lambda$  و  $N$  که همان بسامد دیپازون است و با استفاده از رابطه  $\lambda = \frac{v}{N}$  سرعت انتشار صوت در هوای آزمایشگاه را به دست آورید.

از رابطه  $v = v_0 + 0.6t$  که در آن  $v_0 = ۳۳۱.۵ \text{ m/s}$  و  $t$  دمای آزمایشگاه و  $v$  سرعت صوت در آن دماست، سرعت صوت را محاسبه و با مقداری که از آزمایش به دست آمده است مقایسه کنید. با حذف  $\lambda$  بین روابط (۱) و (۲) نتیجه  $e = \frac{l_2 - 3l_1}{2}$  که مقدار تصحیح انتهای لوله است به دست می آید.

در صورتی که امکان ایجاد بسامدهای مختلفی باشد، برای هر کدام  $l_1$  طول لوله را برای تشدید اول اندازه گیری کنید و منحنی نمایش تغییرات طول لوله نسبت به عکس بسامدها ( $\frac{1}{N}$ ) را رسم کنید، شکل ۴-۸.

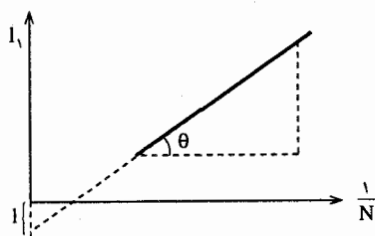
این نمودار نمایش رابطه زیر است

$$l_1 = \frac{\lambda}{4} - \alpha = \frac{v}{4 \cdot N} - e$$

شیب خط سرعت انتشار صوت در هوا و عرض از مبدأ تصحیح انتهای لوله صوتی است.

انواع دیپازون	d	e	t	v	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$\lambda$

تذکر ۱ - برای به ارتعاش درآوردن دیپازون یا از چکش لاستیکی استفاده کنید یا پارچه ای را روی چوبی پهن کنید و دیپازون را آهسته روی آن بزنید.



شکل ۸-۴

تذکر ۲ - به جای دیاپازون، می‌توان از نوسان‌ساز و بلندگو استفاده کرد.

تذکر ۳ - چون ستون هوا از ارتفاع معینی شروع به تشدید می‌کند و در ارتفاع دیگری خاتمه می‌یابد، بهتر است ارتفاع ستون هوا را در دو حالت شروع و خاتمه تشدید اندازه بگیرید و میانگین آنها را به جای ۱ قرار دهید.

### پرسشها

۱ - چگونه می‌توان بسامد نامعلوم یک دیاپازون را به دست آورد؟

۲ - کوچکترین بسامدی که می‌توان در لوله آزمایشگاهی تشدید به وجود آورد چه قدر است؟

۳ - اگر طول لوله ۶۰ سانتیمتر باشد، با دیاپازونی که بسامد آن ۱۵۰۰ است تا هماهنگ چندم

را می‌توان به دست آورد؟

# نور ۵

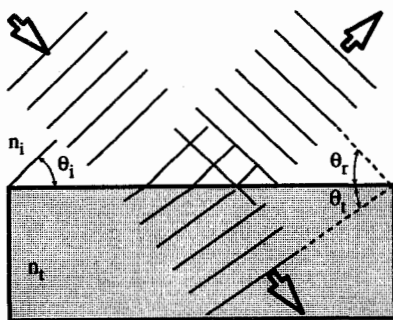
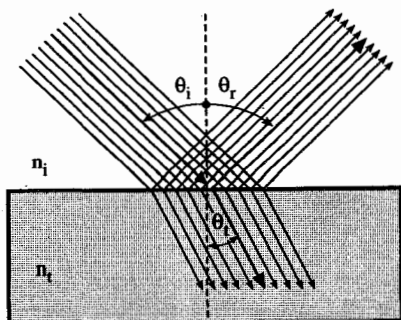
## آزمایش ۲۴ بازتابش نور

### مقدمه

نور یک موج الکترومغناطیسی است. طول موج امواج الکترومغناطیسی که روی حس بینایی انسان اثر می‌گذارند بین  $4 \times 10^{-7}$  تا  $7 \times 10^{-7}$  متر قرار دارند.

موقعی که اندازه مانع یا روزنه‌ای که در مسیر امواج قرار می‌گیرند خیلی بزرگتر از طول موج نور باشند امواج با دقت خیلی زیادی روی خط مستقیم منتشر می‌شوند. در شکل ۵-۱ یک موج تخت نوری روی سطح آب فروود می‌آید. قسمتی از امواج در برخورد به سطح جذابی دو محیط تغییر مسیر می‌دهد و به همان محیط اول برمی‌گردد و قسمت دیگر عبور می‌کند و در مسیر دیگری وارد محیط دوم می‌شود. آن قسمتی از نور که برمی‌گردد بازتابش نام دارد و معمولی‌ترین نوع آن پخش نور نامیده می‌شود که نور در جهت‌های مختلف بازتابش می‌یابد. در سطوح صاف و صیقلی که زبری سطح نسبت به طول موج نور کوچک باشد پدیده بازتابش منظم رخ می‌دهد. قوانین بازتابش نور عبارتند از:

- ۱- پرتوهای تابش و بازتابش و خط عمود بر سطح جذابی در نقطه تابش در یک صفحه واقعند.
- ۲- زاویه تابش و بازتابش برای همه رنگها و هر نوع محیطی بایکدیگر برابرند.

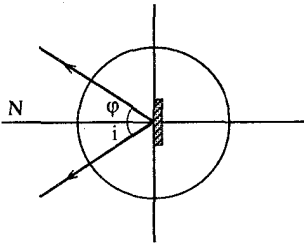


شکل ۵-۱

## هدف آزمایش: بررسی آینه تخت و بازتابش نور.

وسایل آزمایش: ۲ عدد آینه تخت - سره نوری - چراغ رویتر - دیسک هارتل - سنجاق - کاغذ - شیشه - خطکش - تیغه .

آزمایش الف) آینه تخت را مطابق شکل ۵-۲ در وسط دیسک هارتل سوار کنید، به طوری که لبه سطح بازتاب دهنده آن درست منطبق بر یکی از خطوط عمود برهم صفحه مدرج قرار گیرد. چراغ رویتر را روشن کنید و شکاف باریکی را در مقابل چراغ قرار دهید تا نور خروجی روی دیسک بتابد و امتداد آن از محل تقاطع دو خط عمود برهم عبور کند. نور عمود بر آینه می تابد و به طور عمود بازتابش می یابد. با گرداندن دیسک هارتل، زاویه تابش  $i$  را تغییر دهید. زاویه بازتابش،  $\varphi$  مربوط به آن را اندازه بگیرید و در جدول زیر یادداشت کنید.



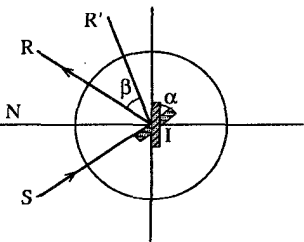
شکل ۵-۲

$i$						
$\varphi$						

## پرسشها

- ۱- زوایای تابش و بازتابش چه رابطه‌ای با یکدیگر دارند؟
- ۲- تحقیق کنید که آیا پرتوهای تابش و بازتابش و خط عمود بر آینه در نقطه تابش روی یک صفحه هستند یا نه؟

آزمایش ب) مطابق شکل ۵-۳ پرتو تابش SI در امتداد IR بازتابش می یابد. پرتو تابش را ثابت نگهدارید و آینه را به اندازه زاویه  $\alpha$  حول مرکز دیسک هارتل دوران دهید. پرتو بازتابش به اندازه  $\beta$  جابه‌جا می شود، مقدار  $\beta$  را اندازه‌گیری کنید و آزمایش را با زوایای مختلف  $\alpha$  انجام دهید و نتایج را در جدول زیر یادداشت کنید.



شکل ۵-۳

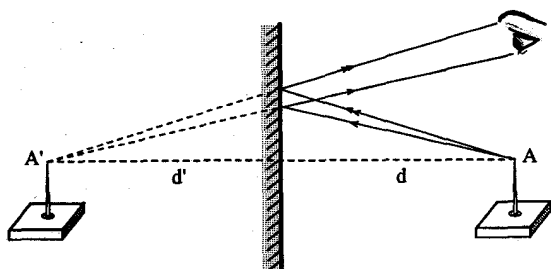
$\alpha$				
$\beta$				

## پرسشها

- ۱- چه رابطه‌ای بین  $\alpha$  و  $\beta$  برقرار است؟

۲- آینه را حول محور دلخواهی غیر از نقطه I دوران دهید. در این صورت چه رابطه‌ای بین  $\alpha$  و  $\beta$  برقرار است؟

آزمایش پ) صفحه شیشه‌ای تخت را که به عنوان آینه به کار می‌رود روی میز قرار دهید. سنجاق را در مقابل شیشه قرار دهید و از همان طرف به شیشه نگاه کنید و سنجاق دیگری را در طرف مقابل آن قدر جابه‌جا کنید تا تصویر سنجاق اول بر آن منطبق شود (شکل ۵-۴).



شکل ۵-۴

سنجاقها را به قطعه‌ای چوب که به عنوان پایه به کار می‌روند فرو برید و پایه‌ها را جابه‌جا کنید. فاصله سنجاقها تا آینه را اندازه‌گیری کنید و به ازای مقادیر مختلف  $d$  مقادیر  $d'$  را به دست آورید و در جدول زیر یادداشت کنید.

$d$					
$d'$					

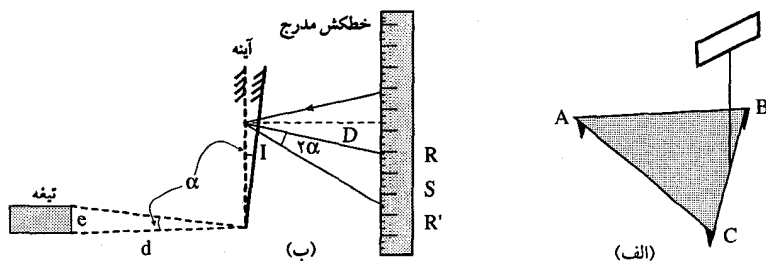
### پرسشها

۱- چه رابطه‌ای بین  $d$  و  $d'$  وجود دارد؟

۲- آیا طول جسم با طول تصویر برابر است؟

آزمایش ت) دو آینه تخت عمود برهم را روی میز قرار دهید. سنجاقی را بین این دو آینه بگذارید، چند تصویر از سنجاق مشاهده می‌کنید.  $n$  تعداد تصاویر را به ازای مقادیر مختلف  $\alpha$  زوایای دو آینه به دست آورید و در جدول زیر یادداشت کنید.

$\alpha$				
$n$				



شکل ۵-۵

آزمایش ث) خطکش مدرجی را در مقابل آینه تختی قرار دهید و پرتو نوری به آن بتابانید. پرتو در امتداد IR بازتابش می‌یابد. آینه مطابق شکل ۵-۵ (الف) دارای ۳ پایه است. زیر پایه A آینه، تیغه‌ای را قرار دهید، آینه به اندازه  $\alpha$  منحرف می‌شود و پرتو بازتابش جابه‌جا شده و در امتداد IR' به خطکش برخورد می‌کند (شکل ۵-۵ ب). فاصله آینه تا تیغه را با d و ضخامت تیغه را با e نشان می‌دهیم در نتیجه

$$\tan \alpha \approx \alpha = \frac{e}{d}$$

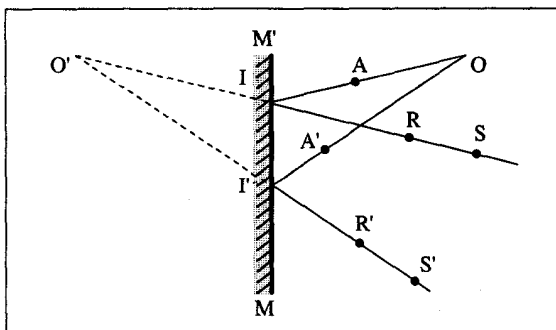
محل جابه‌جایی پرتو بازتابش روی خطکش S = RR' و فاصله آینه تا خطکش را با D نشان می‌دهیم بنابراین

$$\tan 2\alpha \approx 2\alpha = \frac{S}{D}$$

از ترکیب دو رابطه بالا نتیجه می‌شود،  $e = \frac{S \cdot d}{2D}$  یا  $\frac{2e}{d} = \frac{S}{D}$ . تیغه‌های مختلفی را زیر پایه آینه قرار دهید و مقادیر مربوط را اندازه‌گیری و جدول زیر را پر کنید و ضخامت هریک از تیغه‌ها را به دست آورید.

نوع تیغه	$\alpha$	S	D	e
۱				
۲				
۳				

آزمایش ج) کاغذی را روی تخته بچسبانید، آینه را به‌طور قائم در وسط کاغذ بگذارید. سنجاقی را به‌طور قائم در نقطه‌ای مانند O در کنار برگ کاغذ و در حدود ۲۰ سانتیمتر از آینه و سنجاق دیگری را در نقطه A و نزدیکتر به آینه در کاغذ فرو کنید. سنجاق سوم R را چنان در کاغذ فرو کنید که اگر به‌طور افقی بر سطح کاغذ نگاه کنید سنجاق R و تصویرهای سنجاقهای O و A در یک امتداد دیده شوند (شکل ۵-۶). سپس سنجاق S را چنان در کاغذ فرو کنید که با R و تصویرهای O و A در یک



شکل ۵-۶

امتداد دیده شوند. در این صورت  $OA$  امتداد تابش و  $RS$  امتداد بازتاب است. مکان  $A$  را عوض کنید و آزمایش را لااقل دوبار تکرار کنید. کنار آینه را با مداد خط بکشید و آینه را بردارید و خطوط  $OA$  و  $OA'$  و همچنین  $RS$  و  $R'S'$  را رسم کنید. خطوط  $RS$  و  $R'S'$  را ادامه دهید تا آینه را در نقاط  $I$  و  $I'$  و یکدیگر را در نقطه  $O'$  قطع کنند. از  $I$  و  $I'$  عمودهایی بر اثر آینه رسم کنید و درستی دو قانون بازتاب را تحقیق کنید. نشان دهید که  $O'$  یعنی تصویر  $O$ ، قرینه آن در آینه است.

## آزمایش ۲۵ ————— آینه کاو و کوژ

### مقدمه

آینه کروی قسمتی از کره است که سطح آن صیقلی و بازتاب دهنده نور باشد. اگر سطح خارجی صیقلی باشد آن را آینه کوژ (محدب) و اگر سطح داخلی نور را بازتاب دهد آینه را کاو (مقعر) گویند.

محور تقارن آینه که از مرکز کره می‌گذرد، محور اصلی و بقیه خطوطی را که از مرکز می‌گذرند محور فرعی می‌نامند. پرتو غیر مشخصی که از نقطه O (محل جسم) تحت زاویه  $\alpha$  با محور اصلی به آینه بتابد در امتداد AR بازتابیده می‌شود. همچنین پرتوی که از O منطبق بر محور اصلی تابیده است پس از برخورد به آینه در نقطه B به نام رأس آینه بازتابیده می‌شود و روی خودش برمی‌گردد. دو پرتو بازتابیده در نقطه I یکدیگر را قطع می‌کنند که محل تصویر O است.

فاصله جسم و مرکز و تصویر را تا آینه به ترتیب با P و R و q نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۵-۷ می‌توان

نوشت

$$\gamma = \frac{AB}{q}, \quad \beta = \frac{AB}{R}, \quad \alpha = \frac{AB}{p}$$

چون  $\beta = \theta + \alpha$  و  $\gamma = 2\theta + \alpha$ ، پس از حذف  $\theta$  بین

این دو رابطه خواهیم داشت

$$\alpha + \gamma = 2\beta$$

در این رابطه به جای  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\gamma$  مقدارهایشان را قرار می‌دهیم نتیجه می‌شود

$$\frac{AB}{p} + \frac{AB}{q} = \frac{2AB}{R}$$

دو طرف را بر AB تقسیم می‌کنیم

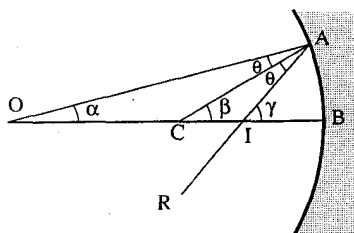
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}$$

باید توجه داشت که شعاع انحنای سطح کروی CB است و مقدار  $\beta$  دقیق است. در مورد  $\alpha$  و  $\gamma$  در صورتی که زوایا کوچک باشند معادلات مربوط با تقریب خوبی قابل قبول است. فرمول فوق را در صورتی می‌توان به کار برد که پرتوهای تابیده به آینه زاویه کوچکی با محور اصلی آینه بسازند.

هرگاه یک دسته پرتو نورانی موازی به آینه بتابد یا خود پرتوهای بازتابیده یا امتداد آنها در نقطه‌ای به نام کانون یکدیگر را قطع می‌کنند. مکان هندسی کانونها را سطح کانونی و محل تقاطع آن با محور اصلی را کانون اصلی گویند. کانون اصلی بین رأس و مرکز آینه به فواصل مساوی واقع است. فاصله

کانون تا آینه به فاصله کانونی موسوم است، بنابراین  $R = 2f$  و در نتیجه  $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$

قسمت جلوی آینه را ناحیه حقیقی و پشت آن را ناحیه مجازی گویند. جسم و تصویر و کانون هرکدام در



شکل ۷-۵



ناحیه حقیقی باشند در فرمول مثبت و اگر در ناحیه مجازی باشند در فرمول منفی محسوب می‌شوند.

هدف آزمایش: بررسی آینه‌های کاو و کوژ و تعیین فاصله کانونی آنها.

وسایل آزمایش: طلق مدرج - چراغ رویتز - آینه‌های کوژ و کاو - صفحه تصویر - شکاف به شکل پیکان - دوربین.

آزمایش الف) در مقابل چراغ رویتز، شکاف یا طلق مدرجی را قرار دهید. آینه کاو را آن قدر جابه‌جا کنید تا تصویر آن روی صفحه جسم تشکیل شود. دقت کنید طول تصویر برابر طول جسم باشد. چون فاصله جسم تا آینه با فاصله تصویر تا آینه برابر است جسم و تصویر در مرکز آینه قرار دارند. بنابر این فاصله جسم تا آینه برابر شعاع آینه است. این مقدار را اندازه‌گیری و از رابطه  $f = \frac{R}{2}$  فاصله کانونی آینه را پیدا کنید. آزمایش را چند بار تکرار کنید و مقدار میانگین  $f$  را به دست آورید.

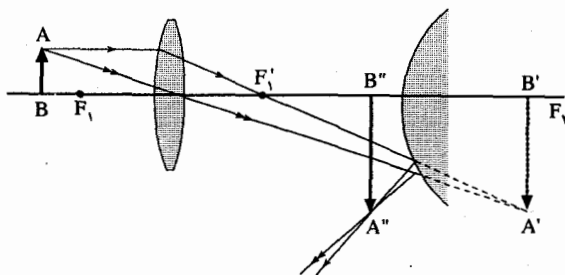
میانگین $f$	$f$	$p$	ترتیب آزمایش

آزمایش ب) در مقابل چراغ رویتز، شکاف یا طلق مدرج را قرار دهید. آینه کاوی را در مقابل شکاف بگذارید و تصویر واضحی از آن را روی صفحه مات به دست آورید. طولهای جسم و تصویر و فاصله جسم تا آینه ( $p$ ) و فاصله تصویر تا آینه ( $q$ ) را اندازه‌گیری کنید. محل آینه را تغییر دهید و هر بار  $p$  و  $q$  را اندازه‌گیری و جدول زیر را پر کنید.

$\frac{q}{p}$	$\frac{A'B'}{AB}$	$f$	$A'B'$	$AB$	$q$	$p$	ترتیب آزمایش
میانگین $f$							

با استفاده از جدول بالا منحنی نمایش تغییرات  $p$  بر حسب  $q$  را رسم کنید. محل تقاطع نیمساز ربع اول با منحنی جایی است که  $p = q$  است، در نتیجه طول یا عرض آن نقطه نشان دهنده مقدار  $f$  است. همچنین با استفاده از جدول فوق منحنی نمایش تغییرات  $\frac{1}{p}$  بر حسب  $\frac{1}{q}$  را رسم کنید. محل تقاطع نمودار با محورها را پیدا کنید. طول یا عرض این نقطه عکس فاصله کانونی آینه است.

آزمایش پ) شکافی را که به شکل پیکان است در مقابل چراغ رویتر بگذارید و عدسی کوژی را در مقابل آن قرار دهید به طوری که از جسم تصویر واضحی به دست آید. این تصویر را به منزله جسم مجازی فرض کنید و آینه کوژ را در نزدیکی آن به اندازه ای تغییر دهید تا تصویر حقیقی به وضوح تشکیل شود. P فاصله جسم مجازی تا آینه و q فاصله تصویر تا آینه را اندازه گیری کنید و f فاصله کانونی آینه کوژ را محاسبه کنید (شکل ۵-۸). آزمایش را چند بار تکرار و هر دفعه آینه را جابه جا کنید و p و q را اندازه بگیرید و در جدول ثبت کنید.



شکل ۵-۸

میانگین f	f	q	p	ترتیب آزمایش

آزمایش ت) روی پایه دوربین، علامتی قرار دهید و آینه کوژ را جلوی دوربین بگذارید و دوربین را چنان تنظیم کنید که تصویر علامت را بدون پارالاکس بر رتیکول دوربین ببینید. فاصله علامت تا آینه یعنی p را یادداشت کنید. آینه را بردارید و به جای آن جسمی را جلو دوربین جابه جا کنید تا تصویر آن به وضوح بر رتیکول دوربین دیده شود (در میزان دوربین تغییری ندهید). در این صورت جسم در محل تصویر علامت در آینه قرار دارد. فاصله جسم تا علامت را اندازه بگیرید و فاصله p را از آن کم کنید. فاصله آینه تا تصویر علامت یعنی q به دست می آید. با استفاده از فرمول  $\frac{1}{p} - \frac{1}{q} = -\frac{1}{f}$  مقدار f، فاصله کانونی آینه کوژ، را به دست آورید.

### پرسشها

- ۱- کانونهای فرعی و سطح کانونی را تعریف کنید.
- ۲- میدان آینه را تعریف و میدان آینه تخت را با میدان آینه کوژ مقایسه کنید.
- ۳- مسیر پرتوها را در آزمایش ت رسم کنید.

# آزمایش ۲۶ گوی سنج نوری

## مقدمه

دستگاه مطابق شکل ۵-۹ تشکیل شده است از دو میله به طولهای مختلف که در وسط با زاویه قائمه به یکدیگر مربوط شده اند. پایه های A و B یکی از میله ها کوتاه تر از پایه های C و D میله دیگر هستند. در محل تلاقی میله ها، آینه کوچک و مسطح M قرار دارد که روی پایه قائمی نصب شده است. دستگاه را توسط پایه های A و C و D و روی صفحه شیشه ای تختی قرار دهید و پرتو نورانی SI را به آینه بتابانید و محل پرتو بازتابش را روی پرده ای که دارای خطکش مدرجی است تعیین کنید. سپس دستگاه را توسط پایه های B و C و D روی صفحه شیشه ثابت کنید و محل جدید پرتو بازتابش روی پرده را بیابید و d فاصله بین این دو محل را اندازه بگیرید.

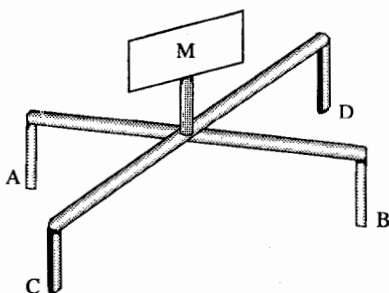
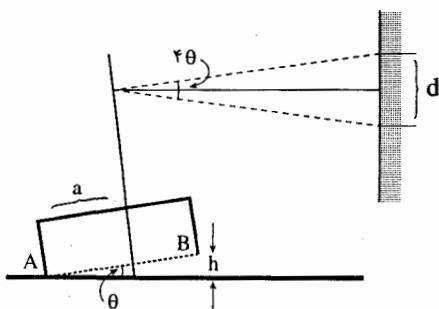
اگر زاویه بین امتداد AB و سطح افقی را با  $\theta$  نشان دهیم، آینه به اندازه  $2\theta$  دوران می یابد و پرتو بازتابش به اندازه  $4\theta$  منحرف می شود. بنابراین با توجه به شکل ۵-۹ می توان نوشت  $2\theta = \frac{h}{\frac{1}{2}a} = \frac{h}{a}$  که در این رابطه h فاصله پایه B تا سطح افقی است که در بالاترین حد ممکن قرار دارد و a نصف طول میله AB است. از طرفی اگر فاصله پرده تا آینه را با l نشان دهیم می توان نوشت

$$\frac{d}{L} = 4\theta \text{ پس}$$

$$h = \frac{a \cdot d}{2L} \quad \text{یا} \quad \frac{d}{L} = \frac{2h}{a}$$

اگر اختلاف طول پایه های دستگاه  $h'$  باشد،  $h' = \frac{h}{2}$  و در نتیجه  $h' = \frac{ad}{4L}$ . تیغه ای به ضخامت e را زیر پایه های C و D قرار دهید و درجات خطکش را مطابق حالت قبل بخوانید و اختلاف آنها را با  $d'$  نشان دهید. پس

$$e + h' = \frac{ad'}{4L}$$



شکل ۵-۹



b دستگاهی را که در اختیار دارید به دست آورید. مقادیر به دست آمده را در جدول زیر یادداشت و از فرمول، شعاع انحنای عدسی را محاسبه کنید.

برای هریک از عدسیها دو مرتبه اندازه گیری را تکرار کنید و برای هر کدام R میانگین را به دست آورید.

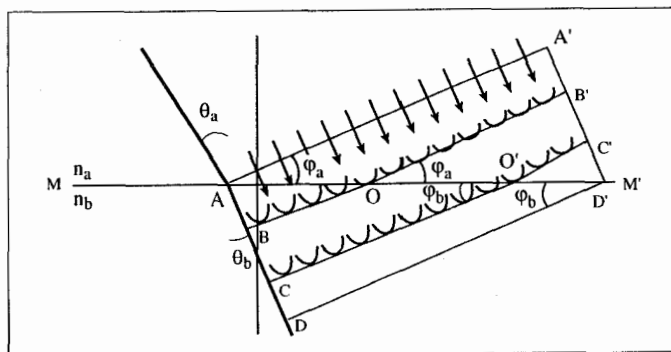
نوع عدسی	d	d'	L	R	میانگین R
(۱)					
(۲)					
(۳)					

## آزمایش ۲۷ شکست نور

### مقدمه

هویگنس در سال ۱۶۷۸ نظریه موجی نور را بیان داشت. مطابق این نظریه کلیه نقاط سطح موج خود به منزله چشمه‌های جدید نقطه‌ای‌اند و امواجی در تمام جهتها منتشر می‌کنند که سرعت آنها مساوی سرعت انتشار موج است. وضعیت جدید سطح موج پس از زمان  $t$ ، صفحه‌ای است مماس بر امواج کوچک ثانوی که آن را جبهه موج گویند. در محیطی که ترکیب شیمیایی و چگالی و دمای تمام نقاط آن یکسان باشد سرعت انتشار نور در تمام جهتها مساوی است.

دو محیط به ضریب شکستهای  $n_a$  و  $n_b$  را در نظر می‌گیریم که سطح جدایی آنها  $MM'$  باشد. موج تختی در محیط اول حرکت می‌کند. پس از آنکه به وضعیت  $AA'$  رسید قسمتی از آن با سرعت  $v_a$  و قسمت دیگر با سرعت  $v_b$  حرکت می‌کند. پس از زمان  $t$  سطوح کروی در محیط اول به شعاع  $v_a t$  و در محیط دوم  $v_b t$  هستند. البته بین نقاط  $A'$  و  $A$  امواجی هستند که در زمان  $t_1$  در محیط اول و در زمان  $t_2$  در محیط دوم منتشر شده‌اند به طوری که  $t_1 + t_2 = t$  است و مسافتهای طی شده توسط آنها  $v_a t_1 + v_b t_2$  است. سطح موج خط شکسته  $BOB'$  و پس از زمان  $t$  سطح موج  $DM'$  خواهد بود (شکل ۵-۱۱).



شکل ۵-۱۱

زوایای  $\varphi_a$  و  $\varphi_b$  اضلاعشان بر زوایای  $\theta_a$  و  $\theta_b$  عمود است، در نتیجه این دو زاویه برابر زوایای تابش و شکست هستند.

در مثلث قائم‌الزاویه  $AA'D'$  داریم

$$\sin \varphi_a = \frac{v_a t}{AD'}$$

و در مثلث قائم‌الزاویه  $DD'A$  داریم

$$\sin \varphi_b = \frac{v_b t}{AD'}$$

از تقسیم این دو به یکدیگر نتیجه می شود

$$\frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_b} = \frac{v_a}{v_b} \quad \text{یا} \quad \frac{\sin \varphi_a}{\sin \varphi_b} = \frac{v_a}{v_b} \quad (۱)$$

بنابر تعریف نسبت سرعت نور در خلأ به سرعت نور در یک محیط را ضریب شکست آن محیط گویند. در محیط اول  $n_a = \frac{c}{v_a}$  و در محیط دوم  $n_b = \frac{c}{v_b}$  یا

$$\frac{n_b}{n_a} = \frac{v_a}{v_b} \quad (۲)$$

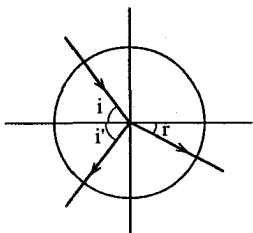
در نتیجه رابطه (۱) به صورت زیر درمی آید

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b \quad \text{یا} \quad \frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_b} = \frac{n_b}{n_a}$$

هدف آزمایش: تعیین ضریب شکست شیشه.

وسایل آزمایش: سره نوری - چراغ رویت - دیسک هارتل - میان بند - دیوپتر نیم کروی - تیغه متوازی السطوح شیشه ای - کاغذ سفید یک برگ - مداد - سنجاق ته گرد - خط کش - تخته - ظرف آب - پرگار - نقاله - پایه گیره دار.

آزمایش الف) دیوپتر نیم کروی را روی دیسک هارتل قرار دهید. به طوری که مرکز آن بر مرکز دیسک منطبق باشد. میان بند تک شکافی را جلو چراغ رویت بگذارید. یک دسته پرتو نورانی خیلی باریک به دیوپتر بتابانید. قسمتی از نور بازتابش می یابد و قسمتی دیگر وارد دیوپتر می شود و پس از شکست از آن بیرون می آید. با چرخاندن دیسک وضعی را پیش آورید که پرتو بازتابش عمود بر پرتو شکست باشد (شکل ۵-۱۲). بنابر این  $r = \frac{\pi}{4} - i$  زیرا  $r + i + \frac{\pi}{4} = \pi$  است.



$$n = \frac{\sin i}{\sin(\frac{\pi}{4} - i)} = \frac{\sin i}{\cos i}$$

$$n = \tan i \quad \text{یا}$$

زاویه  $i$  را در این حالت زاویه بروستر گویند و  $n$  ضریب شکست

شیشه نسبت به هواست.

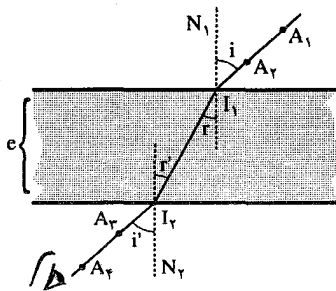
شکل ۵-۱۲

آزمایش ب) مانند آزمایش قبل دیوپتر را روی دیسک هارتل قرار دهید. نور را از طرف قسمت منحنی دیوپتر بتابانید. با چرخاندن دیوپتر و تعیین تانژانت زاویه بروستر، ضریب شکست هوا نسبت به شیشه را به دست آورید.

پرسش: دو مقداری که در این دو آزمایش برای  $n$  به دست می آورید چه نسبتی باهم دارند؟

آزمایش پ) یک صفحه کاغذ سفید را روی میز قرار دهید و تیغه متوازی السطوح شیشه‌ای را روی آن بگذارید. در یک طرف تیغه دو سنجاق  $A_1$  و  $A_2$  را روی کاغذ به طور قائم طوری فرو برید که از طرف دیگر هردو در یک امتداد مشاهده شوند و در طرفی که از آن نگاه می‌کنید دو سنجاق  $A_3$  و  $A_4$  را نیز به طور قائم در کاغذ فرو کنید تا ۴ سنجاق در یک امتداد دیده شوند. با مداد نوک‌تیزی اطراف تیغه شیشه‌ای را به دقت خط‌کشی کنید. شیشه را بردارید و محل سنجاقهای  $A_1$  و  $A_2$  و همچنین  $A_3$  و  $A_4$  را به هم وصل کنید و امتداد دهید تا اثر تیغه را در نقاط  $I_1$  و  $I_2$  قطع کنند. از نقاط  $I_1$  و  $I_2$  خطوط  $I_1N_1$  و  $I_2N_2$  را برکناره‌های تیغه عمود کنید و سپس  $I_1$  را به  $I_2$  وصل کنید (شکل ۵-۱۳).

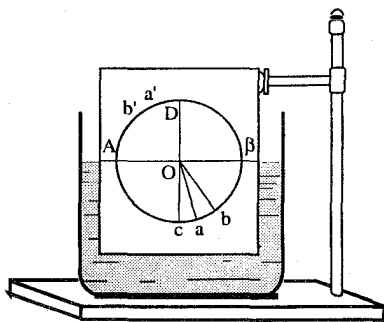
زوایای تابش و شکست را اندازه‌گیری کنید و مقدار ضریب شکست را به دست آورید. آزمایش را چند بار تکرار و نتایج را در جدول زیر ثبت کنید و از مقادیر حاصل میانگین بگیرید.



شکل ۵-۱۳

ترتیب آزمایش	i	$\sin i$	r	$\sin r$	n
					میانگین

آزمایش ت) کاغذ را روی تخته بچسبانید و مرکز آن O را مشخص کنید. دایره‌ای به مرکز O و به شعاع حدود ۱۲cm رسم کنید. قطرهای افقی و قائم AB و CD را رسم کنید. حدود ۶ سنجاق را در نقاط a, b, ... فرو کنید. تخته را به طور قائم در ظرف آب قرار دهید. به طوری که قطر AB بر سطح آب قرار گیرد. سپس تخته را با گیره‌ای ثابت کنید. سنجاقهایی را در نقاط  $a', b', \dots$  چنان قرار دهید که  $a'Oa$  و  $b'Ob$  و ... در یک امتداد دیده شوند (شکل ۵-۱۴).



شکل ۵-۱۴

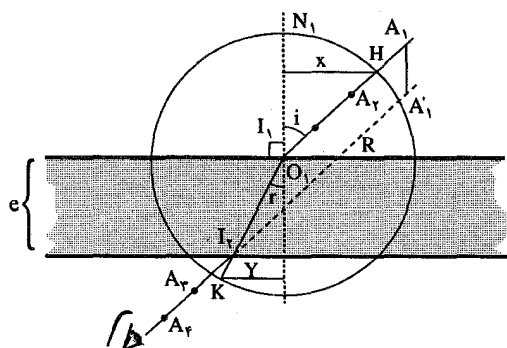
تخته را از آب بیرون آورید و خشک کنید. خطوط  $Oa$  و  $a'O$  و غیره را رسم کنید. به این ترتیب پرتوهای تابش و شکست مشخص می‌شوند. زاویه‌های تابش و شکست را با نقاله اندازه بگیرید و تحقیق کنید که نسبت  $\frac{\sin i}{\sin r}$  مقدار ثابتی است، و به این ترتیب ضریب شکست آب را نیز به دست آورید.



آزمایش ث) صفحه کاغذی را روی تخته سنجاق کنید. تیغه را روی کاغذ بگذارید و دور آن خط بکشید. به مرکز  $I_1$  واقع در سطح تیغه دایره دلخواهی به شعاع  $R$  رسم کنید. امتدادهای  $A_p A_p$  و  $A_r A_r$  بر سطح تیغه را مانند آزمایش قبل رسم کنید. راستای  $I_1 I_p$  را به دست آورید.  $A_p A_p$  و  $I_1 I_p$  دایره را در نقطه‌های  $H$  و  $K$  قطع می‌کنند. از  $H$  و  $K$  پاره خطهای  $x$  و  $y$  را بر خط  $N_1$  عمود کنید (شکل ۵-۱۵). ضریب شکست تیغه را از رابطه زیر حساب کنید

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\frac{x}{R}}{\frac{y}{R}} = \frac{x}{y}$$

آزمایش را برای زاویه‌های مختلف تکرار کنید و از نتایج حاصل میانگین بگیرید.



شکل ۵-۱۵

خط  $A_p A_p$  را امتداد دهید و از نقطه  $A_1$  خطی موازی  $N_1$  رسم کنید. این دو خط یکدیگر را در  $A'_1$  قطع می‌کنند.  $A_1 A'_1$  فاصله جسم تا تصویرش در تیغه است.  $A_1 A'_1$  را توسط خطکش و  $e$  ضخامت تیغه را با کولیس اندازه بگیرید و  $n$  ضریب شکست تیغه را از رابطه زیر حساب کنید

$$A_1 A'_1 = e \left( 1 - \frac{1}{n} \right)$$

### پرسشها

- ۱- چرا امتدادهای  $A_p A_p$  و  $A_r A_r$  موازی‌اند؟
- ۲- آیا ضخامت تیغه در آزمایش پ مؤثر است؛ چرا؟
- ۳- فرمول  $A_1 A'_1 = e \left( 1 - \frac{1}{n} \right)$  را اثبات کنید.

## آزمایش ۲۸ اندازه گیری ضریب شکست تیغه شیشه‌ای به وسیله میکروسکوپ

### مقدمه

تیغه متوازی السطوح، محیط شفاف است که به وسیله دو دیوپتر تخت از محیط مجاور جدا شده باشد.

یک پرتو نوری تحت زاویه  $i$  به تیغه شیشه‌ای به ضخامت  $e$  می‌تابد. با توجه به شکل ۵-۱۶ می‌توان نوشت

$$n_1 \sin i = n_r \sin r$$

$$n_1 \sin i' = n_1 \sin r'$$

چون  $r = i'$  است در نتیجه

$$n_1 \sin i = n_1 \sin r'$$

یا  $i = r'$  یعنی پرتوهای ورودی و خروجی بایکدیگر موازی‌اند.

چهارضلعی  $AI'KA'$  متوازی الاضلاع است و اگر فاصله جسم تا تصویرش را با  $d$  نشان دهیم

در مثلثهای  $I'KH$  و  $I'H$  داریم  $\tan r = \frac{IH}{I'H}$  و  $\tan i = \frac{IH}{KH}$  از

تقسیم آنها بر یکدیگر  $\frac{\tan i}{\tan r} = \frac{I'H}{KH}$  یا  $\frac{\sin i}{\sin r} = e \frac{\cos i}{\cos r}$  یا  $(e-d) \frac{\sin i}{\sin r} = e \frac{\cos i}{\cos r}$

$$(e-d) \frac{n_r}{n_1} = e \frac{\cos i}{\cos r}$$

چون پرتو فرودی نزدیک به عمود است  $\cos r$  و  $\cos i$  هردو تقریباً مساوی یک بوده و در نتیجه خواهیم داشت

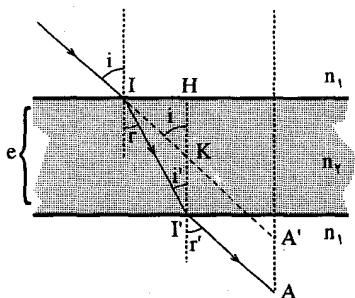
$$n_r = \frac{e}{e-d} n_1$$

در صورتی که نور از هوا به تیغه تابیده باشد  $n_1 = 1$  و در نتیجه  $n_r = \frac{e}{e-d}$  است.

هدف آزمایش: اندازه‌گیری ضریب شکست تیغه و مایعات با میکروسکوپ.

وسایل آزمایش: میکروسکوپ - لام - تیغه‌های مختلف - چراغ رویتر - پارافین - نفت - گلیسرین - آب.

آزمایش الف) روی یک شیشه مستطیل شکل (لام) علامت + بگذارید و آن را روی صفحه میکروسکوپ قرار دهید و در جای خود ثابت کنید به طوری که علامت + در سطح بالایی صفحه باشد. لوله میکروسکوپ را تغییر مکان دهید تا علامت به وضوح دیده شود.  $a$  درجه و رنیه میکروسکوپ را در این حالت یادداشت کنید. سپس تیغه مورد نظر را که روی آن علامت  $\times$  دارد روی شیشه قبلی بگذارید به طوری که



شکل ۱۶-۵

علامتها روی هم قرار گیرند. لوله میکروسکوپ را آن قدر جابه‌جا کنید تا تصویر + مجدداً به‌وضوح دیده شود.  $b$  درجهٔ ورنیه را بخوانید. تفاوت دو درجه خوانده شده  $d = a - b$  است. اکنون محل لوله را تغییر دهید تا علامت  $\times$  به‌طور واضح دیده شود.  $c$  درجهٔ ورنیه را بخوانید. ضخامت تیغه  $e = c - a$  خواهد بود.

با در دست داشتن  $d$  و  $e$  می‌توان  $n$  ضریب شکست تیغه را به‌دست آورد. آزمایش را برای تیغه‌های مختلف تکرار کنید و هر بار ضخامت تیغه را با ریزسنج نیز به‌دست آورید و جدول زیر را پر کنید

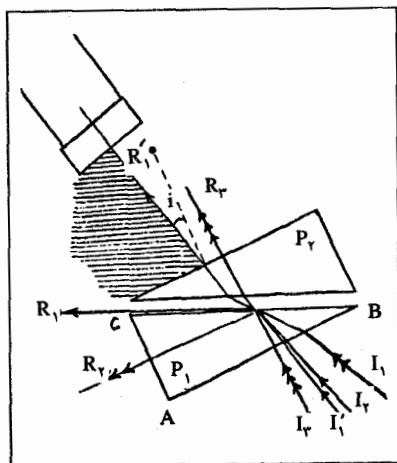
$n$	میانگین	ریزسنج	$e$ میکروسکوپ	$c$	$d$	$b$	$a$	نوع تیغه

آزمایش ب) در قسمت بالای ته ظرف شیشه‌ای علامتی بگذارید و به‌وسیله میکروسکوپ تصویر واضح آن را مشاهده کنید. سپس تا ارتفاع  $e$  در آن مایع مورد نظر را بریزید و مقادیر  $d$  و  $e$  را مانند آزمایش قبل اندازه‌گیری کنید و ضریب شکست مایع را به‌دست آورید.

## آزمایش ۲۹ شکست سنج آب

### مقدمه

شکست سنج آب براساس پدیده بازتاب کلی کار می‌کند و تشکیل شده است از دو منشور قائم‌الزاویه شبیه هم که مجاور یکدیگر قرار داده شده‌اند. بین آنها یک لایه نازک مایعی که ضریب شکست آن کمتر از ضریب شکست منشورهاست، قرار می‌گیرد. پرتوهای نورانی به سطح  $AB$  برخورد می‌کنند و قسمتی از آنها مانند  $I_1$  که با زاویه حد (زاویه حد میان منشور و مایع) به سطح  $BC$  می‌تابند به‌طور مماس بر سطح  $BC$  در امتداد  $R_1$  خارج می‌شوند. پرتوهایی نظیر  $I'_1$  که با زاویه اندکی کمتر از زاویه حد به سطح جدایی منشور و مایع برخورد می‌کنند پس از عبور از مایع و منشور بالایی در امتدادی مانند  $R'_1$  خارج می‌شوند و قسمت دیگری مانند  $I_p$  که با زاویه‌ای بزرگتر از زاویه حد به سطح جدایی برخورد می‌کنند بازتاب کلی پیدا می‌کنند و از منشور بالایی خارج نمی‌شوند. تمام پرتوهایی نظیر  $I_p$  که با زاویه‌ای کوچکتر از زاویه حد به سطح جدایی برخورد می‌کنند از لایه مایع می‌گذرند و از منشور بالایی خارج می‌شوند. بنابراین پرتوهایی مانند  $I'_1$  فضای بعد از سطح خروجی منشور را به دو ناحیه تقسیم می‌کنند. سطحی که در بین دو ناحیه است در شکل



شکل ۵-۱۷

۵-۱۷، عمود بر صفحه کاغذ است و  $R'_1$  در آن واقع شده است. یکی از این ناحیه‌ها روشن و دیگری تاریک است که با دوربینی مشاهده می‌شوند. محور دوربین را می‌توان در امتداد شعاع  $R'_1$  میزان کرد. چون کلفتی لایه مایع بین دو منشور، بسیار نازک است عملاً اختلاف زاویه تابش بین پرتو  $I_1$  و  $I'_1$  بر سطح منشور پایینی قابل چشمپوشی است و می‌توان پرتو  $I'_1$  را پرتوی دانست که با زاویه تابش حد بر سطح لایه تابیده است.

با معلوم بودن ضریب شکست منشورها، زاویه حد برای مایع مورد نظر و در نتیجه ضریب شکست مایع به دست می‌آید.

شرح دستگاه - دستگاه شکست سنج آب مطابق شکل ۵-۱۸، از قسمتهای زیر تشکیل شده

است:

۱- پایه دستگاه که دوربین و محفظه نگهدارنده منشورها روی آن سوار شده‌اند و مجموع آنها را

حول محوری افقی که روی انتهای بالایی شاخه قائم پایه قرار دارند، می توان دوران داد.

۲- محفظه نگهدارنده منشورها که چهار لوله به آن متصل است و به وسیله آنها آب با دمای

ثابتی در محوطه ای که اطراف منشورها را فرا گرفته است، جاری می شود. محفظه شامل دو قطعه است که از یک طرف به هم لولا شده اند و با گیره ای روی هم بسته می شوند. موقعی که محفظه باز می شود سطح وتر دو منشور دیده می شود که سطح پایینی مات و سطح بالایی کاملاً صیقلی است.

۳- دوربین طوری قرار گرفته که با میزان کردن عدسی چشمی، محل جدایی دو منطقه تاریک و روشن به وضوح در آن دیده می شود. در میدان دید چشمی نشانه ای به صورت دو خط متقاطع وجود دارد. محل جدایی دو ناحیه باید از محل تقاطع دو خط نشانه بگذرد.

۴- پیچی که با تغییر آن لبه های رنگین محل جدایی دو ناحیه را می توان از بین برد.

۵- بازویی که انتهای قسمت بالایی آن به وسیله یک پیچ روی کمان مدرجی حرکت می کند و با حرکت دادن آن محفظه نگهدارنده منشورها دوران می یابد و می توان وضعیت منشورها

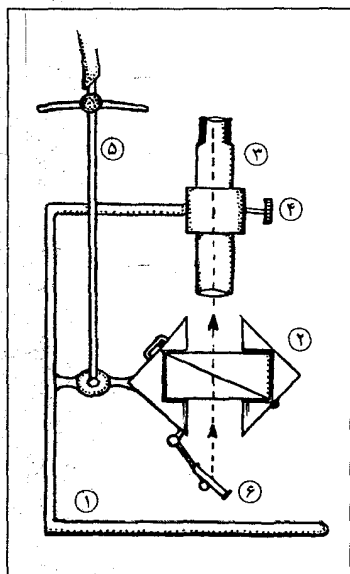
را طوری تنظیم کرد که محل جدایی دو ناحیه تاریک و روشن بر محل تقاطع دو خط نشانه چشمی دوربین منطبق شود. در این صورت ضریب شکست مایع را می توان روی درجات دستگاه خواند.

۶- آینه ای که پرتوهای نورانی را به سوی سطح آزاد منشور متمرکز می کند.

هدف آزمایش: تعیین ضریب شکست مایعات.

وسایل آزمایش: دستگاه شکست سنج آبه - چند نوع مایع مانند پارافین، گلیسرین، نفت.

روش آزمایش: سطح هردو منشور باید کاملاً تمیز و خشک باشد. محفظه را باز کنید و منشور پایینی را در حول لولای آن دوران دهید تا سطح وتر آن تقریباً به طور افقی قرار گیرد. به وسیله یک میله شیشه ای قطره کوچکی از مایع مورد نظر را روی سطح منشور بالایی که قدری شیب دار است قرار دهید و منشور پایینی را بچرخانید تا به منشور بالایی بچسبد. محفظه را ببندید و مجموع دستگاه را به وضعیت قائم برگردانید. آینه را میزان کنید تا میدان دید دوربین روشن به نظر برسد. محفظه منشورها را به وسیله بازوی متصل به آنها دوران دهید تا محل جدایی دو ناحیه تاریک و روشن در میدان دید دوربین واقع شوند. توسط پیچ تنظیم لبه های رنگین نوار محل جدایی را حذف کنید و محفظه را طوری میزان کنید



شکل ۱۸-۵

تا محل جدایی دو ناحیه بر محل برخورد دو خط نشانه چشمی منطبق شود. مقدار ضریب شکست را بخوانید و برای هر مایع چهار مرتبه آزمایش را تکرار کنید و میانگین را محاسبه و نتایج را در جدول زیر یادداشت کنید.

نوع مایع	ضریب شکست در آزمایشهای تکراری				میانگین
	۱	۲	۳	۴	

# آزمایش ۳۰ منشور

## مقدمه

منشور محیط شفافى است که توسط دو سطح تخت متقاطع از محیط اطراف جدا شده باشد. زاویه بین دو سطح متقاطع را زاویه رأس و سطح مقابل آن را قاعده منشور گویند. هر یک از دو سطح متقاطع را وجه منشور نامند (شکل ۵-۱۹).

با توجه به شکل در وجه AB خواهیم داشت

$$\sin i = n \sin r \quad (۱)$$

و در وجه AC می توان نوشت

$$\sin i' = n \sin r' \quad (۲)$$

زاویه  $I_1NP$  با زاویه رأس منشور برابر است (چون اضلاعشان بر هم عمودند). این زاویه برای مثلث  $NI_1I_2$  زاویه خارجی و برابر دو زاویه داخلی غیر مجاور است

$$A = r + r' \quad (۳)$$

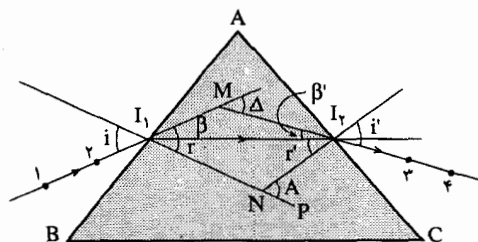
در مثلث  $MI_1I_2$  داریم

$$\Delta = \beta + \beta' \quad \text{یا} \quad \Delta = (i - r) + (i' - r') \quad \text{یا} \quad \Delta = i + i' - (r + r')$$

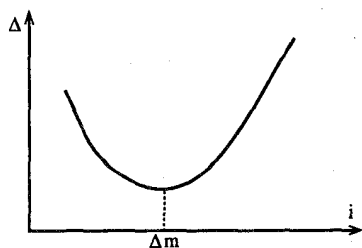
و با توجه به رابطه (۳) می توان نوشت

$$\Delta = i + i' - A \quad (۴)$$

زاویه انحراف بستگی به زاویه تابش دارد. اگر منشور را به تدریج حول محوری که از  $I_1$  می گذرد، دوران دهیم، زاویه انحراف ابتدا کم می شود و به مقدار مینیمی می رسد و سپس با اینکه دوران در



شکل ۵-۱۹



شکل ۵-۲۰

همان جهت ادامه دارد، زاویه انحراف بیشتر می‌شود (شکل ۵-۲۰).

منحنی تغییرات  $\Delta$  برحسب  $i$  به شکل ۵-۲۰ است. دیفرانسیل روابط (۱) و (۲) عبارتند از

$$\cos i \, di = n \cos r \, dr$$

$$\cos i' \, di' = n \cos r' \, dr'$$

از تقسیم این دو رابطه به یکدیگر نتیجه می‌شود

$$\frac{di'}{di} = \frac{\cos r' \cos i \, dr}{\cos r \cos i' \, dr'}$$

دیفرانسیل رابطه (۳) به صورت  $dr + dr' = 0$  است. در نتیجه  $dr = -dr'$  بنابراین

$$\frac{di'}{di} = -\frac{\cos r' \cos i}{\cos r \cos i'} \quad (5)$$

برای تعیین زاویهٔ مینیمم انحراف مشتق رابطه (۴) نسبت به  $i$  را مساوی صفر می‌گیریم

$$\frac{d\Delta}{di} = 1 + \frac{di'}{di} = 0$$

با توجه به رابطه (۵) داریم

$$\frac{\cos r' \cos i}{\cos r \cos i'} = 1$$

طرفین را مجذور می‌کنیم

$$\frac{\cos^2 i}{\cos^2 r} = \frac{\cos^2 i'}{\cos^2 r'} \quad \text{یا} \quad \frac{\cos^2 r' \cos^2 i}{\cos^2 r \cos^2 i'} = 1$$

بنابراین

$$\frac{1 - \sin^2 i}{1 - \frac{\sin^2 i}{n^2}} = \frac{1 - \sin^2 i'}{1 - \frac{\sin^2 i'}{n^2}}$$

یا

$$\frac{1 - \sin^2 i}{n^2 - \sin^2 i} = \frac{1 - \sin^2 i'}{n^2 - \sin^2 i'}$$

رابطه فوق در صورتی برقرار است که  $i = i'$  باشد در نتیجه  $r = r'$  خواهد بود. بنابراین رابطه (۴) در مینیمم انحراف به صورت زیر است

$$i = \frac{\Delta_m + A}{\gamma} \quad \text{یا} \quad \Delta_m = \gamma i - A$$



همچنین رابطه (۳) به صورت زیر است

$$r = \frac{A}{\gamma} \quad \text{یا} \quad A = \gamma r$$

مقادیر  $i$  و  $r$  را در رابطه (۱) قرار می‌دهیم نتیجه می‌شود

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\Delta m + A}{\gamma}\right)}{\sin\left(\frac{A}{\gamma}\right)} \quad (۴)$$

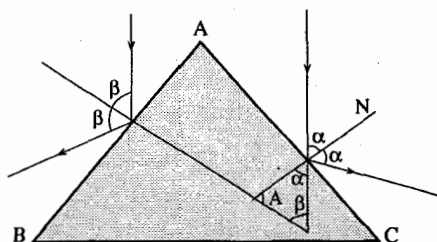
هدف آزمایش: تعیین زاویه رأس و مینیمم انحراف و ضریب شکست منشور.

وسایل لازم: منشور - چراغ رویتر - کاغذ - نقاله - خطکش - سنجاق ته‌گرد - دیسک هارتل - تخته.

آزمایش الف) یک صفحه کاغذ سفید را روی میز قرار دهید و روی آن منشوری بگذارید. سنجاهای (۱) و (۲) در قسمت جلو و سنجاهای (۳) و (۴) را در قسمت عقب منشور به‌طور قائم طوری قرار دهید که هر چهار سنجاق در یک امتداد مشاهده شوند (شکل ۵-۱۹).

خطی که شامل سنجاهای ۱ و ۲ است پرتو ورودی به منشور و خطی که شامل سنجاهای ۳ و ۴ است پرتو خروجی از منشور است. آن دو را امتداد دهید و زاویه انحراف را پیدا کنید. خطوط عمود بر وجه‌های AB و AC را رسم کنید و مقادیر  $i$  و  $i'$  را به‌دست آورید. از فرمول  $\Delta = i + i' - A$  مقدار زاویه رأس منشور را پیدا کنید.

آزمایش ب) یک دسته پرتو نورانی از طرف زاویه رأس منشور را طوری به آن بتابانید که پرتوهای کناری به وجه‌های AB و AC برخورد کنند. قسمتی از آنها بازتابش می‌کنند. زوایای  $\alpha$  و  $\beta$  را تعیین کنید (شکل ۵-۲۱). از فرمول  $A = \pi - (\alpha + \beta)$  زاویه رأس منشور را به‌دست آورید.



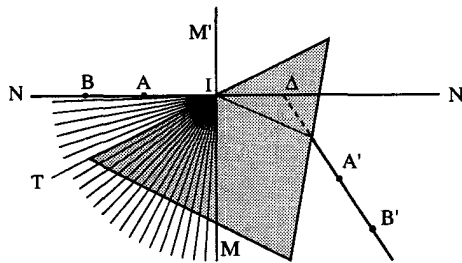
شکل ۵-۲۱

آزمایش پ) منشور را مطابق شکل روی دیسک هارتل قرار دهید، با چرخاندن دیسک و ثابت نگه‌داشتن پرتو تابش زاویه ورودی را تغییر دهید و مقادیر زوایای  $i$  و  $\Delta$  را به‌دست آورید و جدول زیر را پر کنید

i	
$\Delta$	

از روی تغییرات  $\Delta$  نسبت به  $i$  یا رسم تغییرات این دو زاویه مینیمم انحراف  $\Delta_m$  را به دست آورید و از رابطه (۶) ضریب شکست را پیدا کنید.

آزمایش (ت) کاغذ را روی تخته قرار دهید. دو خط عمود بر هم  $NN'$  و  $MM'$  در وسط کاغذ رسم کنید. مطابق شکل ۵-۲۲ زاویه قائمه ربع سوم را با نقاله ۶ درجه به ۶ درجه تقسیم کنید (پانزده زاویه ۶ درجه‌ای).



شکل ۵-۲۲

دو سنجاق A و B را روی امتداد NI نصب کنید منشور را مماس بر یکی از امتدادهای تقسیم شده مثلاً TI قرار دهید. از طرف دیگر منشور راستای AB را نگاه کنید و سنجاچه‌های A' و B' را چنان رسم کنید که با A و B در یک امتداد دیده شوند. در این حالت زاویه تابش برابرست با  $i = \widehat{MIT}$  (چرا؟) زاویه انحراف  $\Delta$  را با نقاله اندازه بگیرید. این آزمایش را از کوچکترین زاویه تابش تا بزرگترین زاویه تابش انجام دهید. و زاویه‌های انحراف هر یک را اندازه بگیرید. مطابق آزمایش پ زاویه مینیمم انحراف و ضریب شکست منشور را به دست آورید.

## پرسشها

- ۱- چرا نور سفید در منشور تجزیه می‌شود؟
- ۲- چند نمونه از کاربردهای منشور را شرح دهید و مسیر نور را در هر یک رسم کنید.

# آزمایش ۳۱ عدسیها

## مقدمه

پرتوی از نقطه نورانی O در محیطی به ضریب شکست  $n_1$  منتشر و به محیطی به ضریب شکست  $n_2$  وارد می شود. سطح جدایی دو محیط، یک سطح کروی است. خطی که از مرکز انحنای سطح کروی و نقطه O می گذرد محور عدسی نامیده می شود.

پرتو OA پس از برخورد به سطح شکسته و در امتداد IR وارد محیط دوم می شود. چون پرتو OB عمود بر سطح است بدون شکست در همان امتداد وارد محیط دوم می شود. این دو پرتو یکدیگر را در نقطه I قطع می کنند. با توجه به شکل ۵-۲۳ می توان نوشت

$$\theta_1 = \alpha + \beta$$

$$\beta = \theta_2 + \gamma$$

چون  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$  است، موقعی که زاویه  $\alpha$  کوچک باشد، بقیه زوایا نیز کوچکند و  $n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2$  خواهد بود و داریم  $n_1(\alpha + \beta) = n_2(\beta - \gamma)$  از طرفی  $\alpha = \frac{OA}{p}$  و  $\beta = \frac{OA}{R}$  و  $\gamma = \frac{OA}{q}$  است، بنابراین

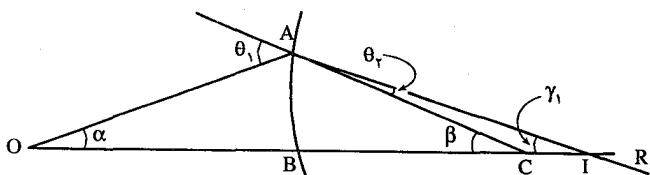
$$n_1 \left( \frac{OA}{p} + \frac{OA}{R} \right) = n_2 \left( \frac{OA}{R} - \frac{OA}{q} \right)$$

پس از ساده کردن نتیجه می شود

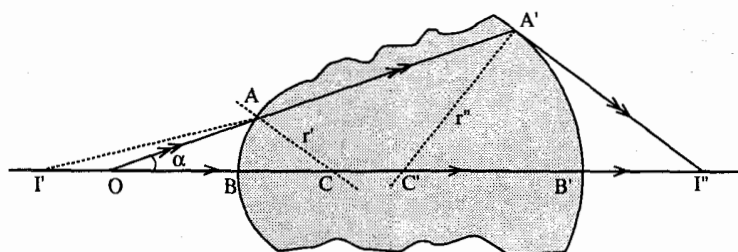
$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad (1)$$

این رابطه در مورد سطح شکست کروی صادق است و تنها شرط دقت آن کوچکی زاویه پرتو تابش با محور است.

حال محیط شفافی به ضریب شکست  $n$  و ضخامت  $BB' = l$  را در نظر می گیریم که محدود به دو سطح کروی باشد. شعاعهای کره ها  $r'$  و  $r''$  هستند. مطابق شکل ۵-۲۴ تصویر O که نزدیک به دستگاه است در سطح اول I' است. این نقطه برای سطح دوم به منزله جسم بوده و تصویرش I'' است. بنابراین تصویر O در دستگاه I'' است.



شکل ۵-۲۳



شکل ۵-۲۴

در مورد سطح اول با در نظر داشتن  $n_1 = n$  و  $n_2 = n_p$  و مجازی بودن تصویر رابطه (۱) به صورت زیر در می آید

$$\frac{1}{p'} - \frac{n}{q'} = \frac{n-1}{R'} \quad (2)$$

در سطح دوم  $p'' = q' + l$  و  $n_1 = n$  و  $n_2 = 1$  است. رابطه (۱) به صورت زیر در می آید

$$\frac{n}{q' + l} + \frac{1}{q''} = \frac{1-n}{R''} \quad (3)$$

اگر فاصله دو سطح ناچیز باشد، یعنی در حقیقت عدسی نازکی داشته باشیم، از کمیت  $l$  در مقابل سایر کمیتها می توان صرف نظر کرد. از جمع روابط (۱) و (۲) و منظور داشتن  $q'' = q$  و  $p' = p$  خواهیم داشت

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = (n-1) \left( \frac{1}{R'} - \frac{1}{R''} \right) \quad (4)$$

این معادله که معادله عدسی نازک نامیده می شود تنها برای پرتوهایی که با محور زاویه کوچکی می سازند برقرار است.

اگر پرتوها از بی نهایت بتابند تصویر در کانون تشکیل می شود،  $p = \infty$ ،  $q = f$  و فرمول بالا به صورت  $\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{R'} - \frac{1}{R''} \right)$  در می آید. از ترکیب آن با رابطه (۴) خواهیم داشت

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

هدف آزمایش: بررسی عدسیهای همگرا (کوز) و واگرا (کاو) و تعیین فاصله کانونی آنها.

وسایل لازم: چراغ رویتز - میان بند - آینه تخت - عدسیهای همگرا و واگرا - پرده - دوربین - متر - تخت دیدگانی.

آزمایش الف) به وسیله میان بند با سوراخ ریز، یک نقطه نورانی به وجود آورید و آن را جلو عدسی جابه جا کنید تا یک دسته پرتو نورانی کاملاً موازی از عدسی خارج شود. آینه تختی را به موازات عدسی

و در مقابل آن قرار دهید. پرتوهای موازی پس از بازتابش در آینه، مجدداً به عدسی می‌تابند و در محل نقطه نورانی می‌شود. فاصله نقطه نورانی تا عدسی برابر  $f$  خواهد بود.

آزمایش (ب) شیء با پیکان را جلو چراغ رویتر قرار دهید و در مقابل آن یک پرده و بین پرده و چراغ، عدسی همگرایی بگذارید. پرده را آن قدر جابه‌جا کنید تا تصویر جسم به‌طور واضح روی پرده دیده شود. با اندازه‌گیری فاصله جسم تا عدسی و فاصله تصویر تا عدسی، فاصله کانونی عدسی همگرا را از رابطه زیر به‌دست آورید

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

به ازای مقادیر مختلف  $p$  اندازه  $q$  را تعیین و  $f$  را محاسبه کنید و از نتایج حاصل میانگین بگیرید.

آزمایش (پ) پرده را در فاصله نسبتاً دور از جسم قرار دهید. عدسی را بین جسم و پرده بگذارید و آن قدر آن را جلو و عقب ببرید تا تصویر جسم بر پرده به‌طور واضح دیده شود. عدسی را جابه‌جا کنید تا تصویر دیگری از جسم بر همان پرده به‌دست آید.  $d$  فاصله دو وضع عدسی و  $D$  فاصله جسم تا پرده را اندازه‌گیری کنید و فاصله کانونی را از فرمول  $f = \frac{D^2 - d^2}{4D}$  به‌دست آورید.

آزمایش (ت) ابتدا به کمک یک عدسی همگرا، تصویر جسم را روی پرده تشکیل دهید. سپس عدسی واگرا را بین پرده و عدسی همگرا قرار دهید، تصویر محو می‌شود، پرده را آن قدر عقب ببرید تا دوباره تصویر ظاهر شود. فاصله محل اول پرده تا عدسی و اگرچه فاصله جسم مجازی تا عدسی است برابر  $p$  است. فاصله محل دوم پرده تا عدسی و اگرچه  $q$  فاصله تصویر تا عدسی است. مقادیر  $p$  و  $q$  را اندازه بگیرید و از فرمول  $-\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = -\frac{1}{f}$  مقدار  $f$  را به‌دست آورید.

آزمایش (ث) شیء با پیکان را جلو چراغ رویتر بگذارید و پایه‌های دو عدسی همگرا و واگرا را به‌هم بچسبانید.  $e$  فاصله دو عدسی را در این حالت اندازه بگیرید. دستگاه دو عدسی را آن قدر جابه‌جا کنید تا تصویر در دو حالت روی پرده‌ای که در انتهای سره سوار کرده‌اید تشکیل شود.  $D$  فاصله جسم تا پرده و  $d$  فاصله دو وضع عدسی را اندازه بگیرید و از فرمول  $f = \frac{D^2 - d^2}{4D}$  مقدار فاصله کانونی دستگاه را به‌دست آورید. سپس  $f_1$  فاصله کانونی عدسی همگرا را به تنهایی پیدا کنید. مقادیر به‌دست آمده را در فرمول زیر بگذارید و  $f_1$  فاصله کانونی عدسی واگرا را حساب کنید.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{e}{f_1 f_2}$$

این آزمایش را چند بار تکرار و نتایج را در جدول بنویسید.

ترتیب آزمایش	e	D	f	$f_p$	$f_1$	میانگین $f_1$

آزمایش ج) جسمی را جلو عدسی واگرا قرار دهید و دوربین را میزان کنید تا تصویر جسم را بدون پارالاکس بر رتیکول دوربین ببینید. فاصله عدسی تا جسم،  $p$ ، و فاصله عدسی تا دوربین را اندازه بگیرید. سپس عدسی را بردارید و جسم را جلو بیاورید تا دو مرتبه تصویر آن بر رتیکول دوربین به طور واضح دیده شود. در این صورت جسم در محل سابق تصویر خود در عدسی قرار دارد. فاصله جسم و دوربین را اندازه بگیرید و فاصله دوربین تا عدسی را از آن کم کنید. فاصله تصویر تا عدسی،  $q$ ، به دست می آید. با استفاده از فرمول  $\frac{1}{p} - \frac{1}{q} = -\frac{1}{f}$ ، فاصله کانونی عدسی واگرا را به دست آورید.

### پرسشها

- ۱- فرمول  $f = \frac{D^2 - d^2}{4D}$  را اثبات کنید.
- ۲- چرا در آزمایش ۵ باید فاصله کانونی عدسی همگرا کمتر از فاصله کانونی عدسی واگرا باشد؟
- ۳- چرا با جابه جا کردن محل عدسی بین جسم و پرده، دوباره تصویر تشکیل می شود؟

## آزمایش ۳۲ = ابیراهی عدسیها

### مقدمه

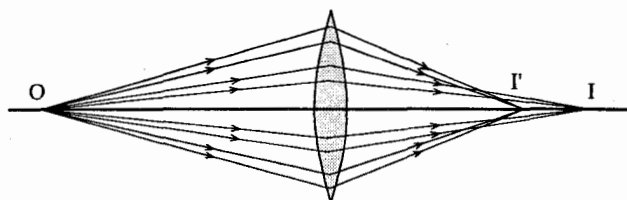
دستگاه نوری ایده آل باید از اجسام تصاویری تشکیل بدهد که کاملاً متناظر با جسم باشند. اختلاف تصویر واقعی که دستگاه تشکیل می دهد از تصویر ایده آل را ابیراهی گویند.

اگر دستگاه نوری از هر نقطه جسم، تصویری نقطه ای به وجود آورد، ایده آل است، که عملاً چنین دستگاهی وجود ندارد.

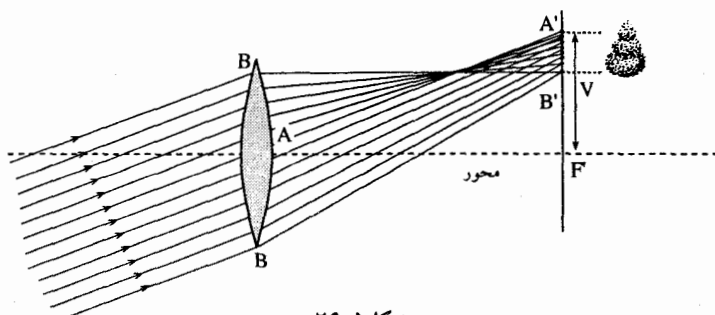
امواج نوری که از یک نقطه به صورت امواج کروی و اگر منتشر می شوند اگر موقع خروج از دستگاه نوری کاملاً کروی باشند (برای تصویر حقیقی همگرا و برای تصویر مجازی واگرا) محل تجمع آنها یک نقطه است. ولی در عمل امواج خارج شده از دستگاه نوری، کروی کامل نیست و هر بخش آن، قسمتی از یک کره با شعاع انحنای معینی است. موج نوری هریک از این بخشها در همان مرکز جمع می شود و تصویر حاصل به جای یک نقطه در یک ناحیه پخش می شود. عوامل مختلفی در ابیراهیها مؤثرند که بررسی و طرز برطرف کردن آنها از مسائل مهم نورشناسی هندسی است.

ابیراهی کروی روی محور - از نقطه نورانی O پرتوهای واگرایی به عدسی می تابند. به علت اینکه همگرایی یا واگرایی در کناره های عدسی بیشتر از مرکز آن است، از نقطه O تصویر I توسط پرتوهای نزدیک محور و تصویر I' توسط پرتوهای کناری تشکیل می شوند. در نتیجه از جسم نقطه ای O تصویر نقطه ای تشکیل نمی شود. در عمل کوچکترین دایره روشنی را که بین I و I' واقع می شود به عنوان تصویر در نظر می گیرند (شکل ۵ - ۲۵).

ابیراهی کما - اگر نقطه نورانی روی محور اصلی عدسی نباشد، تصویر آن به شکل ستاره دنباله داری است که ابیراهی پرتوهای مایل یا کما نامیده می شود. تصویر به جای اینکه دایره کوچکی باشد به صورت لکه ای کشیده تشکیل می شود. خطای کما، همان خطای کروی است که از قرار گرفتن نقطه نورانی در روی محور فرعی به دست می آید (شکل ۵ - ۲۶).

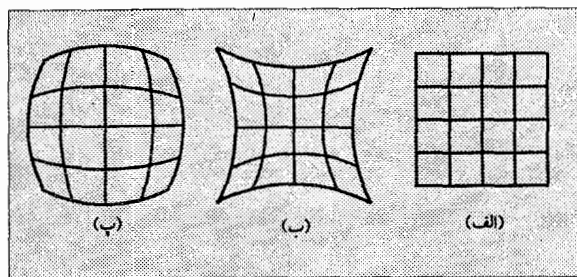


شکل ۲۵-۵



شکل ۲۶-۵

وایپیش یا اعوجاج - نظر به اینکه همگرایی عدسی برای پرتوهای وسطی و کناری به یک اندازه نیست، بزرگنمایی با تغییر فاصله نقاط جسم از محور، تغییر می‌کند و ابیراهی وایپیش را به وجود می‌آورد. با قرار دادن میان‌بند در فواصل مختلف از عدسی می‌توان آن را مشاهده کرد. موقعی که میان‌بند بین پرده و عدسی قرار می‌گیرد؛ بزرگنمایی با افزایش فاصله از محور افزایش می‌یابد و تصویر یک شبکه مربعی شکل ۵ - ۲۷ (الف) به صورت شکل ۵ - ۲۷ (ب) در می‌آید که آن را وایپیش هلالی می‌گویند. اگر میان‌بند بین عدسی و جسم قرار گیرد بزرگنمایی با افزایش فاصله از محور کاهش می‌یابد و تصویر یک شبکه مربعی به صورت شکل ۵ - ۲۷ (ب) در می‌آید که به آن وایپیش خمره‌ای می‌گویند.



شکل ۲۷-۵

شکل ۲۸-۵

ابیراهی رنگی - ضریب شکست عدسی با طول موج نور نسبت معکوس دارد. وقتی در یک عدسی همگرا ضریب شکست بیشتر شود، فاصله کانونی کمتر می‌شود. لذا کانون پرتوهای بنفش  $F'_V$  نزدیک‌تر به عدسی و کانون پرتوهای قرمز  $F'_R$  دورتر از عدسی است. به تعداد طول موجهایی که به عدسی می‌تابند کانون اصلی وجود خواهد داشت. اگر پرتوهای تابش، نور سفید باشند طیف آنها روی محور اصلی تشکیل می‌شود. موقعی که پرده عمود بر محور اصلی در کانون  $F_R$  قرار می‌گیرد مرکز تصویر قرمز و دور آن آبی رنگ خواهد بود و اگر پرده در کانون  $F_V$  قرار گیرد مرکز تصویر بنفش و دور آن قرمز است. طول  $F_V F_R$  را ابیراهی رنگی طولی و شعاع دایره  $CC'$  را ابیراهی رنگی عرضی گویند. موقعی



که پرده بین  $F_R$  و  $F_v$  در  $CC'$  واقع می‌شود رنگهای قرمز و بنفش روی هم قرار می‌گیرند و اطراف تصویر سفید رنگ است.

هدف آزمایش: بررسی ابیراهی عدسیها.

وسایل لازم: تخت دیدگانی - میان بند - پرده - عدسیهای همگرا و واگرا - فیلتر رنگی (قرمز و بنفش).

آزمایش الف) با میان‌بندی وسط عدسی را بیوشانید و پرتوهای کناری را از آن عبور دهید و کانون مربوطه را به دست آورید. سپس اطراف عدسی را بیوشانید و از وسط نور به آن بتابانید و کانون مربوطه را پیدا کنید. هر بار فاصله کانونی را اندازه‌گیری کنید و تفاضل آن دو، ابیراهی کروی را به دست آورید.

آزمایش ب) آزمایش را یک‌بار با عدسی کوژ که همگرایی آن  $D=10$  است انجام دهید. سپس دو عدسی همگرا و واگرا که همگرایی مجموع آنها  $D=10$  است به‌کار ببرید و آزمایش را تکرار کنید. ابیراهی کروی در کدام یک کمتر است؟

آزمایش پ) رشته چراغ رویترا طوری قرار دهید که پرتوهای نورانی به‌طور مایل به عدسی همگرای  $15\text{cm}+$  بتابد. شکل تصویر چگونه است؟ اگر رشته را به محور اصلی نزدیک کنیم چه اتفاقی می‌افتد؟

آزمایش ت) توری فلزی را جلو چراغ رویترا نصب کنید و تصویر آن را روی پرده‌ای که در پشت عدسی همگرایی به فاصله کانونی  $10\text{cm}+$  واقع شده است، به دست آورید. میان‌بندی را بین جسم و عدسی جابه‌جا کنید، تصویر چگونه می‌شود؟ بار دیگر میان‌بند را بین تصویر و عدسی جابه‌جا کنید، در این حالت تصویر را چگونه می‌بینید؟ اگر قطر روزنه میان‌بند تغییر یابد چه اتفاقی می‌افتد؟ به جای عدسی  $10+$  دو عدسی که فاصله کانونی مجموع آنها  $10+$  باشد قرار دهید. تصویر به چه حالت در می‌آید؟ برای کاهش اثر واپیچش باید چه تدبیری اتخاذ کرد؟

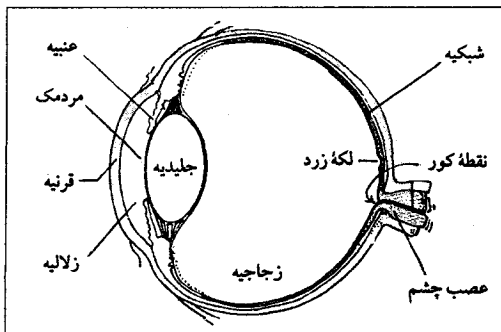
آزمایش ث) عدسی همگرای  $10+$  را در مقابل پرتوهای موازی قرار دهید و پرتوهای نور را که از صافی (فیلتر) قرمز گذشته است به آن بتابانید و کانون مربوط به پرتوهای قرمز را پیدا کنید. سپس صافی قرمز را بردارید و به جای آن صافی بنفش بگذارید و کانون مربوط را به دست آورید. فواصل کانونی را هر بار اندازه‌گیری کنید و تفاضل آنها، ابیراهی رنگی طولی را محاسبه کنید. پرده تصویر یاب را بین دو کانون قرار دهید و ابیراهی عرضی را به دست آورید.

## مقدمه

چشم انسان تقریباً به شکل کره‌ای است که دو سانتیمتر قطر دارد. غشای بیرونی چشم که کدر و سفید رنگ است در قسمت جلو شفاف و مقاوم و کمی برآمده است و قرنیه نامیده می‌شود. پرتوهای نوری پس از عبور از قرنیه از مایع شفاف دیگری به نام زلالیه عبور می‌کنند و سپس به عدسی چشم می‌رسند. جلو عدسی مردمک چشم قرار دارد که میزان نوری را که برای دیدن لازم است تنظیم می‌کند و برحسب مقدار نوری که از آن عبور می‌کند تنگتر یا گشادتر می‌شود. بعد از عدسی، پرتوهای نور از ماده شفافی به نام زجاجیه می‌گذرد و به شبکیه می‌رسد. شبکیه (عصب چشم) در قسمت درونی کره چشم گسترده شده است و پرتوهای نوری پس از شکست در محیطهای شفاف مذکور، تصویر اجسام را روی آن تشکیل می‌دهند.

چشم را برای سهولت با یک عدسی همگرای ساده و نازک نشان می‌دهند که مرکز نوری آن ۵ میلیمتر پشت قرنیه واقع است و فاصله کانونی آن، که معمولاً روی شبکیه می‌افتد، ۱۵ میلیمتر است (شکل ۵-۲۹). اگر تصویر اجسام خارجی روی شبکیه بیفتد واضح دیده می‌شود و در غیر این صورت انسان اشیاء را محو و مبهم می‌بیند.

**چشم طبیعی - جسمی که در مقابل چشم قرار دارد و واضح دیده می‌شود، اگر جلوتر بیاید تصویر در پشت شبکیه و اگر عقب‌تر رود تصویر جلو شبکیه تشکیل می‌شود.** در این دو صورت جسم به‌طور واضح دیده نمی‌شود. ولی در عمل ملاحظه می‌شود که تصویر واضح است زیرا عدسی چشم تغییر انحنای می‌دهد و با تغییر فاصله کانونی عدسی به حد لزوم، تصویر همواره روی شبکیه می‌افتد. برای این منظور ماهیچه‌های طرفین عدسی به آن فشار وارد می‌کنند و همگرایی عدسی را تغییر می‌دهند. این عمل را که باعث دیدن اجسام واقع در فواصل مختلف می‌شود تطابق گویند. میدان دید چشم



شکل ۵-۲۹

سالم از بی‌نهایت تا حدود ۱۵ سانتیمتر است.

۱۵ متر حداکثر دید است و اگر جسم دورتر از آن باشد تغییر محل تصویر از شبکیه آن قدر ناچیز است که برای سلولهای عصبی چشم محسوس نیست. برای فواصل کمتر، چشم تطابق می‌کند تا به حداقل دید برسد. حداقل دید به‌طور طبیعی ۲۵ سانتیمتر است، کمتر از آن چشم باز هم تا حدود ۱۵ سانتیمتر تطابق می‌کند ولی پس از مدت کوتاهی خسته می‌شود.

**دوربینی** - در چشم دوربین همگرایی چشم از حد چشم طبیعی کمتر است و کانون عدسی چشم در حال استراحت پشت شبکیه واقع می‌شود. شخص دوربین، اجسام دور را نیز با تطابق می‌بیند و حداقل دید آن بیشتر از چشم سالم است و تا حدود ۵۰ سانتیمتر می‌رسد و در فواصل کمتر، دید واضح نیست و باید با عینک همگرا، این عیب را جبران کرد.

**پیر چشمی** - با گذشت زمان، نیروی عضلات مؤثر در عمل تطابق کاهش می‌یابد و در نتیجه فاصله حداقل دید زیاد می‌شود. شخصی که دچار پیرچشمی است فواصل دور را بدون تطابق به‌طور واضح می‌بیند ولی برای دیدن اجسام نزدیک باید عینک همگرا به‌کار برد.

**نزدیک بینی** - در چشم نزدیک‌بین همگرایی عدسی از حد طبیعی بیشتر است و هنگام استراحت چشم، کانون جلو شبکیه می‌افتد. حداکثر دید از یکی دو متر تجاوز نمی‌کند و شخص نزدیک‌بین اجسام دور را نمی‌تواند به‌وضوح ببیند. برای رفع عیب نزدیک‌بینی باید از عینک و اگر استفاده کرد. فاصله کانونی عدسی عینک باید برابر با فاصله حداکثر دید چشم نزدیک بین باشد، در این صورت اجسام دور مانند چشم سالم بدون تطابق دیده می‌شوند.

**هدف آزمایش:** بررسی چشم و معایب آن و کاربرد عینک.

**وسایل لازم:** سره نوری - چراغ رویتر - متر - عدسیهای کوژ و کاو با فواصل کانونی مختلف.

**آزمایش الف)** پرده را که به‌عنوان شبکیه به‌کار می‌رود در فاصله ۱۷ سانتیمتری عدسی همگرایی به فاصله کانونی  $f = ۱۵\text{cm}$  قرار دهید. جسم را در طرف دیگر عدسی آن قدر جابه‌جا کنید تا تصویر به وضوح روی پرده تشکیل شود. فاصله جسم تا عدسی را اندازه بگیرید و با مقدار آن، که از راه محاسبه به‌دست آمده است مقایسه کنید.

محل جسم را ثابت نگهدارید و پرده و عدسی را که به منزله چشم است بدون اینکه فواصل آنها از یکدیگر تغییر کنند به‌طرف جسم ببرید. تصویر واضح پشت شبکیه تشکیل می‌شود. محل آن را تعیین کنید. برای اینکه تصویر دوباره روی شبکیه بیفتد باید همگرایی عدسی تغییر کند (عمل تطابق). فاصله کانونی عدسی را با محاسبه و آزمایش به‌دست آورید.

**آزمایش ب)** عدسی  $f = ۱۵\text{cm}$  را برای چشم سالم در نظر می‌گیریم، حال به‌جای آن عدسی همگرایی به فاصله کانونی  $۲۰\text{cm}$  یا  $۳۰\text{cm}$  به‌کار برید. تصویر در فاصله‌ای بیشتر از ۱۷ سانتیمتر یعنی پشت

شبکیه واقع می‌شود. عدسی همگرای مناسبی را که به عنوان عینک است در فاصله  $۱٫۵\text{cm}$  از عدسی چشم دوربین قرار دهید به طوری که تصویر در  $۱۷$  سانتیمتری روی پرده تشکیل شود. فاصله کانونی عدسی عینک را با  $f_p$  که از رابطه  $\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_p} - \frac{d}{f_1 f_p}$  به دست می‌آید مقایسه کنید. در این رابطه  $f$  و  $f_1$  و  $f_p$  و  $d$  به ترتیب فاصله کانونی چشم سالم، فاصله کانونی عدسی چشم و فاصله کانونی عدسی عینک و فاصله عینک تا عدسی چشم هستند.

آزمایش پ) به جای عدسی  $f = ۱۵\text{cm}$  عدسی همگرای  $f = ۱۰\text{cm}$  را قرار دهید. تصویر در فاصله‌ای کمتر از  $۱۷\text{cm}$  یعنی جلو شبکیه تشکیل می‌شود. عدسی واگرای مناسبی را که به عنوان عینک است در فاصله  $۱٫۵\text{cm}$  از عدسی چشم بگذارید تا دوباره تصویر روی پرده در فاصله  $۱۷$  سانتیمتری تشکیل شود. فاصله کانونی عینک را با محاسبه و آزمایش به دست آورید.

# آزمایش ۳۴ میکروسکوپ

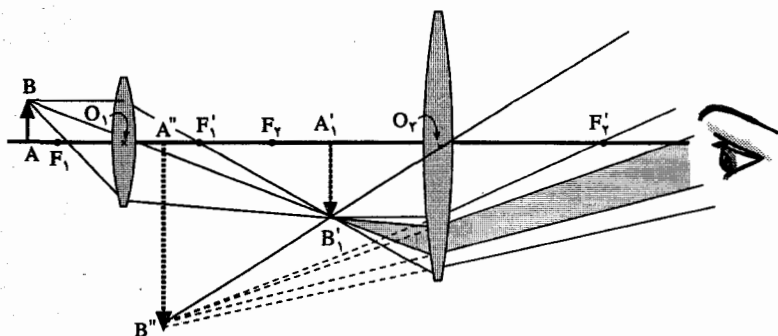
## مقدمه

میکروسکوپ دستگاهی است که برای دیدن اجسام خیلی کوچک به کار می رود و تصویری بسیار بزرگتر و با جزئیات بیشتر از جسم مورد نظر، به دست می دهد.

میکروسکوپ مرکب از دو عدسی همگراست، یکی عدسی شیئی یا آبژکتیو و دیگری عدسی چشمی یا اکولر نام دارد. عدسی شیئی که فاصله کانونی آن در حدود چند میلیمتر است در نزدیک جسم قرار می گیرد و از جسم AB تصویر حقیقی و معکوس و بزرگتر  $A'B'$  را ایجاد می کند. این تصویر برای عدسی چشمی که فاصله کانونی آن حدود چند سانتیمتر است به منزله جسم است و در فاصله کانونی عدسی چشمی قرار می گیرد و تصویر نهایی  $A''B''$  بزرگتر و مجازی تشکیل می شود (شکل ۳۰ = ۵).

میکروسکوپها از یک دستگاه عدسی شیئی و یک دستگاه عدسی چشمی تشکیل شده اند که در طرفین لوله ای قرار گرفته اند. لوله را توسط دو پیچ میزان می توان به حرکت در آورد و فاصله اش را نسبت به جسم تغییر داد. یکی از پیچها حرکت تند و دیگری حرکت کند به لوله می دهد. موقعی که با پیچ میزان تند، تصویر مشاهده شد با پیچ میزان کند آن را واضح تر می کنند.

جسم بین دو تیغه نازک شیشه ای موسوم به لام و لامل قرار می گیرد و شیشه لام روی صفحه میکروسکوپ (پلاتین) توسط فتری نگهداشته می شود. برای اینکه جسم روشن شود نور روز یا لامپ را به وسیله آینه و مجموعه ای از عدسیها به نام چگالنده به جسم می تابانند. آینه به بدنه میکروسکوپ متصل است و حول محوری می چرخد. باید آن را آن قدر چرخاند تا نور کاملاً به جسم بتابد. در بعضی از میکروسکوپها نور چراغی که دارای رشته بسیار کوچکی است و با شدت جریان نسبتاً زیاد، نور شدیدی تولید می کند جسم را روشن می کنند. این چراغ در پایه میکروسکوپ قرار داده شده است (شکل ۳۰ - ۵).



شکل ۳۰-۵

هدف آزمایش : بررسی ساختمان میکروسکوپ.

وسایل آزمایش: عدسیهای همگرا با فاصله‌های کانونی ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر - پرده - سیم‌نازک - چراغ رویتزر - سره نوری.

روش آزمایش: به منظور جلوگیری از ابیراهی رنگی و وایچش تصویر که ناشی از پرتوهای حاشیه‌ای است، میان بندی را مقابل چشمه نور قرار دهید. یک رشته بسیار نازک سیم را در امتداد قطر سوراخ میان‌بند بچسبانید و از آن به عنوان جسم استفاده کنید. عدسی شیئی را عدسی همگرایی به فاصله کانونی ۵۰ میلی‌متر انتخاب کنید. نور همگرایی به جسم بتاباند و با تنظیم فاصله عدسی شیئی و پرده و جسم، تصویر رشته را روی پرده به طور واضح مشاهده کنید. عدسی همگرای دیگری به فاصله کانونی ۱۰ سانتیمتر که به منزله عدسی چشمی است در پشت پرده قرار دهید و پرده را بردارید.  $A'B'$ ، تصویری که روی پرده تشکیل شده بود، به عنوان جسم برای عدسی چشمی است و باید در فاصله کانونی آن واقع شود. با جابه‌جا کردن عدسی چشمی به طوری که فاصله عدسی از  $A'B'$  کمی کمتر از ۱۰ سانتیمتر باشد تصویر نهایی را پیدا کنید. با استفاده از مدل چشم، یعنی عدسی همگرایی +۱۵cm و یک پرده که به عنوان شبکه است، تصویر نهایی را روی پرده ببیندازید.

عدسی چشمی  $+10\text{ cm}$  را با عدسیهای دیگری

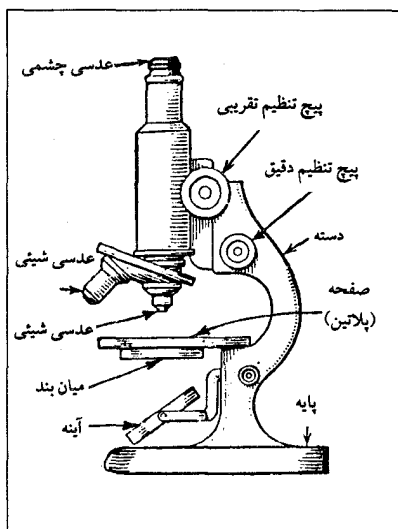
به فواصل کانونی  $f = 20\text{ cm}$  و  $f = 15\text{ cm}$  و  $f = 5\text{ cm}$  عوض کنید و در هر مرحله اندازهٔ تصویر روی پرده را به دست آورید و بزرگنمایی میکروسکوپ را محاسبه کنید.

پیشہ

۱- مسیر نور را موقعی که تصویر نهایی در بی نهایت تشکیل می شود رسم کنید.

۲- بزرگنمایی میکروسکوپ با فاصلهٔ کانونی عدسی چشمی چه رابطه‌ای دارد؟

۳- توان میکروسکوپ را تعریف و مقدار آن را محاسبه کنید.



شکل ۳۱-۵

# آزمایش ۳۵ دوربینها

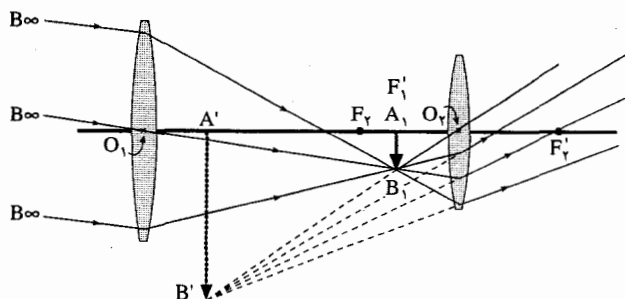
## مقدمه

اگر تصویر دو نقطه از جسم، در انتهای یک عصب چشم تشکیل شود، چشم آن دو نقطه را روی هم احساس می‌کند و دو نقطه را از هم تشخیص نمی‌دهد. برای اینکه دو نقطه تصاویر جداگانه‌ای داشته باشند باید قطر ظاهری آنها از حد معینی که حد تفکیک چشم نامیده می‌شود، بزرگتر باشد. این حد برای چشم در حدود یک دقیقه قوسی یا  $\frac{1}{3600}$  رادیان است.

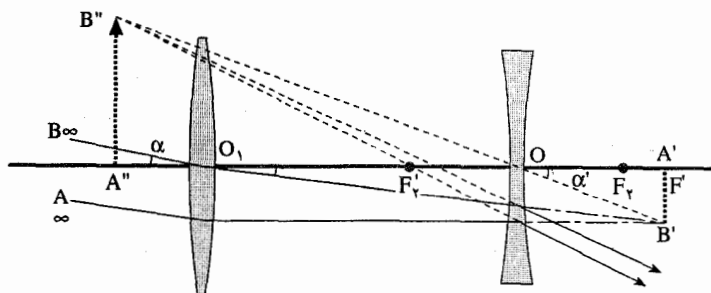
دوربینها، دستگاههایی هستند که برای دیدن اجسامی به کار می‌روند که در فواصل بسیار دور واقع شده‌اند و قطر ظاهری کوچکی دارند. دوربینها قطر ظاهری را بیشتر می‌کنند و جسم را پرنورتر از دید مستقیم نشان می‌دهند.

دوربینهایی که برای رصد ستارگان و اجرام سماوی به کار می‌روند؛ دوربین نجومی یا تلسکوپ نامیده می‌شوند. دوربینهایی که برای دید مناظر و اجسام واقع در زمین به کار می‌روند دوربین زمینی نام دارند.

**دوربین نجومی** - تشکیل شده است از دو عدسی همگرا، عدسی اول که فاصله کانونی آن در حدود یک یا چند متر است عدسی شیئی است و از جسمی که در بی‌نهایت واقع شده است تصویر  $A'B'$  را به طور معکوس و حقیقی در سطح کانونی تشکیل می‌دهد. عدسی دوم که چشمی نام دارد دارای فاصله کانونی حدود چند سانتیمتر است و طوری قرار دارد که  $A'B'$  در فاصله کانونی و نزدیک به کانون قرار گیرد.  $A'B'$  به منزله جسم برای عدسی است و عدسی چشمی مانند ذره‌بینی، تصویر نهایی  $A''B''$  را که بزرگتر و مجازی است تشکیل می‌دهد. این تصویر با قطر ظاهری بیشتری دیده می‌شود (شکل ۵-۳۲ الف). تصویر نهایی، نسبت به جسم معکوس است ولی برای دیدن ستارگان مشکلی به وجود نمی‌آورد. برای دیدن اجسام واقع در زمین که باید تصویر نهایی نسبت به جسم مستقیم باشد، بین عدسیهای شیئی و چشمی، یک عدسی همگرا، یا منشور بازتاب کلی قرار می‌دهند که یکبار دیگر تصویر را معکوس کند تا تصویر نهایی نسبت به جسم مستقیم شود.



شکل ۳۲-۵ الف



شکل ۵-۳۲ ب

دوربین گالیه - در این دوربین عدسی شیئی همگرا با فاصله کانونی نسبتاً زیاد و عدسی چشمی واگرا با فاصله کانونی در حدود چند سانتیمتر است. تصویر جسمی که در بی نهایت است در سطح کانونی عدسی همگرا و در خارج فاصله کانونی عدسی واگرا واقع می شود به طوری که برای عدسی واگرا به منزله جسم مجازی است و از آن تصویر نهایی  $A''B''$  که نسبت به جسم مستقیم است، تشکیل می شود (شکل ۵-۳۲ ب).

هدف آزمایش: بررسی ساختمان دوربینهای نجومی و گالیه.

وسایل آزمایش: سره نوری - چراغ رویتر - میان بند - عدسیهای همگرا به فاصله های کانونی  $10^\circ$  و  $1^\circ$  و  $15^\circ$  سانتیمتر - عدسی واگرا به فاصله کانونی  $1^\circ$  سانتیمتر - پرده.

آزمایش الف) لامپ چراغ رویتر را نسبت به عدسی آن جلو و عقب ببرید تا یک دسته پرتوهای موازی از آن خارج شود. میان بندی را که به شکل پیکان است جلو عدسی چراغ قرار دهید. عدسی همگرایی به فاصله کانونی  $10^\circ$  سانتیمتر را در فاصله نسبتاً زیادی از چراغ بگذارید و تصویر واضحی از پیکان را روی پرده بیندازید. در فاصله ای حدود ۸ سانتیمتر از پرده عدسی همگرایی به فاصله کانونی  $1^\circ$  سانتیمتر را قرار دهید و پرده را بردارید. عدسی را کمی جابه جا کنید تا تصویر را در عدسی چشمی ببینید. می توان یک عدسی همگرا به فاصله کانونی  $15^\circ$  سانتیمتر و یک پرده را که روی هم به عنوان مدل چشم به کار می روند در پشت عدسی  $1^\circ$  قرار داد و آن دو را باهم جابه جا کرد تا تصویر روی پرده که به منزله شبکیه چشم است تشکیل شود.

آزمایش ب) مانند آزمایش قبل عمل کنید ولی به جای عدسی  $1^\circ$  عدسی چشمی را عدسی واگرایی به فاصله کانونی  $1^\circ$  - انتخاب کنید و در فاصله ای بیش از  $1^\circ$  سانتیمتر جلو پرده قرار دهید و پرده را بردارید. با جابه جا کردن عدسی چشمی، تصویر را مشاهده کنید و با مدل چشم آن را روی پرده بیندازید.



## پرسشها

- ۱- برای اینکه چشم تطابق نکند و خسته نشود طول لوله دوربین چه قدر باید باشد؟ مسیر پرتو را در این حالت رسم کنید.
- ۲- نسبت قطر ظاهری تصویر به قطر ظاهری جسم را درشت‌نمایی دوربین می‌گویند. مقدار  $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$  را محاسبه کنید.
- ۳- مسیر نور را در منشور بازتاب کلی، برای اینکه تصویر را معکوس کند، رسم کنید.

## آزمایش ۳۶ فوتومتري

### مقدمه

بنا بر تعريف شدت نور هر چشمه نوراني، مقدار شار نوري گسيل شده در واحد زاويه فضايي است

$$I = \frac{d\varphi}{d\Omega}$$

واحد شدت نور لومن بر استراديان است که گاندا نام دارد.

موقعی که فلوئی نورانی به سطحی برخورد می‌کند آن را روشن می‌کند. اگر شار نوری  $d\varphi$  به سطح  $dA$  برخورد کند مقدار روشنایی در سطح عبارت خواهد بود از

$$E = \frac{d\varphi}{dA}$$

در حقیقت مقدار روشنایی برابر شار نورانی است که به واحد سطح برخورد می‌کند. واحد آن لومن بر مترمربع یا لوکس است.

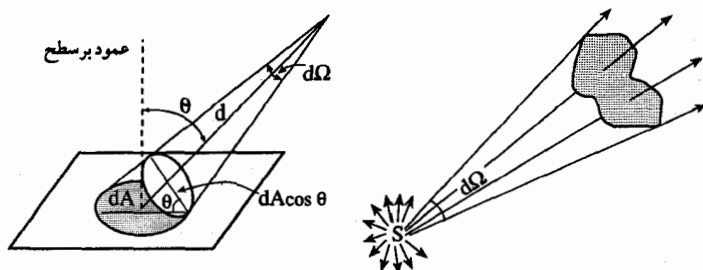
اگر پرتوها از چشمه نورانی به شدت  $I$  به صفحه‌ای در فاصله  $d$  برخورد کنند، به طوری که خط عمود بر صفحه با امتداد پرتوهای نورانی زاویه  $\theta$  بسازد (شکل ۵-۳۳)، زاویه فضایی مقابل سطح  $dA$  برابر است با

$$d\Omega = \frac{dA \cos \theta}{d^2}$$

چون  $d\varphi = Id\Omega$  است، بنابراین  $d\varphi = I \frac{dA \cos \theta}{d^2}$ . مقدار روشنایی روی صفحه برابر است با

$$E = \frac{d\varphi}{dA} = \frac{I \cos \theta}{d^2}$$

نورسنج دستگاهی است که توسط آن شدت نور یک چشمه نامعلوم را به کمک شدت نور یک چشمه معلوم می‌توان اندازه گرفت.



شکل ۳۳-۵

اگر یک قطره روغن روی کاغذی بریزیم، پخش می‌شود و به‌صورت دایره‌ای درمی‌آید. آن را مقابل چشمه نوری قرار می‌دهیم. اگر کاغذ بین ناظر و چشمه نوری قرار گرفته باشد لکه روغن شفافتر از زمینه آن است، زیرا لکه شفافتر از زمینه است و نور بیشتری از خود عبور می‌دهد. ولی اگر ناظر و چشمه نوری در یک طرف لکه قرار گرفته باشند، لکه تاریکتر از زمینه دیده می‌شود، زیرا نور بیشتری از لکه عبور می‌کند و نور کمتری بازتابش می‌یابد و به چشم ناظر می‌رسد.

هدف آزمایش: اندازه‌گیری شدت نور یک چشمه نامعلوم به کمک شدت نور یک چشمه معلوم و تعیین ضریب عبور نور از یک محیط.

وسایل آزمایش: سره نوری - دو چشمه نوری - کاغذ لکه‌دار با پایه - متر.

آزمایش الف) دو چشمه را در دو طرف سره نوری قرار دهید و کاغذ لکه‌دار را بین آن دو آن‌قدر جابه‌جا کنید تا موقعی که اگر از دو طرف به آن نگاه کنید لکه روغن در زمینه تشخیص داده نشود. در این حالت مقدار روشنایی که صفحه از دو چشمه دریافت می‌دارد، مساوی‌اند. چون امتداد پرتوهای نورانی بر صفحه عمودند می‌توان نوشت

$$\frac{I_1}{d_1^2} = \frac{I_2}{d_2^2}$$

با اندازه‌گیری فواصل هر چشمه از محل لکه و در دست داشتن  $I_1$  شدت چشمه معلوم، می‌توان  $I_2$  شدت نور منبع نامعلوم را تعیین کرد.

آزمایش را چند بار تکرار کنید و هر بار مقدار  $I_1$  را به دست آورید و میانگین مقادیر به دست آمده را پیدا کنید.

ترتیب آزمایش	$d_1$	$d_2$	$I_2$	$I_1$	میانگین $I_1$

آزمایش ب) نسبت انرژی نوری عبور کرده از یک جسم به انرژی رسیده به آن را ضریب عبور گویند. برای تعیین ضریب عبور مانند آزمایش قبل چشمه‌ها را در دو طرف سره نوری قرار دهید و صفحه لکه‌دار را جابه‌جا کنید تا مقدار روشنایی دو چشمه روی صفحه یکسان شود بنابراین

$$\frac{I_1}{d_1^2} = \frac{I_2}{d_2^2} \quad (1)$$

جسم نیمه شفاف را که منظور، تعیین ضریب عبور آن است بین صفحه لکه‌دار و یکی از چشمه‌ها قرار دهید. نوری که از آن چشمه بر صفحه لکه‌دار می‌رسد کمتر می‌شود. برای ازدیاد روشنایی آن چشمه

روی صفحه، چشمه را به صفحه لکه‌دار نزدیک‌تر کنید تا دوباره مقادیر روشنایی دو چشمه یکسان و لکه ناپذید شود. در این صورت

$$\frac{I_1}{d_1^2} = \frac{I'_1}{d'^2_1} \quad (2)$$

در این رابطه  $I_1$  نوری است که از جسم شفاف عبور کرده است و  $d_1$  فاصله چشمه تا صفحه لکه‌دار پس از جابه‌جا شدن است. از مقایسه روابط (۱) و (۲) نتیجه می‌شود

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{d'^2_2}{d^2_2} \quad \text{یا} \quad \frac{I_2}{d^2_2} = \frac{I'_2}{d'^2_2}$$

$\frac{I'_2}{I_2}$  همان ضریب عبور است که با  $t$  نشان داده می‌شود، بنابراین

$$t = \frac{d'^2_2}{d^2_2}$$

# آزمایش ۳۷ = اندازه‌گیری طول‌موج نورهای ساده توسط اسپکتروسکوپ

## مقدمه

رنگ نور بستگی به طول‌موج آن دارد. به علت متفاوت بودن سرعت برای طول‌موجهای مختلف و در نتیجه ضریب شکستهای مختلف، اگر نور مرکبی به منشور بتابد در منشور نورهای ساده زوایای شکست یکسانی نخواهند داشت و در نتیجه تفکیک می‌شوند و مسیرهای متفاوتی را طی می‌کنند و پس از شکست مجدد، به طور جداگانه از منشور خارج می‌شوند. زاویه انحراف پرتوهای رنگی بستگی به طول‌موجهای آنها دارد و رنگهای با طول‌موج بیشتر دارای انحراف کمتری هستند. نور سفید که شامل همه رنگهاست نور پهن رنگینی تشکیل می‌دهد که موسوم به طیف یا بیناب نور سفید است. این پدیده را پاشندگی یا تجزیه نور سفید گویند. رنگهایی که از تجزیه نور سفید حاصل می‌شوند بسیار متعدد هستند و می‌توان آنها را در ۷ رنگ طبقه‌بندی کرد که به ترتیب زیاد شدن شکست آنها عبارتند از قرمز، نارنجی، زرد، سبز، آبی، نیلی و بنفش.

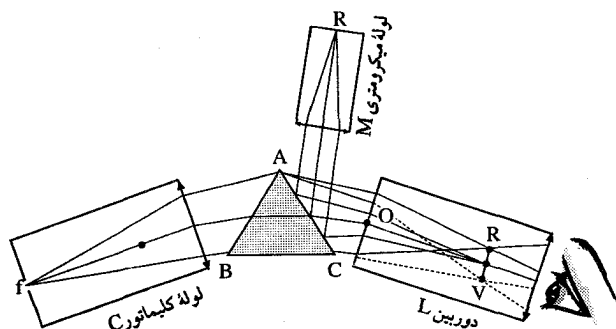
طیف نور سفید پیوسته است یعنی تمام رنگها به هم متصلند، ولی نوری که از گازها تابش می‌شود شامل تمام رنگها نیست و شامل یک یا چند خط رنگی است که آن را طیف ناپیوسته گویند.

برای مطالعه طیفها از دستگاهی به نام اسپکتروسکوپ یا بیناب‌نما استفاده می‌کنند (شکل ۵-۳۴). اسپکتروسکوپ مرکب از محفظه‌ای است که روی پایه‌ای سوار شده و داخل آن منشوری قرار گرفته است. سه لوله در اطراف محفظه نصب شده است که عبارتند از:

۱- کلیماتور یا موازی‌ساز، و آن لوله‌ای است که درون آن چند عدسی قرار دارد و در کانون دستگاه عدسیها شکافی وجود دارد. نوری که از شکاف وارد شود به صورت پرتوهای موازی از لوله خارج می‌شود و به منشور می‌تابد.

۲- خطکش میکرومتری - تیغه‌ای شیشه‌ای است که بر حسب دهم میلیمتر مدرج شده است و در کانون یک دستگاه عدسی به درشتنمایی ۱۰ قرار دارد و تمامی آنها در لوله‌ای جای گرفته‌اند. پرتوهای موازی از این لوله به منشور برخورد می‌کنند و پس از بازتاب قسمتی از آن توسط منشور وارد دوربین می‌شوند و طیف را مدرج می‌کنند.

۳- دوربین - پرتوهای که از منشور عبور کرده‌اند یا بازتابیده شده‌اند، پس از برخورد به عدسی



شکل ۵-۳۴

شیئی دوربین در سطح کانونی آن به طور همزمان طیف نور و تصویر درجات خطکش میکرومتری را تشکیل می‌دهند. طیف و درجات خطکش با چشمی دوربین قابل مشاهده می‌شوند.

**هدف آزمایش:** اندازه‌گیری طول موج چشمه‌های مجهول و تعیین زاویه‌های رأس منشور و مینیم انحراف.

**وسایل آزمایش:** اسپکتروسکوپ - چشمه نور سفید - چند چشمه نور با طول موجهای معلوم. روش آزمایش - ابتدا دوربین را با جسم دوری میزان کنید که آن را روشن و بدون پارالاکس ببینید. سپس دوربین را بگردانید و جلوی لوله میکرومتر بیاورید. چراغی را روشن و از دوربین نگاه کنید. لوله میکرومتر را جابه‌جا کنید تا تصویر درجات میکرومتر بدون پارالاکس در دوربین مشاهده شود. منشور را روی دستگاه بگذارید. لوله گیسلر را که محتوی گاز معینی است روشن کنید و در مقابل شکاف کلیماتور قرار دهید. با تغییر محل عدسی در داخل لوله کلیماتور، چشمه نور را دقیقاً روی کانون دستگاه عدسیهای کلیماتور قرار دهید. در این صورت طیف نور تقریباً با دوربین دیده می‌شود. عدسی چشمی دوربین را جابه‌جا کنید تا طیف نور کاملاً به وضوح دیده شود و بتوان تمام رنگهای نور را از یکدیگر تفکیک کرد. منشور را برای رنگ با طول موج متوسط، زرد، در مینیم انحراف قرار دهید، به این ترتیب که منشور را در یک جهت بچرخانید، طیف نیز در همان جهت می‌چرخد. چرخش منشور را تا جایی ادامه دهید که طیف در جهتی خلاف جهت اول بچرخد. در این موقع چرخش منشور را که در مینیم انحراف است متوقف کنید. سپس درجات میکرومتری را در دوربین به طور واضح پیدا و درجات رنگهای مختلف طیف را در دوربین یادداشت کنید.

با تشکیل طیفهای عناصری نظیر جیوه، هلیوم و سدیم و با در دست داشتن طول موج مربوط به هر کدام، می‌توان منحنی نمایش تغییرات طول موج بر حسب درجات میکرومتری را رسم کرد. اگر نوری با طول موج نامعلوم منطبق بر یکی از درجات میکرومتری باشد، می‌توان آن درجه را روی محور مختصات پیدا کرد و طول موج مربوط به آن را به دست آورد.

طول موج نورها (Å)					
هلیوم			جیوه		
شماره	طول موج	رنگ	شماره	طول موج	رنگ
He <sub>۱</sub>	۷۰۶۵	قرمز	Hg <sub>۱</sub>	۵۷۹۱	زرد
He <sub>۲</sub>	۶۶۷۸	قرمز	Hg <sub>۲</sub>	۵۷۷۰	زرد
He <sub>۳</sub>	۵۸۷۶	زرد	Hg <sub>۳</sub>	۵۴۶۱	سبز
He <sub>۴</sub>	۵۰۰۶	سبز	Hg <sub>۴</sub>	۴۳۵۸	بنفش
He <sub>۵</sub>	۴۱۲۲	سبز	Hg <sub>۵</sub>	۴۰۴۶٫۵	بنفش
He <sub>۶</sub>	۴۷۱۳	آبی	Hg <sub>۶</sub>	۳۶۵۰	بنفش
He <sub>۷</sub>	۴۵۱۱	آبی	Hg <sub>۷</sub>	۳۳۶۱	بنفش
He <sub>۸</sub>	۴۳۸۸	بنفش	Hg <sub>۸</sub>	۳۰۰۱	بنفش
He <sub>۹</sub>	۴۱۲۱	بنفش	Hg <sub>۹</sub>	۲۵۳۶٫۵	بنفش
He <sub>۱۰</sub>	۴۰۲۶	بنفش	سدیم		
He <sub>۱۱</sub>	۳۱۶۵	بنفش	Na <sub>۱</sub>	۵۸۹۶	زرد
He <sub>۱۲</sub>	۳۸۸۹	بنفش	Na <sub>۲</sub>	۵۸۹۰	زرد

## آزمایش ۳۸ تداخل امواج نوری

### مقدمه

وقتی دو یا چند موج در یک نقطه به هم برخورد کنند با هم ترکیب می‌شوند و پدیده‌ای به نام تداخل به وجود می‌آورد. اگر امواجی که از دو نقطه  $S_1$  و  $S_2$  می‌رسند در نقطه  $A$  با یکدیگر همفاز باشند دامنه‌های آنها با هم جمع می‌شود و دامنه‌ی برآیند ماکسیمم خواهد شد. ولی اگر در نقطه‌ای مانند  $B$  امواج رسیده در فاز متقابل باشند دامنه‌ها در جهت عکس یکدیگر خواهند بود و در صورت مساوی بودن اثر یکدیگر را خنثا می‌کنند (شکل ۵-۳۵).

نقاطی که تفاضل فواصل آنها از دو چشمه برابر مضرب زوجی از  $\frac{\lambda}{2}$  باشد همفازند و نقاطی که تفاضل فواصل آنها از دو چشمه مضرب فردی از  $\frac{\lambda}{2}$  باشد در فاز متقابل قرار دارند. وقتی امواج نورانی با هم تداخل می‌کنند در بعضی نقاط، شدت نور ماکسیمم و در بعضی نقاط مینیمم یا صفر است که به صورت نوارهای روشن و تاریکی مشاهده می‌شوند.

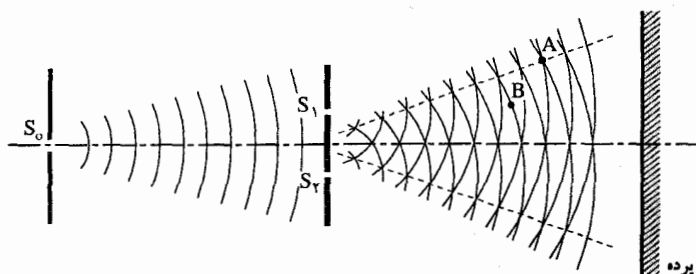
برای تولید پدیده تداخل قابل مشاهده، باید دو چشمه که تقریباً نور تکفام تولید کنند، داشته باشیم که اختلاف فازشان مقداری ثابت باشد و با زمان تغییر نکند. چنین چشمه‌هایی را همدوس گویند. اگر اختلاف فاز معین نباشد و با زمان تغییر کند نوارهای تداخلی پایدار نیستند و بازمان به تندی جابه‌جا می‌شوند و در نتیجه قابل دیدن نخواهند بود.

نورهایی که از دو چشمه وابسته به یکدیگر مثل دو شکاف یا نگ منتشر می‌شوند اختلاف فازشان به زمان بستگی ندارد و دو چشمه کاملاً همدوس هستند.

هدف آزمایش: تعیین طول موج چشمه‌های مختلف.

وسایل آزمایش: تخت دیدگانی - چندسره - شکاف - دو شکاف - چراغ سدیم - چشمی - دو منشوری فرنل - آینه لویذ.

دو شکاف یا نگ - صفحه دوشکافی را در مقابل پرتوهای نور تکفام طوری قرار دهید که شکافها

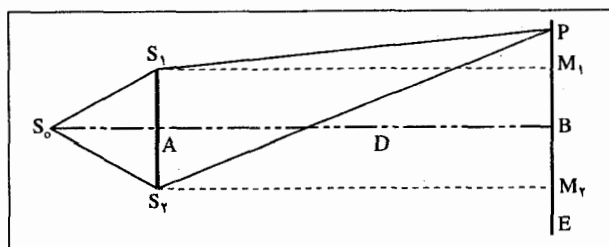


شکل ۳۵-۵

به یک فاصله از دو چشمه نور باشند. صفحه E را موازی با دو شکاف روی تخت دیدگانی قرار دهید و نوارهای تاریک و روشن را با چشمی مشاهده کنید. در نقطه O یک فریز روشن موسوم به فریز مرکزی و در اطراف آن به طور منظم فریزهای تاریک و روشن مشاهده می‌شوند. بین دو فریز تاریک و روشن حد جدایی واضحی وجود ندارد، بلکه پس از فریز روشن شدت نور به تدریج کم و به فریز تاریک منتهی می‌شود.

در شکل ۵-۳۶ چشمه نورانی S روی عمود منصف  $S_1$  و  $S_2$  قرار دارد و دو چشمه  $S_1$  و  $S_2$  از آن حاصل می‌شود به طوری که  $S_1A = S_2A = a$  است. پرده‌ای را به فاصله D از صفحه شکاف قرار دهید ( $AB = D$ ). فریزها روی پرده تشکیل می‌شود. برای فریزی که به فاصله x از فریز روشن مرکزی قرار گرفته است  $PB = x$ ، بنابر این

$$PM_2 = x + a, \quad PM_1 = PB - M_1B = x - a$$



شکل ۵-۳۶

در مثلث  $S_2PM_2$  می‌توان نوشت

$$S_2P = [D^2 + (x + a)^2]^{\frac{1}{2}}$$

با توجه به بسط دوجمله‌ای

$$(1 + x)^n = 1 + \frac{nx}{1!} + \frac{n(n-1)}{2!}x^2 + \dots$$

و در نظر گرفتن کوچکی x و نسبت به D و صرف نظر کردن از بقیه توانهای  $\frac{x+a}{D}$ ، رابطه بالا به صورت زیر درمی‌آید

$$S_2P = D \left[ 1 + \frac{(x + a)^2}{2D^2} \right]$$

همچنین در مثلث  $S_1PM_1$  داریم

$$S_1P = D \left[ 1 + \frac{(x - a)^2}{2D^2} \right]$$



از کم کردن دو مقدار بالا از یکدیگر نتیجه می شود

$$S_P P - S_P P = \frac{2ax}{D}$$

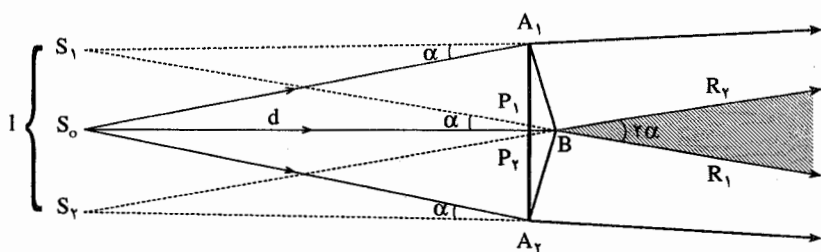
اگر فاصله دو شکاف را با  $2a = d$  نشان دهیم خواهیم داشت

$$\frac{dx}{D} = K\lambda \quad \text{برای نقاط روشن}$$

$$\frac{dx}{D} = (2K + 1) \frac{\lambda}{2} \quad \text{برای نقاط تاریک}$$

D فاصله صفحه شکافها تا پرده و x فاصله یکی از فریزها (فریز K ام) را تا فریز مرکزی و d فاصله دو شکاف را اندازه گیری کنید و طول موج نور را به دست آورید. با تغییر فاصله صفحه شکافها از پرده و اندازه گیریهای مربوط چند بار طول موج را محاسبه و میانگین آن را تعیین کنید.

دو منشوری فرنل - دو منشوری فرنل تشکیل شده است از دو منشور مشابه که دارای قاعده مشترک بوده و زاویه رأس آنها خیلی کوچک (حدود ۱۰ دقیقه) است. شکاف نورانی S در سطح تقارن دو منشوری قرار دارد. پرتوها پس از برخورد به هر منشور شکسته و به طرف قاعده منحرف می شوند گویی از دو چشمه  $S_1$  و  $S_2$  خارج شده اند. در حقیقت از چشمه حقیقی S دو چشمه مجازی  $S_1$  و  $S_2$  به دست می آید (شکل ۵-۳۷). پرتوهای حاصل از این دو چشمه در ناحیه مشترکی تداخل می کنند و نوارهای تاریک و روشن روی پرده تشکیل می شوند.

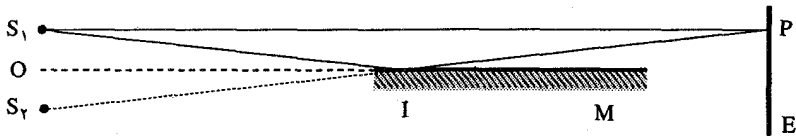


شکل ۵-۳۷

زاویه رأس منشورها را با A و فاصله دو چشمه مجازی را با l و فاصله چشمه ها تا منشورها را با d و فاصله چشمه ها تا پرده را با D نشان می دهیم. با توجه به شکل می توان نوشت

$$l = 2d\alpha \quad \text{یا} \quad \tan \alpha = \alpha = \frac{1}{2} \frac{l}{d} = \frac{1}{2d} \quad (1)$$

فرمولهای منشور موقعی که زوایا کوچک باشند به صورت  $i = nr$  و  $i' = nr'$  درمی آیند و زاویه انحراف برابر است با  $\alpha = A(n - 1)$  یا  $\alpha = i + i' - A = n(r + r') - A = nA - A$  است. مقدار  $\alpha$  را



شکل ۵-۳۸

در رابطه (۱) قرار می‌دهیم

$$l = 2dA(n - 1)$$

چون فاصله نوار K ام روشن از نوار مرکزی  $\frac{lx}{D} = K\lambda$  است پس

$$\frac{2dA(n - 1)x}{D} = K\lambda \quad (2)$$

چون  $x = ki$  که  $i$  فاصله دو فریز است نتیجه می‌شود

$$i = \frac{\lambda D}{l} \quad (3)$$

آزمایش را یکبار با یک طول موج معلوم و بار دوم با یک طول موج نامعلوم انجام دهید و طول موج نامعلوم را پیدا کنید. اگر رابطه (۲) را برای هر کدام بنویسید از بخش کردن آنها بر یکدیگر نتیجه می‌شود

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{d'x'D}{dxD'} \quad (4)$$

$d$  فاصله صفحه شکافها از دو منشور و  $D$  فاصله صفحه شکافها از پرده و  $x$  فاصله فریز K ام تا فریز مرکزی را برای هر کدام اندازه‌گیری کنید و از رابطه (۴) مقدار  $\lambda'$  را به دست آورید.

آینه لویده - شکافی را در مقابل پرتوهای نور تکفام قرار دهید به طوری که خیلی دور از آینه مسطح  $M$  و نزدیک به سطح آن واقع شود و پرتوها تقریباً مماس بر آینه بتابند. پرتوهایی که از  $S$  محل شکاف می‌رسند با پرتوهایی که از آینه بازتابیده می‌شوند در نقاطی مانند  $P$  تداخل می‌کنند و در نتیجه نوارهای تاریک و روشن تشکیل می‌شوند. مثل این است که نور از چشمه حقیقی  $S$  و چشمه مجازی  $S'$  (تصویر  $S$  در آینه) به طور همزمان منتشر شده‌اند (شکل ۵-۳۸). با اندازه‌گیری  $D$  فاصله  $S$  تا پرده و  $x$  فاصله فریز K ام تا فریز مرکزی و داشتن  $\lambda$  از فرمول  $l = \frac{K\lambda D}{x}$ ، فاصله دو چشمه و در نتیجه نصف آن فاصله شکاف تا آینه را به دست آورید.

## پرسشها

۱ - در تداخل امواج اختلاف فواصل دو چشمه از یک نقطه برای ماکسیمیم یا مینیمیم بودن دامنه

برایند چه شرطی دارد؟ چرا؟

۲ - در آینه لویده چرا فریز مرکزی تاریک است؟

# آزمایش ۳۹ حلقه‌های نیوتون

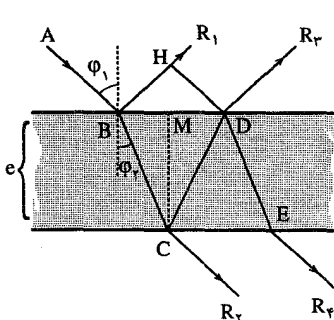
## مقدمه

برای به وجود آوردن فریزهای تداخلی روش دیگری به کار می‌رود و آن تبدیل یک پرتو نوری به دو پرتو نوری همزمان است. رنگهایی که در یک حباب صابون یا در یک لایه نازک نفت یا روغن روی آب مشاهده می‌شوند از این نوع‌اند.

پرتو AB که از یک چشمه گسترده منتشر شده است با زاویه تابش  $\varphi_1$  به سطح اول تیغه متوازی‌السطوح نازکی می‌تابد. قسمتی از این پرتو در نقطه B به صورت  $R_1$  بازتاب می‌کند و بخش دیگری از آن به شیشه وارد شده و تحت زاویه  $\varphi_2$  شکسته می‌شود و امتداد BC را طی می‌کند. سپس قسمتی از پرتو BC به صورت CD بازتابیده شده و بخشی از آن به صورت  $R_2$  از سطح دوم تیغه خارج می‌شود. از پرتو CD قسمتی به صورت  $R_3$  از تیغه خارج شده و قسمتی به صورت DE دوباره بازتابیده شده و این عمل تکرار می‌شود.

اگر دو سطح تیغه نیم فتره‌اندود نباشد، شدت پرتوهای دیگر خیلی کم است و فقط شدت پرتوهای  $R_1$  و  $R_2$  در بازتاب و شدت پرتوهای  $R_3$  و  $R_4$  در عبور قابل ملاحظه است و می‌توان از بقیه پرتوها صرف‌نظر کرد (شکل ۵ - ۳۹).

از تداخل دو پرتو بازتابی یا عبوری، دو دستگاه فریز دایره‌ای جایگزین شده در بی‌نهایت به وجود می‌آید که می‌توان آنها را در سطح کانونی یک عدسی همگرا مشاهده کرد. فریزهای تیغه متوازی‌السطوح فریزهای هایدینگر نیز نامیده می‌شوند.



شکل ۳۹-۵

از D خط DH را عمود بر پرتو  $R_1$  فرود می‌آوریم. چون دو پرتو  $R_1$  و  $R_2$  موازی‌اند، DH سطح موج این دو پرتو است. از این محل به بعد راههای نوری برای هر دو پرتو یکسان و اختلاف راه آنها برابر است با  $\delta = n(BC + CD) - BH$ . ضخامت تیغه را با e نشان می‌دهیم، با توجه به شکل می‌توان نوشت

$$BC = DC = \frac{e}{\cos \varphi_2} \quad \text{و} \quad BM = DM = e \tan \varphi_2$$

بنابراین

$$n(BC + CD) = \frac{2ne}{\cos \varphi_2}$$

از طرفی

$$BH = BD \sin \varphi_1 = (BM + DM) \sin \varphi_1 = 2e \tan \varphi_2 \sin \varphi_1$$

$$= 2e \frac{\sin \varphi_2}{\cos \varphi_2} n \sin \varphi_1 = \frac{2ne \sin^2 \varphi_2}{\cos \varphi_2}$$

در نتیجه

$$\delta = \frac{r_{ne}}{\cos \varphi_r} - \frac{r_{ne} \sin^2 \varphi_r}{\cos \varphi_r} = \frac{r_{ne}}{\cos \varphi_r} (1 - \sin^2 \varphi_r)$$

$$\delta = r_{ne} \cos \varphi_r \quad \text{یا}$$

پرتوهایی که با زاویه تابش  $\varphi_r$  بر تیغه متوازی السطوح می‌تابند روی مخروطی به زاویه رأس  $\varphi_r$  قرار دارند. زاویه شکست  $\varphi_r$  برای این دسته پرتوها مساوی بوده و در نتیجه اختلاف راه نوری و همچنین شدت تداخلی برای آنها یکی است. این پرتوهای بازتابیده در بی‌نهایت روی دایره‌ای که حالت تداخل برای تمام نقاط آن یکسان است جمع می‌شوند. چون پرتوها با زوایای مختلف به تیغه می‌تابند در بی‌نهایت یک دستگاه فریز به شکل دوایر هم‌مرکز تاریک و روشن مشاهده می‌شود.

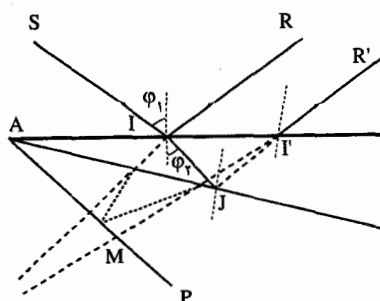
در تیغه‌هایی که به شکل گوه‌اند و دو سطح آنها با یکدیگر زاویه کوچکی دارد چند دقیقه می‌سازند، پرتوی که از چشمه گسترده S به تیغه می‌تابد توسط دو سطح گوه به دو پرتو تبدیل می‌شود (شکل ۴۰-۵).

ضخامت e در نقاط مختلف تیغه فرق می‌کند و برای یک دسته پرتو موازی که به تیغه می‌تابد اختلاف راه تغییر می‌کند و فریز تشکیل می‌شود. با یک چشمه گسترده، فریزها تقریباً داخل گوه روی صفحه AP جایگزین شده هستند. در بازتاب اختلاف راه هندسی دو پرتو R و R' از رابطه  $\delta' = r_{ne} \cos \varphi_r$  به دست می‌آید که در آن e ضخامت متوسط بین I و I' است (شکل ۴۰-۵).

در نقاطی که  $\delta = \delta' + \frac{\lambda}{4} = r_{ne} \cos \varphi_r + \frac{\lambda}{4} = 2K \frac{\lambda}{4}$  باشد فریزهای روشن و در نقاطی که  $\delta = \delta' + \frac{\lambda}{4} = r_{ne} \cos \varphi_r + \frac{\lambda}{4} = (2K+1) \frac{\lambda}{4}$  باشد فریزهای تاریک تشکیل خواهند شد. در گوه اختلاف راه در اثر تغییر e تغییر می‌کند و برای نقاطی که روی خطی به موازات خط الرأس گوه واقعند e و در نتیجه  $\delta$  و بنابراین شدت ثابت است. یعنی فریزها به شکل خطوط تاریک و روشن به موازات خط الرأس گوه هستند. در امتداد خط الرأس که برای آن  $e = 0$  و در نتیجه  $\delta = \frac{\lambda}{4}$  است یک فریز تاریک دیده می‌شود. فریزهای گوه را فریزهای ضخامت ثابت نیز می‌گویند.

اگر عدسی همگرایی با شعاع انحنای زیاد را روی سطح تختی قرار دهیم، هوا بین عدسی و شیشه، گوه‌ای به وجود می‌آورد که حول نقطه تماس دارای تقارن دایره‌ای است. اگر نور یک چشمه تکفام

به دستگاه بتابد هر پرتوی که بار روی سطح بالایی و یک بار روی سطح پایینی گوه بازتابیده می‌شود و از تداخل آنها یک دستگاه دایره‌های هم‌مرکز روشن و تاریک تشکیل می‌شود که آنها را حلقه‌های نیوتون می‌نامند. فریزها در لایه هوا بین عدسی و شیشه تخت جایگزین شده‌اند. مرکز این حلقه‌ها در صورتی که دو سطح عملاً به هم تماس داشته باشند در بازتاب تاریک است. همچنین دسته پرتوهای عبوری نیز تولید فریزهای دایره‌ای می‌کنند که مرکز آنها روشن است و مکمل فریزهای بازتابی‌اند.



شکل ۴۰-۵

چون فضای بین عدسی و شیشه تخت نسبت به محور قائمی که از نقطه تماس می‌گذرد تقارن دارد، ضخامت لایه هوا  $e$  برای نقاط هم فاصله از محور ثابت است لذا برای زاویه تابش معین اختلاف راه برای نقاطی که روی یک دایره قرار دارند یکسان است و از این رو فریزها دایره‌ای هستند.

فریزهای بازتابی به مراتب پر رنگتر از فریزهای عبوری هستند. از این رو معمولاً با فریزهای بازتابی کار می‌شود، زیرا در فریزهای بازتابی دویوتوی که تداخل می‌کنند هر کدام یک بار بازتاب کرده‌اند و در نتیجه دامنه آنها خیلی به هم نزدیک است. در نتیجه بین فریزهای ماکسیم و مینیم اختلاف شدت زیادی موجود است ولی در فریزهای عبوری یک پرتو بدون بازتاب خارج می‌شود و پرتو دیگر دوبار بازتاب کرده است و در نتیجه دامنه‌ها خیلی با هم اختلاف دارد. به این علت تفاوت زیادی بین ماکسیم و مینیم شدت موجود نیست و فریزها خیلی واضح نیستند.

به علت اینکه شعاع انحنای عدسی زیاد است لایه هوا بین عدسی و شیشه خیلی نازک است و فریزهای جایگزین شده در آن را می‌توان منطبق بر سطح عدسی همگرا در نظر گرفت. برای محاسبه شعاع  $r$  فریز  $K$  ام که ضخامت گوه نظیر آن  $e$  است خواهیم داشت

$$\overline{MH'} = HO \times HO' \quad \text{یا} \quad r_K^2 = e(2R - e)$$

که در آن  $R$  شعاع انحنای عدسی و  $OO' = 2R$  است (شکل ۵-۴۱). اگر از  $e$  در مقابل  $2R$  صرف نظر کنیم  $r_K^2 = 2Re$  است. برای پرتوهای عمودی و برای فریزهای تاریک بازتابی داریم

$$2ne = K\lambda \quad \text{یا} \quad 2ne + \frac{\lambda}{4} = (2K + 1)\frac{\lambda}{4}$$

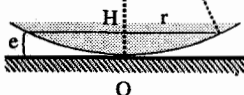
شیشه تخت، هوا وجود دارد  $n=1$  و در نتیجه  $e = \frac{K\lambda}{4}$  است. بنابراین

$$r_K^2 = K\lambda R \quad \text{یا} \quad r_K^2 = 2RK\frac{\lambda}{4}$$

$$r_K = \sqrt{K\lambda R} \quad \text{در نتیجه}$$

چنانچه ملاحظه می‌شود شعاع فریزها متناسب با جذر اعداد صحیح است و در نتیجه هر چه از مرکز دور شویم یعنی  $K$  زیاد شود فریزها به هم نزدیکتر می‌شوند زیرا

$$\frac{dr}{dK} = \frac{\lambda R}{2\sqrt{K\lambda R}}$$



شکل ۴۱-۵

اگر  $dK=1$  باشد  $dr$  مساوی اختلاف شعاع دو فریز متوالی یعنی فاصله دو فریز است که با جذر  $K$  نسبت معکوس دارد. یعنی هر چه  $K$  بیشتر شود فاصله دو فریز متوالی کمتر می‌شود.

هدف آزمایش: مشاهده حلقه‌های نیوتون و اثبات  $\frac{r_K^2}{K} = cte$  و تعیین شعاع انحنای عدسی همگرا.

وسایل آزمایش: دستگاه عدسی همگرا و شیشه تخت - میکروسکوپ متحرک - چراغ سدیم - چراغ جیوه - لامپ سفید - فیلتر سبز.

روش آزمایش - شیشه تخت و عدسی همگرای همراه آن را زیر میکروسکوپ متحرک قرار دهید. شیشه متصل به عدسی شیئی میکروسکوپ را بگردانید تا تقریباً ۴۵ درجه نسبت به سطح افق قرار گیرد. نور چراغ سدیم را تقریباً به طور افقی به آن بتابانید. پرتوهای فرودی تقریباً عمود بر دستگاه عدسی شیشه خواهد بود (شکل ۵ - ۴۲). میکروسکوپ را میزان کنید (دقت کنید که فریزها در بین عدسی و شیشه مسطح زیر آن جایگزین شده اند). یک دسته دایره های هم مرکز تاریک و روشن در میکروسکوپ مشاهده می کنید. دقت کنید که فریز مرکزی یک لکه سیاه باشد.

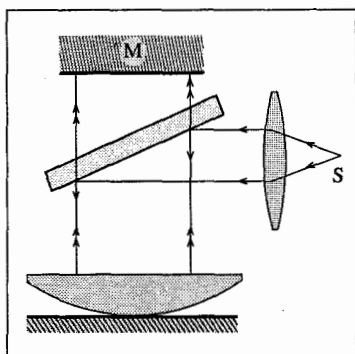
اگر مرکز سیاه نبود معلوم می شود که عدسی و شیشه تخت کاملاً با هم تماس ندارند، با پیچهای تنظیم فریز مرکزی را تاریک کنید.

۱ - قطر چند فریز تاریک را توسط میکروسکوپ اندازه گیری کنید. منحنی نمایش تغییرات  $r_K^2$  (مجذور شعاع فریز تاریک  $K$  ام) را نسبت به  $K$  شماره فریز رسم کنید. برای این کار بهتر است از فریز مثلاً ۲۵ تاریک طرف چپ شروع کنید و آنها را پنج تا پنج تا، تا فریز ۲۵ تاریک طرف راست بخوانید. به این ترتیب  $r_{25}, r_{20}, r_{15}, r_{10}, r_5$  به دست می آید.

- ۲ - با داشتن شعاع فریزهای تاریک، شعاع انحنای  $R$  مربوط به عدسی همگرا را حساب کنید.
- ۳ - به جای چراغ سدیم، چراغ جیوه را روشن کنید و یک فیلتر سبز جلوی آن قرار دهید، با خواندن شعاع فریزهای تاریک مربوط به طول موج سبز جیوه، طول موج این خط را به دست آورید.
- ۴ - فریزهای بازتابی و عبوری را توسط نور زرد سدیم مشاهده کنید.
- ۵ - به جای چراغ سدیم، چراغ سفید را روشن و فریزها را مشاهده کنید.

## پرسشها

- ۱ - تفاوت فریزهای عبوری و بازتابی در چیست؟
- ۲ - شعاع فریزهای روشن بازتابی و عبوری از چه روابطی به دست می آید؟
- ۳ - اگر به جای چراغ سدیم، چراغ سفید روشن کنید چرا فریزها رنگی می شوند؟
- ۴ - چرا با نور سفید فقط چند فریز رنگی در حدود مرکز دیده می شود در صورتی که با نور زرد سدیم، فریزهای زیادی به دست می آیند؟



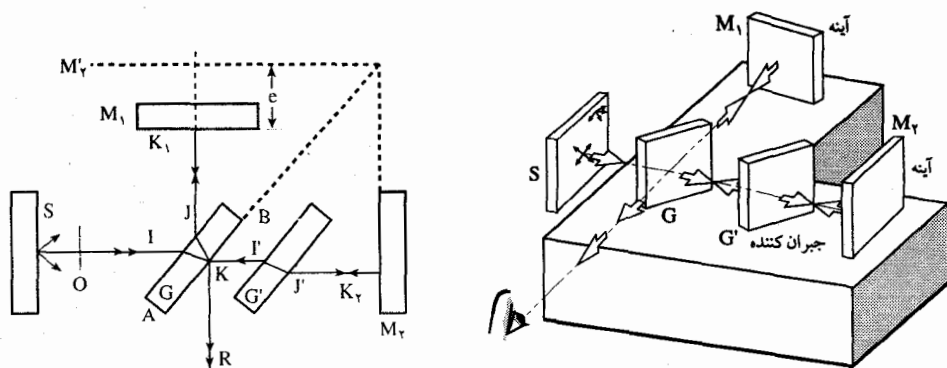
شکل ۵-۴۲

## آزمایش ۴۰ \_\_\_\_\_ تداخل سنج مایکلسون

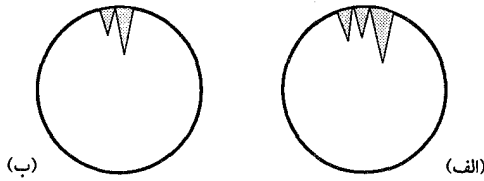
هدف آزمایش: آشنایی با تداخل سنج مایکلسون و تعیین طول موج مجهول و مشاهده فریزهای گوتهوا با نور تکفام و نور سفید.

وسایل آزمایش: دستگاه تداخل سنج مایکلسون - چراغ جیوه - چراغ نور سفید - پالایه (فیلتر) سبز.

روش آزمایش - مطابق شکل ۵-۴۳، پرتوهای چشمه S به شیشه مات O می تابند و نور پخش شده از آن به یک تیغه شیشه ای G که سطح AB آن نیمه نقره اندود است می تابند. این تیغه زاویه ۴۵° با محور دستگاه می سازد. قسمتی از پرتوها بازتابیده می شود و قسمتی دیگر از تیغه می گذرد. این دو دسته پرتو به آینه های  $M_1$  و  $M_2$  می خورند و پس از پیمودن راههای  $SIK_1J'K_2J'T'KR$  و  $SIKJK_1JKR$  با هم ترکیب می شوند و در راستای R خارج می شوند و چون اختلاف راه میان این دو راه نوری وجود دارد، از تداخل این دو دسته پرتو یک دسته فریز خطی یا دایره ای مشاهده می شود. اگر تصویر  $M_1'$  آینه  $M_1$  را نسبت به سطح AB تیغه G در نظر بگیریم، مانند این است که دو دسته پرتو، فریزهای مربوط به یک لایه هوا (بین  $M_1$  و  $M_1'$ ) را تشکیل می دهند. اگر  $M_1$  و  $M_2$  کاملاً عمود بر راستای پرتوها قرار داشته باشند  $M_1$  و  $M_2'$  موازی اند، در این صورت اختلاف راه مربوط به تیغه موازی هواست و فریزها دایره ای اند. اما اگر  $M_1$  و  $M_2'$  کاملاً موازی نباشند و زاویه کوچکی با هم بسازند فریزهای خطی مربوط به گوتهوا مشاهده می شود. چون آن قسمت از پرتوها که روی سطح AB بازتابیده می شود، سه بار از تیغه عبور می کند، در صورتی که قسمت دیگر فقط یک بار از آن می گذرد، بنابراین تیغه  $G'$  را که کاملاً مشابه تیغه G است ولی نقره اندود نیست، به صورت موازی با آن سر راه  $KK_1$  قرار می دهند که



شکل ۴۳-۵



شکل ۴۴-۵

این اختلاف راه را جبران کند و این تیغه را جبران کننده می نامند. آینه  $M_1$  بر پیچ بلندی تکیه دارد که به کمک آن می شود آینه را به طور عمود بر سطح خود حرکت انتقالی داد. آینه  $M_2$  بر دو پیچ تکیه دارد که به کمک آنها می توان آینه را کمی منحرف کرد تا بر امتداد پرتو عمود شود و تصویر آن با  $M_1$  موازی یا از حالت عمود خارج شود.

برای میزان کردن دستگاه، چراغ جیوه را روشن کنید و پالایه سبز را جلوی آن قرار دهید. نشانه سه گوش فلزی را بر بالای شیشه مات بگذارید. از این نشانه سه تصویر مطابق شکل ۵ - ۴۴ (الف) مشاهده می کنید که یکی از آنها کمرنگتر و دوتای دیگر پر نورترند. دو تصویر پر نورتر را که مربوط به دو آینه اند با پیچهای تنظیم آینه  $M_2$  روی هم منطبق کنید (شکل ۵ - ۴۴ ب). در این حال فریزهای بسیار ریز خطی مربوط به گوه هوا مشاهده می شود. با تغییرات بسیار جزئی پیچها می توانید فریزهای ریز خطی را بهتر و در نهایت به دایره تبدیل کنید. در این حالت  $M_1'$  کاملاً با  $M_1$  موازی است.

این فریزهای دایره ای در بی نهایت واقع اند و بنابراین برای بهتر مشاهده کردن آنها می توانید دوربینی در راستای R قرار دهید. با حرکت دادن پیچها سعی کنید فریزها را واضحتر کنید. اکنون با تغییر دادن پیچ بلند مربوط به آینه  $M_1$  می توانید  $M_1$  را حرکت دهید و از اختلاف راه بین دو دسته پرتو بکاهید یا آنرا افزایش دهید. مشاهده خواهید کرد که وقتی اختلاف راه را کم می کنید به تدریج فریزها جمع و در مرکز ناپدید می شوند و برعکس وقتی اختلاف راه را زیاد می کنید فریزهای تازه ای در مرکز ظاهر می شوند. مقدار تغییر اختلاف راه را می شود با استفاده از درجات پیچ تعیین کرد. درازای درجه بندی روی محور مساوی ۲۵ میلیمتر و دور غلاف به  $5^\circ$  قسمت تقسیم شده است. هر دو دور چرخاندن غلاف به اندازه یک میلیمتر آن را جابه جا می کند. پس هریک از قسمتهای غلاف، معادل با  $0.1^\circ$  میلیمتر است. حرکت غلاف به وسیله اهرمی به آینه  $M_1$  منتقل می شود. طول بازوی مربوط به غلاف ۵ برابر طول بازوی مربوط به  $M_1$  است. پس میزان جابه جایی  $M_1$ ،  $\frac{1}{5}$  مقدار جابه جایی غلاف است و هریک از تقسیمات غلاف به اندازه  $0.1^\circ \times \frac{1}{5} = 0.02^\circ$  میلیمتر آینه را جابه جا می کند.

### روش آزمایش

۱- اندازه گیری طول موج - دستگاه را به طریقی که ذکر شد برای دیدن فریزهای دایره ای تنظیم کنید. آینه  $M_1$  را جابه جا کنید. چنانچه آینه به اندازه نصف طول موج تغییر مکان یابد، یعنی  $\frac{\lambda}{2}$  بر قطر



تیغه هوا افزوده یا کم شود، یک فریز در مرکز ظاهر یا محو می شود. پس اگر آینه را به اندازه 1 جابه جا کنیم و  $n$  فریز در مرکز پدید آید یا محو شود، طول موج سبز جیوه از رابطه

$$l = n \frac{\lambda}{4}$$

به دست می آید. درجه میکرومتر را بخوانید و  $M_1$  را حرکت دهید تا  $100^\circ$  فریز در مرکز به وجود آید یا محو شود. دوباره درجه میکرومتر را بخوانید، تفاضل این دو عدد ضربدر  $\frac{1}{8}$  مقدار جابه جایی آینه  $M_1$  را برای  $100^\circ$  فریز نشان می دهد.  $\lambda$  را حساب کنید، آزمایش را چند بار تکرار کنید، از نتایج میانگین بگیرید.

۲- مشاهده فریزها با نور سفید- آزمایش را با چراغ جیوه ادامه دهید، پیچ میکرومتر را در جهتی بچرخانید که فریزها در مرکز ناپدید شوند. می دانیم که در این صورت اختلاف راه کم می شود یعنی، قطر تیغه هوا کاهش می یابد. با ادامه این کار مشاهده می کنید که شعاع فریزها به تدریج زیاد می شود. عمل را تا جایی ادامه دهید که در میدان دید تنها یک حلقه باقی بماند. اکنون دوربین را بردارید و بینجهای آینه را اندکی بیچانید تا گوه هوا تشکیل و یک دسته فریز خطی دیده شود. با بیچها سعی کنید فریزها را به حالت قائم درآورید و فاصله آنها را تا حد امکان زیاد کنید. اکنون چراغ سفید را روشن کنید، معمولاً فریزی مشاهده نخواهید کرد و میدان به طور یکنواخت روشن است حال پیچ میکرومتر را با دقت تمام و بسیار آهسته در همان جهت قبلی یعنی، در جهت کم شدن اختلاف راه بگردانید و سطح آینه  $M_1$  را نگاه کنید. عمل را ادامه دهید تا فریزهای خطی رنگی مربوط به گوه هوا که با نور سفید حاصل شده است پدید آیند. چرا فریزهای گوه هوا برای نور تکفام در تمام فاصله های آینه  $M_1$  ممکن است پیدا شوند اما برای نور سفید در ناحیه بسیار محدودی به وجود می آیند؟

# آزمایش ۴۱ ————— تداخل سنج فابری-پرو

## مقدمه

مطابق شکل ۵-۴۵، هرگاه روی سطح شیشه‌ای را با کلفتی چند صد میکرون نقره‌اندود کنیم، توان بازتاب آن زیاد می‌شود و مقداری از نور هم می‌تواند از آن عبور کند. دو تیغه نیمه نقره اندود را که سطوح  $AA'$  و  $BB'$  آنها به موازات هم قرار دارند در نظر می‌گیریم. پرتو  $SI$  بریکی از آنها می‌تابد، پرتو شکسته  $JL$  چندین بار بین دو سطح  $AA'$  و  $BB'$  بازتابیده می‌شود و در هر بازتاب مقداری از آن شکسته می‌شود و پرتوهای خروجی  $R_1$  و  $R_2$  و  $R_3$  و  $R_4$  و غیره را تشکیل می‌دهد. این پرتوها به وسیله عدسی همگرایی در سطح کانونی آن در نقطه‌ای مانند  $M$  جمع می‌شوند. دو پرتو متوالی  $R_1$  و  $R_2$  یا  $R_3$  و  $R_4$  و غیره که از یک پرتو  $SI$  درست شده‌اند، یک اختلاف فاز  $\varphi$  دارند برابر با  $\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda}$  که در آن  $\delta = 2ecos i$  است. اگر  $\delta$  مضرب کاملی از طول موج باشد، تمام پرتوهایی که به نقطه  $M$  می‌رسند همفازند و در نقطه  $M$  ماکسیم روشنائی به وجود می‌آید. در نتیجه فریزها حلقه‌هایی هستند که دور محور قریبه  $IO$  در بی‌نهایت، یعنی در سطح کانونی عدسی  $L$  جایگزین شده‌اند. هرکدام از حلقه‌ها مربوط به مخروطی از پرتوهای تابیده است که زاویه رأس آن  $i$  است. اگر شدت پرتو  $JL$  و  $r$  توان بازتاب دامنه یک پرتو در بازتاب از هوا بر شیشه باشد، شدت برای پرتوهای  $K_1L_1$ ،  $K_2L_2$  و ... به ترتیب عبارت خواهد بود از  $I_1r^2$ ،  $I_2r^2$  و ... و هرگاه ضریب عبور پرتو از سطح  $BB'$  را  $S$  فرض کنیم، شدت برای پرتوهای عبور کرده  $R_1$  و  $R_2$  و  $R_3$  و ... به ترتیب عبارت خواهد بود از  $I_1r^2S$  و  $I_2r^2S$  و  $I_3r^2S$  و ...

اگر دامنه مربوط به اولین پرتو  $a$  فرض شود، یعنی  $a^2 = I_1S$  باشد، دامنه پرتوهای بعدی به ترتیب عبارت خواهند بود از  $ar$ ،  $ar^2$  و ... ارتفاعهایی که در نقطه  $M$  جمع می‌شوند، هرکدام نسبت به ارتفاعهای اولین پرتو، اختلاف فاز  $\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda}$  و  $2\varphi$  و ... دارند.

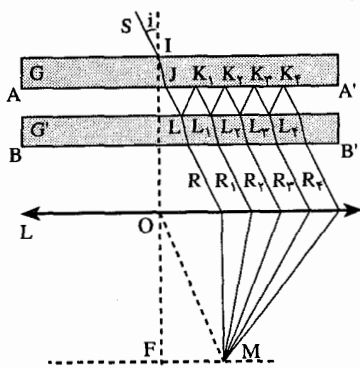
هرگاه بردارهای  $a$ ،  $ar$ ،  $ar^2$  و ... حول نقطه‌ای که مبدأ بردارهاست با سرعت زاویه‌ای  $\omega$  بچرخند، در لحظه  $t$  تصویرهای آنها روی دو محور عمود برهم دو سری تشکیل می‌دهند، از این قرار:

$$X = a \cos \omega t + ar \cos(\omega t - \varphi) + ar^2 \cos(\omega t - 2\varphi) + \dots + ar^n \cos(\omega t - n\varphi) + \dots$$

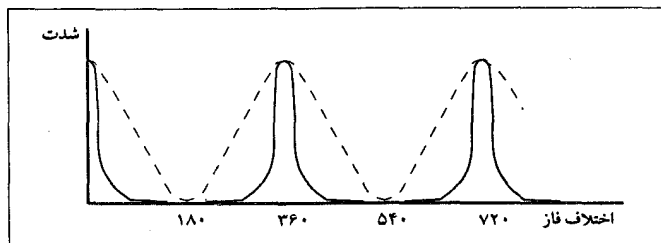
$$Y = a \sin \omega t + ar \sin(\omega t - \varphi) + ar^2 \sin(\omega t - 2\varphi) + \dots + ar^n \sin(\omega t - n\varphi) + \dots$$

اگر  $Y$  در  $\sqrt{-1}$  ضرب شود نتیجه می‌شود

$$Z = X + jY$$



شکل ۴۵-۵



شکل ۴۶-۵

که نمایش یک عدد مختلط است و X قسمت حقیقی و Y قسمت موهومی آن است. طبق رابطهٔ اولر

$$e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$$

خواهیم داشت

$$Z = ae^{j\omega t} + ar e^{j(\omega t - \varphi)} + \dots + ar^n e^{j(\omega t - n\varphi)}$$

یا

$$Z = ae^{j\omega t} (1 + re^{-j\varphi} + \dots + r^n e^{-jn\varphi})$$

داخل پرانتز یک سری تصاعد هندسی است که قدرنسبت آن  $re^{-j\varphi}$  و جمله عمومی آن  $r^n e^{-jn\varphi}$  است. مجموع این تصاعد هندسی وقتی که n خیلی زیاد شود به سمت حدی میل خواهد کرد که عبارت است از

$$Z = ae^{j\omega t} \cdot \frac{1}{1 - re^{-j\varphi}}$$

شدت روشنایی در هر نقطه متناسب با مجذور دامنهٔ ارتعاش در آن نقطه است. عبارت Z را در مزدوج آن ضرب می‌کنیم.

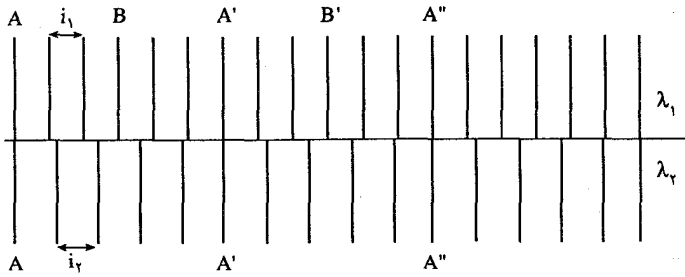
$$A^2 = ZZ' = \frac{a^2}{(1 - re^{-j\varphi})(1 - re^{j\varphi})} = \frac{a^2}{1 - r(e^{j\varphi} + e^{-j\varphi}) + r^2}$$

یا

$$A^2 = \frac{a^2}{1 - 2r \cos \varphi + r^2}$$

شکل ۴۶-۵ منحنی تغییرات شدت با اختلاف فاز را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود مینیممها تاریک و ماکسیممها خیلی روشن و باریک و جدا از هم قرار دارند. این نوع تداخل سنجها را چند موجی یا موج متعدد می‌گویند. برای مقایسه تغییرات شدت در تداخل سنجهای دو موجی، مثل مایکلسون هم به صورت نقطه‌چین رسم شده است.

همسازی و ناهمسازی فریزها - هرگاه نوری را که از دو تابه نزدیک به هم تشکیل شده است به یک تیغه بتابانیم، برای هریک از تابه‌ها یک دسته فریز ایجاد می‌شود (شکل ۵-۴۷). این دو دسته فریز به‌طور متناوب در نقاطی مانند A و A' و A'' همسازی، یعنی ماکسیممهای آنها روی هم می‌افتد. در نقاطی مانند B و B' و B'' ناهمسازی، یعنی ماکسیمم یکی از دسته‌ها بر مینیمم دستهٔ دیگر می‌افتد. در تیغه‌هایی که تداخل دو موجی است، در حالت ناهمسازی فریزها محو می‌شوند (مانند فریزهای



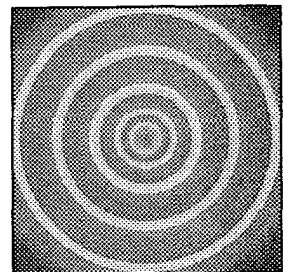
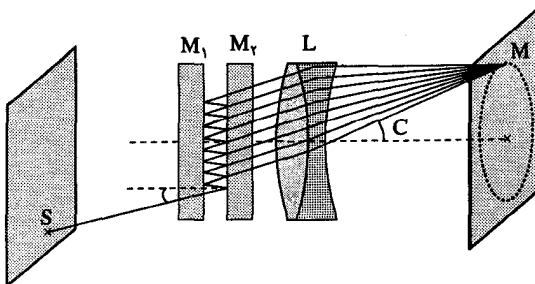
شکل ۴۷-۵

تداخل سنج مایکلسون) و در تیغه‌هایی که تداخل با موجهای متعدد است، در حالت ناهمسازی به علت تیزی فریزها دو دسته فریز کاملاً از هم جدا می‌شوند (مانند تداخل سنج فابری - پرو).

هدف آزمایش: آشنایی با تداخل سنج فابری - پرو و تعیین طول موج مجهول و مشاهده همسازي و ناهمسازی و اندازه‌گیری اختلاف دو طول موج نزدیک به هم.

وسایل آزمایش: دستگاه تداخل سنج فابری - پرو - چراغ سدیم

میزان کردن دستگاه - تداخل سنج را با نور زرد سدیم روشن و از طرف مقابل به تداخل سنج نگاه کنید. در صورتی که سطح دو آینه باهم موازی نباشند، تعداد زیادی تصویر از دوره روشن لامپ دیده می‌شود. با تنظیم دویچ که در روی آینه ثابت قرار دارد، این تصاویر متعدد را روی هم منطبق کنید. در این صورت ابتدا فریزهای خطی و سپس با تنظیم دقیقتر فریزهای دایره‌ای تشکیل خواهند شد. این فریزها که بسیار باریک و روشن و در زمینه تاریک قرار دارند در بی نهایت جایگزین هستند. بنابراین لازم است برای بهتر دیدن این فریزها از دوربینی که با جسم نسبتاً دوری تنظیم شده است استفاده کنید، شکل ۵ - ۴۸. با تغییر دادن پیچ بلند مربوط به آینه  $M_1$  می‌توانید  $M_1$  را حرکت دهید و از اختلاف راه بین دو دسته پرتو کم کنید، یا آن را افزایش دهید. مشاهده خواهید کرد که وقتی اختلاف راه را کم می‌کنید، به تدریج فریزها جمع و در مرکز ناپدید می‌شوند و برعکس وقتی اختلاف راه را زیاد می‌کنید،



شکل ۴۸-۵

فریزهای تازه‌ای در مرکز ظاهر می‌شوند، مقدار تغییر اختلاف راه را می‌شود با استفاده از درجات پیچ تعیین کرد. درازای درجه‌بندی روی محور مساوی ۲۵ میلیمتر و دور غلاف به ۵۰ قسمت شده است. هردو دور چرخاندن غلاف به اندازه یک میلیمتر آن را جابه‌جا می‌کند. پس هریک از قسمتهای غلاف معادل با ۰/۰۱ میلیمتر است. حرکت غلاف به وسیله اهرمی به آینه  $M_1$  منتقل می‌شود. طول بازوی مربوط به غلاف ۵ برابر طول بازوی مربوط به  $M_1$  است، پس میزان جابه‌جایی  $M_1$ ،  $\frac{1}{5}$  مقدار جابه‌جایی غلاف است و هریک از تقسیمات غلاف به اندازه  $\frac{1}{5} \times 0.01 = 0.002$  میلیمتر آینه را جابه‌جا می‌کند.

### روش آزمایش

۱- اندازه‌گیری طول موج - دستگاه را به طریقی که ذکر شد برای دیدن فریزهای دایره‌ای تنظیم کنید. آینه  $M_1$  را جابه‌جا کنید. چنانکه آینه به اندازه نصف طول موج تغییر مکان یابد، یعنی  $\frac{\lambda}{2}$  بر قطر تیغه هوا افزوده یا از آن کم شود، یک فریز در مرکز ظاهریا محو می‌شود. پس اگر آینه را به اندازه نصف طول موج تغییر مکان دهیم، یعنی  $\frac{\lambda}{2}$  بر قطر تیغه هوا افزوده یا از آن کم کنیم، یک فریز در مرکز ظاهریا محو می‌شود. پس اگر آینه را به اندازه ۱ جابه‌جا کرده باشیم و  $n$  فریز در مرکز پدیدار یا محو شده باشد طول موج از رابطه

$$l = n \frac{\lambda}{2}$$

به دست می‌آید. درجه ریزسنج را بخوانید و پیچ را بچرخانید تا ۱۰۰ فریز در مرکز به وجود آید یا محو شود (در شمارش فریزها توجه داشته باشید که دو دسته فریز مربوط به دو خط زرد سدیم را باید از هم تفکیک کنید و ۱۰۰ فریز از یک دسته را بشمارید). دوباره درجه ریزسنج را بخوانید. تفاضل این دو عدد ضربدر  $\frac{1}{5}$  مقدار جابه‌جایی آینه  $M_1$  را برای ۱۰۰ فریز (برحسب میلیمتر) نشان می‌دهد. آزمایش را چند بار تکرار کنید و از نتایج میانگین بگیرید.

۲- اندازه‌گیری اختلاف دو طول موج نور زرد سدیم - در مدتی که پیچ را می‌چرخانید، دو دسته فریز مربوط به دو خط زرد سدیم به تناوب روی هم قرار می‌گیرند یا از هم جدا می‌شوند. به عبارت دیگر دو دسته فریز مربوط به دو خط همساز یا ناهمساز می‌شوند. فاصله بین دو همساز کامل ( $L$ ) را از روی میکرومتر بخوانید و  $\lambda_1 - \lambda_2$  را از فرمول  $\lambda_1 - \lambda_2 = \frac{\lambda^2 m}{2L}$  که از رابطه  $\lambda_1 = (N+1)\lambda_2$  و  $2L = N\lambda_1$  نتیجه شده است حساب کنید. چون نمی‌توان به طور دقیق موقع همساز را تشخیص داد، برای اینکه اشتباه آزمایش کمتر شود، بهتر است فاصله دو، سه یا چهار ناهمساز را بخوانید و سپس فاصله  $L$  را برای دو ناهمساز متوالی به دست آورید، زیرا فاصله دو همساز و دو ناهمساز مساوی است. تعداد فریزهای بین دو ناهمساز را از روی فاصله  $L$  حساب کنید و نتایج را در جدولی خلاصه کنید.

## آزمایش ۴۲ = پراش فرنل و فرانهور

### مقدمه

پراش نور به پدیده‌ای گفته می‌شود که بر اثر محدود بودن سطح عبور نور، رفتار نور از قوانین نور هندسی پیروی نمی‌کند. اگر پرتوی از نور تکفام بر شکافی بتابد که پهنای آن حدود طول موج نور باشد، نور هنگام عبور از شکاف پراشیده می‌شود.

برای تعیین شدت حاصل از یک چشمه  $A$  بر اثر وجود روزنه  $S$  در یک نقطه غیرمشخص  $P$  از پرده، باید اثر  $A$  را در نقاط مختلف روزنه  $S$  به دست آورد و سپس اثر مجموعه موجکهای حاصل از چشمه‌های ثانوی در روزنه  $S$  را پیدا کرد (شکل ۵-۴۹).

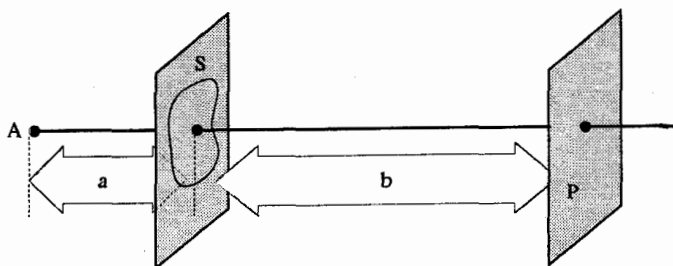
اگر فاصله چشمه تا روزنه را با  $a$  و فاصله روزنه تا پرده را با  $b$  نشان دهیم و این مقادیر محدود باشند، پراش را محدود یا فرنل گویند. اما اگر  $a$  و  $b$  مقادیر نامحدودی باشند پراش نامحدود یا فرانهور نامیده می‌شود.

برای ایجاد پراش نامحدود می‌توان چشمه  $A$  را در کانون یک عدسی همگرا قرار داد. پرتوهای موازی به روزنه می‌تابد و در پشت روزنه عدسی همگرای دیگری قرار می‌گیرد، به طوری که پرده در سطح کانونی آن باشد. در نتیجه پرتوهای موازی خروجی از روزنه روی پرده متمرکز می‌شود.

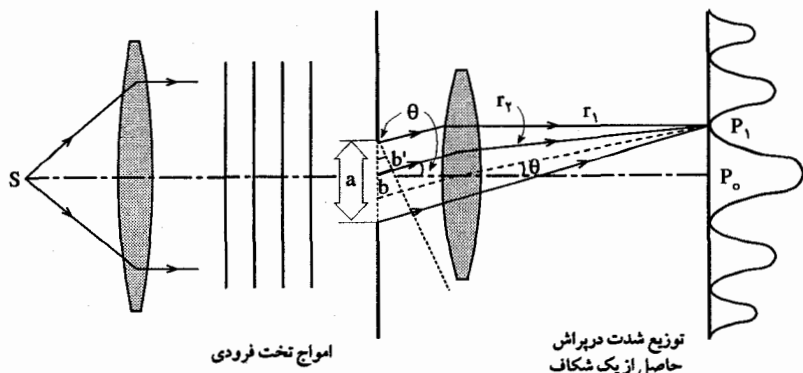
در پراش فرنل اگر چشمه نقطه‌ای باشد، سطح موج کروی و اگر چشمه خطی باشد سطح موج استوانه‌ای است ولی در پراش فرانهور چون نور موازی به روزنه می‌تابد سطح موج تخت است.

شکافی به شکل مستطیل بسیار باریک و خیلی دراز را در نظر می‌گیریم به طوری که بتوان از اثر لبه‌ها چشم پوشید. با فرض اینکه پرتوهای تابیده بر صفحه شکاف عمودند بنابر اصل هویگنس وقتی امواج به شکاف می‌رسند هر نقطه آن به یک چشمه فرعی تبدیل می‌شود و موجهای جدیدی گسیل می‌شوند.

در نقطه  $P$  دسته‌ای از امواج که به طور افقی از شکاف به عرض  $a$  خارج شده‌اند به وسیله عدسی  $I_p$  کانونی می‌شوند. راه نوری این امواج یکی است و چون در صفحه شکاف با یکدیگر همفاز هستند



شکل ۵-۴۹



شکل ۵-۵۰

در  $P_1$  نیز همفازند و شدت در نوار مرکزی ماکسیمم است (شکل ۵-۵۰). در نقطه دیگری مانند  $P_1$  پرتوهای نور شکاف را تحت زاویه  $\theta$  ترک می‌کنند. پرتو  $r_1$  از بالای شکاف و پرتو  $r_2$  از مرکز آن گسیل شده‌اند. با انتخاب مناسب  $\theta$  به‌طوری‌که  $bb'$  نصف طول موج باشد پرتوهای  $r_1$  و  $r_2$  در نقطه  $P_1$  با یکدیگر به‌اندازه  $\pi$  اختلاف فاز خواهند داشت و اثر یکدیگر را خنثا می‌کنند. در حقیقت اثر هر پرتو که از نیمه بالایی شکاف گسیل می‌شود با اثر پرتو دیگری که از نیمه پایینی شکاف در فاصله  $\frac{a}{2}$  از آن گسیل می‌شود خنثا خواهد شد. لذا نقطه  $P_1$  نخستین مینیمم پراش است و شدت نور در آن صفر خواهد بود. پس  $\frac{a}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$  یا  $a \sin \theta = \lambda$ . ملاحظه می‌شود که هرچه شکاف باریکتر، یعنی  $a$  کوچکتر، باشد  $\theta$  بزرگتر و ماکسیمم مرکزی پهنتر خواهد بود. اگر  $a = \lambda$  باشد،  $\theta = \pi/2$  و ماکسیمم مرکزی تمام پرده را می‌پوشاند. به‌طور کلی اگر اختلاف راه برای دو پرتو مضرب فردی از  $\lambda/2$  باشد، یعنی

$$r_1 - r_2 = \frac{a}{2} \sin \theta = (2k+1)\lambda/2$$

تداخل ویرانگر است. به‌ازای  $k$  مساوی اعداد صحیح برای دو پرتوی که از مرکز و لبه شکاف گسیل می‌شوند یا برای همه زوج پرتوهای دیگری که از نقاطی به فاصله  $a/2$  از یکدیگر به‌وجود می‌آیند تداخل ویرانگر است و در راستای متناظر  $\theta$  هیچ موجی پراشیده نمی‌شود. و برای نقاط ماکسیمم که با تقریب زیادی وسط مینیممها قرار دارند تداخل سازنده است و  $a/2 \sin \theta = 2k\lambda/2$ .

هدف آزمایش: بررسی پراش فرنل و پراش فرانهوف.

### I- پراش فرنل

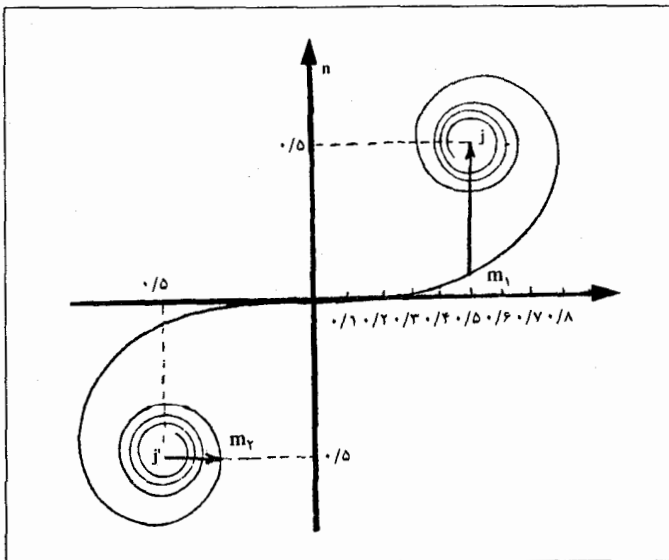
وسایل لازم: چراغ سدیم - تخت دیدگانی - چند سره - دو شکاف با عرض قابل تغییر - سیم نازک - سیم کلفت - چشمی فرنل - توری منطقه‌ای - میان بند دایره‌ای.

۱- پراش فرنل یک شکاف - شکاف چشمه و شکاف پراش و چشمی فرنل را روی تخت دیدگانی سوار کنید. چراغ سدیم را پشت شکاف چشمه روشن کنید. شکاف پراش را ابتدا خیلی کم باز کنید. فریزهای پراش را در سایه هندسی خواهید دید. شکاف پراش را باز کنید و مشاهده کنید که فاصله فریزها با عرض شکاف نسبت عکس دارند. باز هم شکاف پراش را بازتر کنید و ملاحظه کنید که وقتی به باز کردن این شکاف ادامه می‌دهید در مرکز شکل پراش یک خط روشن دارید. به باز کردن شکاف ادامه دهید و ملاحظه کنید که مرکز به طور متناوب تاریک و روشن می‌شود. اگر شکاف را خیلی باز کنید فریزهای لبه پرده مربوط به دو حد شکاف را مشاهده می‌کنید. این فریزها در روشنایی هندسی هستند یا تاریکی هندسی و چرا؟ شکل فریزها را در هر حالت رسم کنید.

عرض شکاف را دوباره کم کنید تا فریزها در سایه هندسی شکاف تشکیل شوند. در این حالت بررسی کنید که فاصله فریزها با فاصله چشمه تا شکاف و فاصله شکاف تا چشمی فرنل چه نسبتی دارند.

۲- پراش سیم - به جای شکاف پراش یک سیم نازک قرار دهید. فریزهای پراش سیم را در چشمی مشاهده کنید. به جای سیم نازک سیم کلفت‌تری قرار دهید و فریزهای آن را ببینید. دقت کنید که در هر دو حال مرکز سایه هندسی روشن است. دلیل مشاهدات خود را با توجه به منحنی کرنوشکل ۵ - ۵۱ بنویسید.

۳- پراش توری منطقه‌ای - به جای سیم کلفت یک توری منطقه‌ای قرار دهید (شکل ۵ - ۵۲).



شکل ۵-۵۱





شکل ۵-۵۲

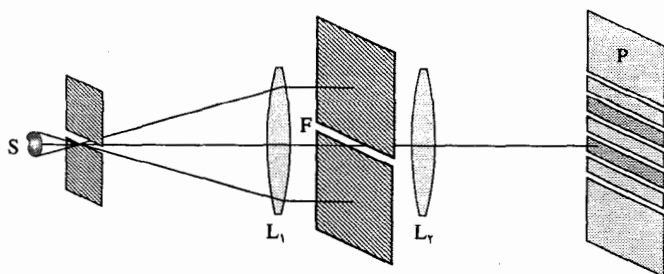
شکاف چشمه را بردارید و به جای آن یک میان‌بند دایره‌ای قرار دهید. چشمی فرنل را حرکت دهید و تصاویر مختلف میان‌بند دایره‌ای را که توسط توری منطقه‌ای تشکیل می‌شود مشاهده کنید. دلیل وجود این تصاویر چیست؟ با اندازه‌گیری  $a$  و  $b$  یعنی فاصله میان‌بند تا توری منطقه‌ای و فاصله توری منطقه‌ای تا چشمی فرنل برای دو تصویر اول، شعاع منطقه مرکزی توری را از فرمول  $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} = (2n + 1)\lambda/R^2$  به دست آورید.

## II- پراش فرانوفر

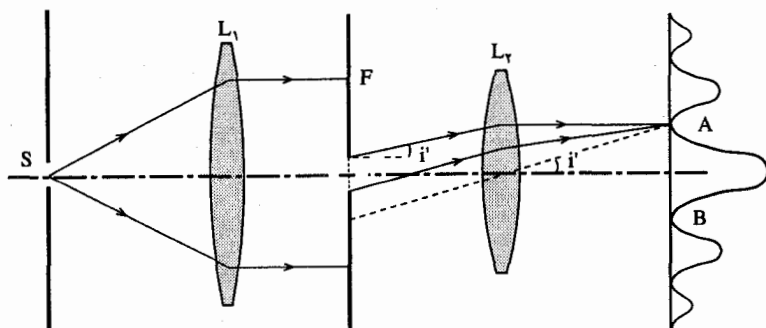
وسایل آزمایش: چراغ سدیم - تخت دیدگانی - چند سره - یک شکاف - دو شکاف - دو عدسی همگرا - پیچ میکرومتریک - میکروسکوپ متحرک.

### روش آزمایش

پراش فرانوفر یک شکاف - شکاف  $F$  را روی پیچ میکرومتریک سوار کنید و آن را روی تخت دیدگانی قرار دهید. به وسیله عدسی همگرای  $L_1$  نوری را که از شکاف چشمه  $S$  می‌آید به طور موازی به این شکاف پراشده بتابانید، بعد از این شکاف و نزدیک به آن یک عدسی همگرای  $L_2$  قرار دهید (شکل ۵-۵۳). سپس میکروسکوپ متحرک را در جایی قرار دهید تا فریزهای پراش را که در سطح کانونی  $L_2$  تشکیل می‌شود مشاهده کنید. حال در میکروسکوپ نگاه کنید و پیچ میکرومتریک را بچرخانید تا شکاف  $F$  در سطح خود حرکت کند و مشاهده کنید که جای شکل پراش تغییر نمی‌کند، دلیل آن را ذکر کنید.



شکل ۵-۵۳

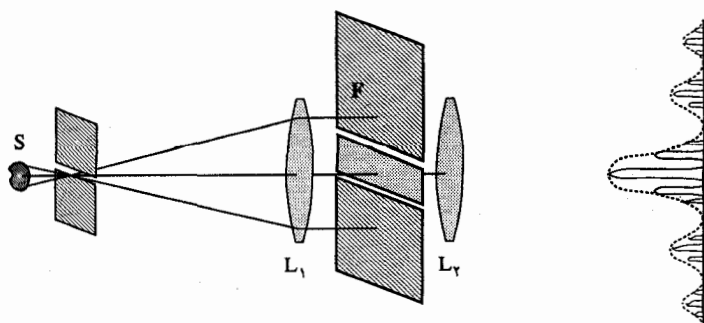


شکل ۵-۵۴

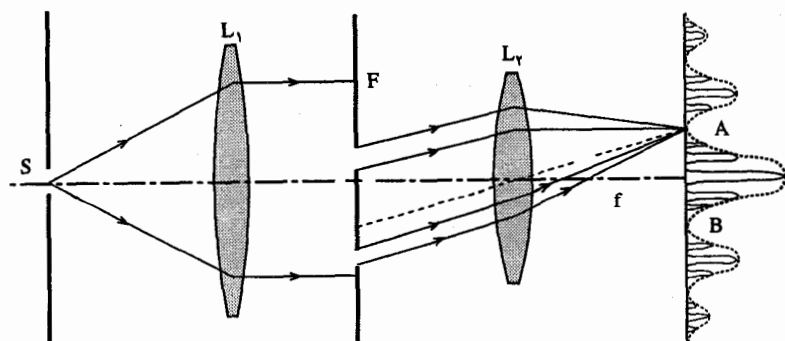
اگر زاویه تابش  $i$  و زاویه پراش  $i'$  و پهنای شکاف  $b$  باشد مینیممهای پراش از رابطه  $\sin i' - \sin i = \pm \frac{k\lambda}{b}$  به دست می آید. در اینجا چون  $i = 0$  است داریم  $\sin i' = \pm \frac{k\lambda}{b}$ . اگر  $i'$  کوچک باشد و  $\sin i'$  را مساوی  $\tan i'$  قرار دهیم AB یعنی پهنای لکه مرکزی پراش مساوی است با  $AB = d = \frac{2f\lambda}{b}$  که در آن  $f$  فاصله کانونی عدسی  $L_2$  است (شکل ۵-۵۴). با خواندن پهنای لکه مرکزی پراش و خواندن  $b$  یعنی عرض شکاف توسط میکروسکوپ متحرک با نور زرد سدیم  $f$  را پیدا کنید. طول موج نور زرد سدیم برابر است با  $\lambda = 5893 \text{ \AA}$ .

پراش فرانیهوفر دو شکاف - حال شکاف  $F$  را بردارید و به جای آن یک دو روزنه یانگ را قرار دهید. به موجب آزمایش قبل شکل پراش دو روزنه در سطح کانونی عدسی  $L_2$  کاملاً روی هم منطبق است (چرا؟). دقت کنید که در لکه مرکزی پراش و همچنین در فریزهای روشن دیگر پراش، فریزهای تداخلی حاصل از دو چشمه همزمان یانگ نیز مشاهده می شود (شکل ۵-۵۵).

منحنی نقطه چین نمایش پراش هرکدام از دو روزنه است که هر دو روی هم قرار دارند. فریزهایی که با خط پر نمایش داده شده اند فریزهای حاصل از تداخل اند. اگر  $b$  پهنای هرکدام از دو روزنه و



شکل ۵-۵۵



شکل ۵-۵۶

$a$  فاصله دو روزنه از یکدیگر باشد داریم  $AB = d = 2f \frac{\lambda}{b}$  و فاصله فریزهای تداخلی برابر است با  $i = f \frac{\lambda}{a}$ . پس در لکه مرکزی پراش  $2 \frac{a}{b}$  فریز تداخلی می‌گنجد. با شمردن تعداد فریزهای تداخلی در لکه مرکزی پراش و خواندن پهنای شکاف توسط میکروسکوپ متحرک فاصله دو روزنه را حساب کنید (شکل ۵ - ۵۶).

## آزمایش ۴۳ = بررسی توری مسطح

### مقدمه

اگر نور تکفامی به طول موج  $\lambda$  بر سطح یک توری پراش بتابد، هرگاه زوایای تابش و پراش را به  $i$  و  $i'$  و فاصله دو شیار توری را به  $a$  نشان دهیم در ماکسیمهای مربوط به طول موج  $\lambda$  داریم

$$a(\sin i \pm \sin i') = k\lambda$$

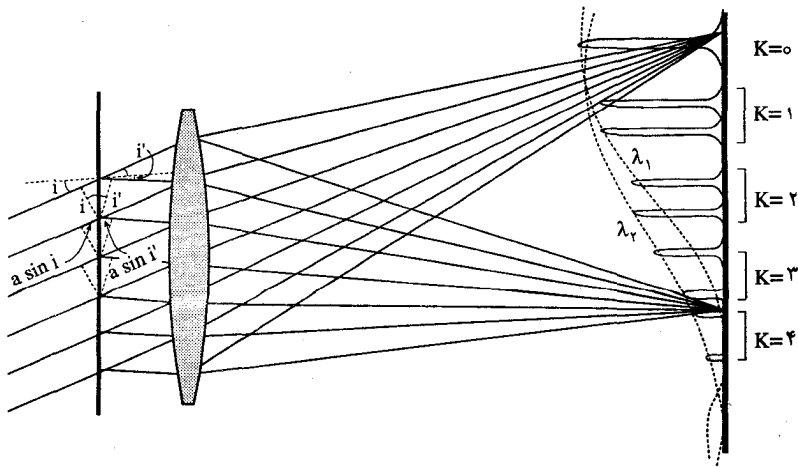
اگر نور تابیده بر توری عمود باشد ( $i = 0$ ) رابطه به صورت

$$a \sin i' = \pm k\lambda$$

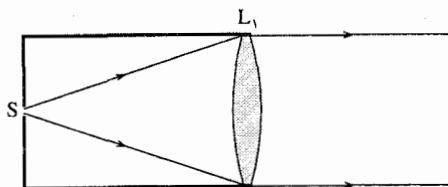
درمی آید. در صورتی که نور تابیده از چند طول موج تشکیل شده باشد چون زاویه پراش تابع طول موج است، طول موجهای مختلف از یکدیگر جدا شده و طیف یا بیناب آن نور در رتبه‌های مختلف تشکیل می‌شود (شکل ۵-۵۷).

وسایل آزمایش: گونیومتر- توری مسطح- چراغ سدیم- گیسلر هلیوم- گیسلر جیوه- ترانسفورماتور. شرح دستگاه- گونیومتر تشکیل شده است از:

۱- کلیماتور. کلیماتور لوله‌ای است که در جلو آن شکاف قابل تنظیمی قرار دارد (S) به طوری که این شکاف در سطح کانونی عدسی کوژی که در انتهای کلیماتور واقع است قرار دارد ( $I_1$ ) در نتیجه پرتوهایی که به شکاف می‌رسند به طور موازی از کلیماتور خارج می‌شوند (شکل ۵-۵۸).

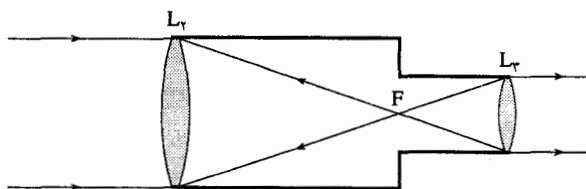


شکل ۵-۵۷



شکل ۵۸-۵

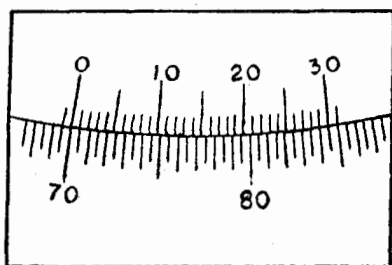
۲- دوربین. دوربین از یک عدسی شیئی ( $L_p$ ) و یک عدسی چشمی ( $L_p$ ) تشکیل شده است. دسته پرتوهای موازی به عدسی ( $L_p$ ) برمی خورند و در سطح کانونی  $F$  آن جمع می شوند. سطح کانونی شیئی عدسی چشمی ( $L_p$ ) نیز در همان نقطه  $F$  است و در نتیجه تصویری که در  $F$  تشکیل شده است در بی نهایت مشاهده می شود (شکل ۵ - ۵۹).



شکل ۵۹-۵

۳- صفحه مدرج. صفحه ای است که توری روی آن قرار می گیرد و به  $72^\circ$  نیم درجه تقسیم شده است. با کمک ورنیه هایی که به کلیماتور و دوربین متصل است می توان زاویه هایی با دقت یک دقیقه را به دست آورد. در این ورنیه ها،  $14/5^\circ$  درجه از درجه بندی اصلی را به  $30^\circ$  قسمت کرده اند. اختلاف هر فاصله از درجه بندی اصلی با هر فاصله از درجه بندی ورنیه برابر است با  $\frac{1^\circ}{6} = \frac{14/5^\circ}{30} = \frac{1^\circ}{2}$ . تطبیق صفر ورنیه روی درجه بندی اصلی تا نیم درجه مستقیماً تعیین می شود. سپس از روی درجه بندی ورنیه درجه ای را که مطابق با خط درجه بندی اصلی است می توان تعیین کرد (شکل ۵ - ۶۰).

روش آزمایش: دوربین گونیومتر را با بی نهایت میزان کنید. کلیماتور را مقابل دوربین قرار دهید و عدسی آن را عقب و جلو ببرید تا تصویر شکاف را بدون پارالاکس بر رتیکول دوربین ببینید. شکاف



شکل ۶۰-۵

را با نور زرد سدیم روشن کنید و توری را بر میزچه گونیومتر قرار دهید به طوری که شیارهای آن موازی با محور دوران دوربین و سطح توری عمود بر محور کلیماتور و سطح خط کشیده توری به سمت دوربین باشد. در این حالت زاویه  $i$  تقریباً صفر است. دوربین را به آهستگی بگردانید، خطوط زردی موازی تصویر شکاف در آن خواهید دید. این خطوط را خوب با دید خود میزان کنید.

اندازه گیری زاویه پراش طیفهای متوالی - خطوط زرد را به ترتیب بر رتیکول دوربین بیاورید و در رتبه های یک، دو و سه زوایای  $i'_1$ ،  $i'_2$  و  $i'_3$  را از طرف چپ و راست اندازه بگیرید. اگر زوایای  $i'_1$  و  $i'_2$  خطوط اول زرد سمت چپ و راست مساوی نباشد معلوم می شود که سطح توری عمود بر امتداد شعاع تابش نیست. آن را تا اندازه ای که می توانید اصلاح کنید ولی در فرمول مقدار متوسط زاویه های چپ و راست را به کار ببرید و اثر تغییر ضریب  $k$  را در فرمول معلوم کنید.

با کمک لوله گیسلر هلیم یا گاز دیگری که طول موجهای آن معلوم باشد تغییرات  $\sin i'$  را با طول موج رسم کنید و با این طول موجهای معلوم فاصله دو خط توری را پیدا کنید. طول موجهای مجهول لوله های گیسلر مختلف را با استفاده از منحنی و با استفاده از فاصله دو خط توری به دست آورید.

معلوم کنید در طیفهای متوالی کدام قسمت از رنگهای مختلف داخل هم می شوند؟

توان جدا کننده توری را در طیفهای متوالی از فرمول  $\lambda/\Delta\lambda = kN$  به دست آورید، که در آن  $N$  تعداد کل خطوط توری است (طول توری یک اینچ است).

# آزمایش ۴۴ دستگاه نورنبرگ

## مقدمه

در شکل ۵-۶۱، پرتو SO نور پلاریزه خطی است، یعنی میدان الکتریکی E همیشه روی خط ثابتی قرار دارد. این پرتو به سطح جدایی xOy می‌تابد و سطح موج  $\Sigma$  تخت و بر SO عمود است. میدان E را بر دو امتداد عمود بر سطح فرود xOz و عمود بر آن تصویر می‌کنیم. سه محور  $E_x$  و  $E_y$  و SO یک دستگاه مختصات راستگرد تشکیل می‌دهند، زیرا هرگاه از O سطح موج را نگاه کنیم  $E_x$  در جهت مثلثاتی به طرف  $E_y$  می‌چرخد. تأخیر در هر نقطه Q(x, y, z) از سطح موج  $\Sigma$  نسبت به نقطه O برابر تأخیر در نقطه M است و تصویر OQ روی OM عبارت است از

$$OM = \alpha x + \gamma z = x \sin i + z \cos i$$

$\alpha$  و  $\beta$  و  $\gamma$  کسینوسهای هادی OM هستند و مقدار  $\beta$  صفر است. مؤلفه‌های ارتعاش  $E = E_x + E_y$  عبارتند از

$$\begin{aligned} E_x &= a \cos i \cos \omega \left( t - \frac{x \sin i + z \cos i}{v} \right) \\ E_y &= b \cos \omega \left( t - \frac{x \sin i + z \cos i}{v} \right) \\ E_z &= -a \sin i \cos \omega \left( t - \frac{x \sin i + z \cos i}{v} \right) \end{aligned}$$

$E_z$  در جهت عکس OZ است. در فرمولهای بالا a و b دامنه‌های  $E_x$  و  $E_y$  هستند. دامنه  $H_x$  مربوط به  $E_y$  و برابر است با  $H_x = \sqrt{\epsilon} b$  و دامنه  $H_y$  مربوط به  $E_x$  برابر است با  $H_y = \sqrt{\epsilon} a$ . چون سه محور  $E_x$  و  $E_y$  و SO، همچنین سه محور  $E_x$  و  $E_y$  و SO دستگاه مختصات راستگرد تشکیل می‌دهند، بنابراین تصاویر H عبارتند از

$$\begin{aligned} H_x &= -\sqrt{\epsilon} b \cos i \cos \omega \left( t - \frac{x \sin i + z \cos i}{v} \right) \\ H_y &= \sqrt{\epsilon} a \cos \omega \left( t - \frac{x \sin i + z \cos i}{v} \right) \\ H_z &= \sqrt{\epsilon} b \sin i \cos \omega \left( t - \frac{x \sin i + z \cos i}{v} \right) \end{aligned}$$

زیرا  $H_z$  در جهت zهای مثبت است.

برای موج شکسته در صورتی که سه محور  $E'_x$  و  $E'_y$  و OT دستگاه مختصات راستگرد تشکیل دهند و جهت مثبت  $E'_y$  موازی Oy فرض شود، تصویر یک نقطه از سطح موج  $\Sigma'$  روی شعاع OM' چنین است

$$OM' = \alpha' x + \gamma' z = x \sin r + z \cos r$$





نظر به اینکه مجموع دو میدان فرودی و بازتابیده برابر میدان در محیط اول است

$$E_x + E_x'' = E_x' \quad \text{و} \quad E_y + E_y'' = E_y'$$

$$H_x + H_x'' = H_x' \quad \text{و} \quad H_y + H_y'' = H_y'$$

چون  $\cos \theta = -\cos i' = -\cos i$  است، روابط بالا به صورت زیر درمی آیند

$$a \cos i + a'' \cos \theta = (a - a'') \cos i = a' \cos r$$

$$b + b'' = b'$$

$$\sqrt{\epsilon} b \cos i + \sqrt{\epsilon} b'' \cos \theta = \sqrt{\epsilon} (b - b'') \cos i = \sqrt{\epsilon'} b' \cos r$$

$$\sqrt{\epsilon} a + \sqrt{\epsilon} a'' = \sqrt{\epsilon'} a'$$

این روابط را به صورت زیر نیز می توان نوشت

$$a - a'' = a' \frac{\cos r}{\cos i} \quad (۱)$$

$$a + a'' = \sqrt{\frac{\epsilon'}{\epsilon}} a' \quad (۲)$$

$$b + b'' = b' \quad (۳)$$

$$b - b'' = \sqrt{\frac{\epsilon'}{\epsilon}} b' \frac{\cos r}{\cos i} \quad (۴)$$

روابط (۱) و (۲) را با هم و روابط (۳) و (۴) را نیز با هم جمع می کنیم.

$$a' = a \frac{2\sqrt{\epsilon} \cos i}{\sqrt{\epsilon} \cos r + \sqrt{\epsilon'} \cos i} \quad (۵)$$

$$b' = b \frac{2\sqrt{\epsilon} \cos i}{\sqrt{\epsilon} \cos i + \sqrt{\epsilon'} \cos r} \quad (۶)$$

رابطه (۱) را از (۲) و رابطه (۴) را از (۳) کم می کنیم

$$a'' = \frac{1}{2} a' \left( \sqrt{\frac{\epsilon'}{\epsilon}} - \frac{\cos r}{\cos i} \right) = a \frac{\sqrt{\epsilon'} \cos i - \sqrt{\epsilon} \cos r}{\sqrt{\epsilon'} \cos i + \sqrt{\epsilon} \cos r} \quad (۷)$$

$$b'' = b \frac{\sqrt{\epsilon} \cos i - \sqrt{\epsilon'} \cos r}{\sqrt{\epsilon} \cos i + \sqrt{\epsilon'} \cos r} \quad (۸)$$

در روابط (۵) و (۶) و (۷) و (۸) به جای  $\sqrt{\frac{\epsilon'}{\epsilon}}$  مقدار  $\frac{\sin i}{\sin r}$  را قرار می دهیم

$$a'' = a \frac{\sin i \cos i - \sin r \cos r}{\sin i \cos i + \sin r \cos r} = a \frac{\sin 2i - \sin 2r}{\sin 2i + \sin 2r} \quad (۹)$$

$$a'' = a \frac{\cos(i+r) \sin(i-r)}{\sin(i+r) \cos(i-r)} = a \frac{\tan(i-r)}{\tan(i+r)} \quad (۱۰)$$

$$a' = a \frac{\gamma \cos i \sin r}{\sin r \cos r + \sin i \cos i} = a \frac{\gamma \cos i \sin r}{\sin \gamma i + \sin \gamma r} = a \frac{\gamma \cos i \sin r}{\sin(i+r) \cos(i-r)} \quad (11)$$

$$b'' = b \frac{\sin r \cos i - \sin i \cos r}{\sin r \cos i + \sin i \cos r} = -b \frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} \quad (12)$$

$$b' = b \frac{\gamma \cos i \sin r}{\sin i \cos r + \cos i \sin r} = b \frac{\gamma \cos i \sin r}{\sin(i+r)} \quad (13)$$

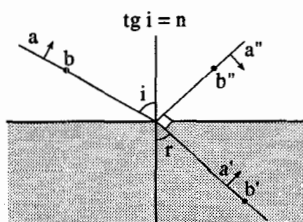
این عبارات به فرمولهای فرنل معروفند.

در صورتی که پرتوهای بازتابیده و شکسته برهم عمود باشند، مطابق شکل ۵-۶۲،  $i+r = \frac{\pi}{2}$  و در نتیجه  $\tan(i+r) = \infty$  می شود و با توجه به رابطه (۱۰) چون  $a'' = 0$  خواهد شد میدان الکتریکی پرتو بازتابیده تنها شامل مؤلفه عمود بر صفحه تابش یعنی  $b''$  است. به این ترتیب پرتو بازتابیده پلاریزه خطی است. طبق قانون دکارت  $\sin i = n \sin r$  داریم

$$\sin i = n \sin\left(\frac{\pi}{2} - i\right) = n \cos i$$

در نتیجه

$$\tan i = n$$



شکل ۵-۶۲

بنابر این شرط اینکه نور بازتابیده از یک سطح پلاریزه خطی شود این است که تانژانت زاویه تابش برابر ضریب شکست نسبی دو محیط باشد. این زاویه تابش را زاویه بروستر می گویند. در حالتی که نور از هوا بر شیشه می تابد داریم  $\tan i = 1/5$  و  $i = 57^\circ$ .

هدف آزمایش: بررسی پلاریزاسیون نور به وسیله بازتاب و شکست با دستگاه نورنبرگ.

لوازم آزمایش: دستگاه نورنبرگ - چراغ سفید - آینه کوچکی که پشت آن سیاه شده است - یک دسته شیشه و منشور نیکل یا پلاروید.

شرح دستگاه - دستگاه نورنبرگ، شکل ۵-۶۳، تشکیل شده از آینه ثابت و افقی J و شیشه متحرک M که می توان آن را حول محور افقی دوران داد. در بالای دستگاه محلی برای قراردادن آینه M' یا دسته شیشه یا منشور نیکل تعبیه شده است.

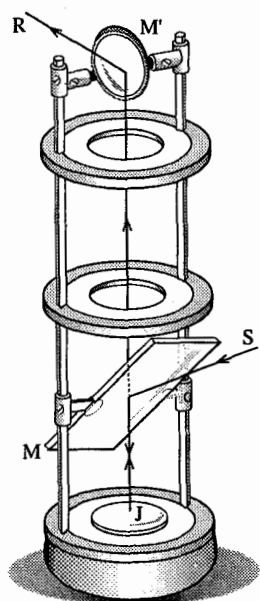
روش آزمایش: چراغ سفید را روشن کنید و جلوی شیشه M قرار دهید و در محل مخصوص بالای دستگاه منشور نیکل یا پلاروید را بگذارید. محل چراغ و شیشه M را طوری تغییر دهید که پرتوهای بازتابیده از M به طور تقریباً عمودی به آینه ثابت J برخورد کند و نور بازتابیده از آن، پس از عبور از شیشه M وارد نیکل یا پلاروید شود. تصویر لامپ را ملاحظه کنید، نیکل را بگردانید، شدت کم و زیاد می شود. نیکل را در حالتی که شدت مینیمم است قرار دهید. اکنون شیشه M را اندکی بچرخانید و چراغ را حرکت دهید تا تصویر لامپ خاموش شود. در این حالت بیشتر پرتوهای لامپ با زاویه حدود  $57^\circ$  به شیشه M می تابد و در نتیجه پرتوهای بازتابیده از M پلاریزه است (زیرا نیکل فقط نور پلاریزه خطی را

می تواند کاملاً خاموش کند). اکنون دستگاه تنظیم شده است، به موقعیت لامپ و شیشه دست نزدیک و نیکل را بردارید و آزمایشهای زیر را انجام دهید:

الف) آینه  $M'$  را در بالای دستگاه قرار دهید و آن را حول محور قائم بچرخانید تا صفحه تابش آن بر صفحه تابش شیشه  $M$  عمود شود. همان طور که به تصویر لامپ در آینه  $M'$  نگاه می کنید، آن را حول محور افقی بچرخانید تا زاویه تابش تقریباً  $57^\circ$  شود. در این هنگام تصویر لامپ محو می شود و در امتداد بازتاب  $R$  نوری نیست، چرا؟

ب) آینه  $M'$  را بردارید و به جای آن دسته شیشه را قرار دهید. اگر شرایط برای دسته شیشه همان شرایط آینه  $M'$  در حالت قبل باشد در امتداد  $R$  نوری نیست ولی نور عبوری وجود دارد، چرا؟

پ) دسته شیشه را حول محور قائم بچرخانید تا دو صفحه تابش موازی شوند. نور عبوری کم می شود ولی خاموش نمی شود. نور بازتابی بیشتر می شود چرا؟



شکل ۵-۶۳

## آزمایش ۴۵ تعیین ضریب شکست یک دی الکتریک با استفاده از زاویه بروستر

### مقدمه

نور به وسیله بازتاب، هنگامی کاملاً پلاریزه می شود که پرتو بازتابیده و پرتو شکسته برهم عمود باشند. زاویه تابشی که حداکثر پلاریزاسیون را می دهد زاویه ای است که تانژانت آن مساوی ضریب شکست محیط بازتاب دهنده باشد (قانون بروستر). این زاویه تابش را، زاویه پلاریزاسیون یا زاویه بروستر می گویند. تمام اجسام می توانند نور را به وسیله بازتاب کم و بیش پلاریزه کنند و قانون بروستر همواره در مورد آنها صادق است. بنابراین زاویه بروستر بر حسب ضریب شکست اجسام فرق می کند.

هدف آزمایش: تعیین ضریب شکست یک دی الکتریک با اندازه گیری زاویه بروستر.

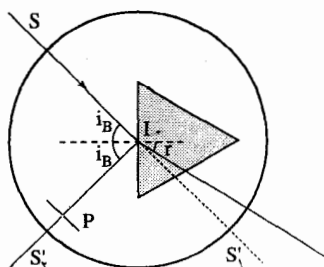
وسایل آزمایش: گونیومتر - منشور (به عنوان جسم دی الکتریک) - چراغ زرد سدیم - صفحه پلاروید.

روش آزمایش: چراغ سدیم را در جلو شکاف کلیماتور روشن کنید. لوله دوربین و کلیماتور را در راستای یکدیگر قرار دهید و لوله دوربین را تنظیم کنید تا تصویر شکاف S به وضوح روی تار رتیکول دوربین قرار گیرد، شکل ۵ - ۶۴، درجه مربوط به این راستا را یادداشت کنید ( $S_1'$ )

منشور را روی میزچه گونیومتر قرار دهید به طوری که یک سطح آن شامل مرکز میزچه باشد. این سطح از منشور نوری را که از کلیماتور خارج می شود دریافت می کند که قسمتی از آن شکسته و وارد منشور می شود و قسمت دیگر بازتاب می کند. هرگاه زاویه تابش طوری باشد که  $(i_B + r) = 90^\circ$  شود نور بازتابیده پلاریزه خطی است و می توان آن را با یک صفحه پلاروید خاموش کرد. در این حالت داریم

$$n = \frac{\sin i_B}{\sin r} = \frac{\sin i_B}{\cos i_B} = \tan i_B$$

در این رابطه  $i_B$  زاویه بروستر و  $r$  زاویه شکست در شیشه منشور است.



شکل ۵-۶۴

یک صفحه پلاروید را در برابر شیئی دوربین قرار دهید، (p)، زاویه تابش i را با گرداندن میزچه به تدریج تغییر دهید و با گرداندن دوربین تصویر شکاف را روی رتیکول بگذارید. پس از مشاهده تصویر، پلاروید را بچرخانید تا در چشمی دوربین مینیم روشنائی را ببینید. مقدار i به ازای کمترین مقدار ممکن روشنائی (تقریباً خاموش) برابر  $i_B$  است. درجه مربوط به این راستا را نیز یادداشت کنید ( $S'_1$ ). به کمک شکل ۵ - ۶۴،  $i_B$  را از فرمول زیر حساب کنید

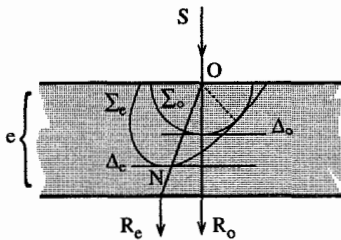
$$i_B = \frac{180 - S'_1 \hat{I} S'_1}{2}$$

ضریب شکست n را از رابطه  $\tan i_B = n$  محاسبه کنید و آزمایش را برای جسم دیگری تکرار کنید.

## آزمایش ۴۶ تیغه اسپات

### مقدمه

بلورها اجسام ناسانگرد هستند و در نتیجه خواص فیزیکی آنها در جهتهای مختلف یکسان نیست. وقتی که یک پرتو نوری به بلوری بتابد به دو پرتو شکسته می‌شود. این دو پرتو که با دو سرعت یعنی با دو ضریب شکست مختلف در بلور منتشر می‌شوند، هردو پلاریزه‌اند، یعنی ارتعاش هر پرتو فقط در جهت خاصی است، اما این دو ارتعاش برهم عمودند.



شکل ۵-۶۵

در بلورهای تک محوری یکی از این سرعتها در تمام جهتها ثابت است و به سرعت عادی موسوم است. سرعت دوم در جهتهای مختلف فرق می‌کند ولی مقدار آن بین دو حد قرار دارد. یکی از این حدها همان سرعت عادی است. سطح موج مربوط به سرعت عادی به شکل کره و سطح موج غیرعادی به شکل یک بیضوی دوار است (شکل ۵-۶۵). این دو سطح در دو نقطه باهم تماس دارند. امتدادی که این دو نقطه را به هم

وصل می‌کند محور نوری نامیده می‌شود. مقطع این دو سطح موج یک دایره و یک بیضی است. اکنون فرض می‌کنیم نوری به‌طور عمود به یک بلور متوازی‌السطوح به قطر  $e$  برخورد کند. از روی رسم هویگنس پرتوهای شکسته را پیدا می‌کنیم. صفحه موج نور تابشی موازی با سطح ورودی بلور است و در نتیجه آن را در بی‌نهایت قطع می‌کند. پس صفحه‌های موج پرتوهای شکسته باید موازی صفحه موج تابشی باشند ( $\Delta_o$  و  $\Delta_e$ ). صفحه موج مربوط به پرتو عادی،  $\Delta_o$ ، در نقطه  $M$  بر سطح موج عادی مماس است، پس بدون شکست از آن خارج می‌شود، صفحه موج مربوط به پرتو غیرعادی،  $\Delta_e$ ، در نقطه  $N$  به سطح موج مربوط به خود مماس است، یعنی باوجود اینکه نور عمودی تابیده است، شکسته و در موقع خروج موازی امتداد اولیه از بلور خارج می‌شود. اگر بلور را حول  $S_o$  بچرخانیم پرتو غیرعادی  $R_e$  حول  $R_o$  گردش خواهد کرد.

هدف آزمایش: اندازه‌گیری ضریب شکست عادی و غیرعادی و تعیین زاویه بین دو پرتو عادی و غیرعادی در بلور اسپات.

وسایل آزمایش: تخت دیدگانی - میکروسکوپ متحرک - چراغ سدیم - شکاف - بلور اسپات. روش آزمایش: بلور اسپات را که به شکل تیغه متوازی‌السطوح بریده شده است، روی نقطه‌ای روی کاغذ قرار دهید. دو تصویر خواهید دید. بلور را حول محور عمود بر کاغذ بچرخانید، یکی از نقطه‌ها حول دیگری می‌چرخد. چرا تصویر در یک سطح دیده نمی‌شود؟ ضریب شکست عادی بیشتر است یا غیرعادی؟

چراغ سدیم را روشن کنید. شکاف و میکروسکوپ را روی تخت دیدگانی قرار دهید. تصویر شکاف را در میکروسکوپ پیدا و جای میکروسکوپ را یادداشت کنید (A). حال بلور اسپات را بین دو شکاف و میکروسکوپ قرار دهید. دو تصویر مشاهده می شود که هیچ کدام واضح نیستند. میکروسکوپ را قدری عقب بیاورید تا یکی از تصاویر واضح شود (A'). سپس تصویر دیگر را واضح و جای میکروسکوپ را یادداشت کنید (A''). دو ضریب شکست عادی و غیرعادی از روابط زیر محاسبه می شوند

$$AA' = e \left( 1 - \frac{1}{n'} \right)$$

$$AA'' = e \left( 1 - \frac{1}{n''} \right)$$

e ضخامت بلور است. دقت کنید که کدام ضریب شکست عادی و کدام ضریب شکست غیرعادی است.

به کمک پیچ میکرومتریک روی میکروسکوپ فاصله دو تصویر را اندازه بگیرید (d) و از رابطه

$$\tan \alpha = \frac{d}{e}$$

زاویه بین پرتوهای عادی و غیرعادی را حساب کنید.

## آزمایش ۴۷ تیغه‌های بلورین

### مقدمه

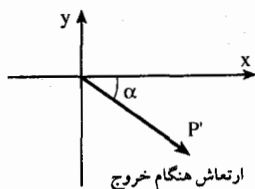
در آزمایش تیغه اسپات دیدیم که هرگاه نور پلاریزه به بلوری مثل میکا برخورد کند، ارتعاش آن در دو راستای معین عمود بر هم به نام راستاهای برگزیده تجزیه می‌شود. چون سرعت انتشار این دو مؤلفه یکسان نیست، موقع خروج از بلور اختلاف فازی به وجود می‌آید که بستگی به قطر بلور و اختلاف دو ضریب شکست بلور دارد. اگر این اختلاف فاز برابر  $\pi$  (معادل اختلاف راه  $\frac{\lambda}{2}$ ) باشد تیغه را نیم موج، و اگر این اختلاف فاز برابر  $\frac{\pi}{2}$  (معادل اختلاف راه  $\frac{\lambda}{4}$ ) باشد تیغه را ربع موج گویند.

تیغه نیم موج - فرض می‌کنیم ارتعاش  $P = P_0 \cos \omega t$  از پلاریزور خارج شود و به بلوری با راستاهای برگزیده  $x$  و  $y$  برخورد کند، به طوری که با محور  $x$  زاویه  $\alpha$  بسازد (شکل ۵-۶۶). در این صورت دو مؤلفه ارتعاش موقع ورود به بلور عبارتند از  $x = P_0 \cos \omega t \cos \alpha$  و  $y = P_0 \cos \omega t \sin \alpha$ . مؤلفه‌های این ارتعاش در موقع خروج از تیغه نیم موج عبارتند از

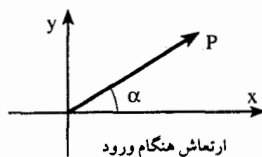
$$x' = P_0 \cos \omega t \cos \alpha$$

$$y' = P_0 \cos(\omega t - \pi) \sin \alpha = -P_0 \cos \omega t \sin \alpha$$

چنانکه ملاحظه می‌شود ارتعاش در موقع خروج نسبت به محور  $x$  قرینه می‌شود و به صورت  $P'$  درمی‌آید (شکل ۵-۶۷).



شکل ۵-۶۷



شکل ۵-۶۶

تیغه ربع موج - در مورد تیغه ربع موج اگر ارتعاش با همین خصوصیات وارد تیغه ربع موج شود، مؤلفه‌های ارتعاش ورودی عبارتند از

$$x = P_0 \cos \omega t \cos \alpha$$

$$y = P_0 \cos \omega t \sin \alpha$$



و مؤلفه‌های ارتعاش هنگام خروج از تیغه ربع عبارتند از

$$x' = P_0 \cos \omega t \cos \alpha$$

$$y' = P_0 \cos(\omega t - \frac{\pi}{4}) \sin \alpha + P_0 \sin \omega t \sin \alpha$$

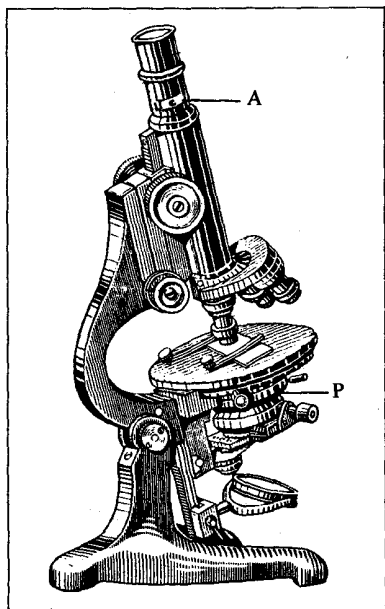
که معادلات پارامتری یک بیضی‌اند که محورهای آن منطبق بر راستاهای برگزیده بلور است. ملاحظه می‌شود که اگر  $\alpha = 45^\circ$  باشد ارتعاش برآیند، دایره خواهد شد.

در صورتی که تیغه نه نیم موج و نه ربع موج باشد، اختلاف فاز غیر مشخصی ایجاد می‌شود و ارتعاش خروجی یک بیضی با محورهای نامشخص خواهد بود. در صورتی که نمونه مورد نظریک برش سنگی باشد، نظیر گرانیت که از بلورهای مختلفی تشکیل شده است، اگر ضخامت بلور در همه جا یکسان باشد، چون اختلاف ضریب شکستهای عادی و غیرعادی برای بلورهای مختلف این برش متفاوت است، برای نوری با طول موج معین ارتعاش خروجی از بلورهای مختلف بیضیهایی با خروج از مرکزهای متفاوتی خواهد بود. در صورتی که نور مرکب باشد این اختلاف راهها طبیعتاً به طول موج نیز بستگی خواهد داشت.

هدف آزمایش - مطالعه تیغه‌های بلورین، نیم موج و ربع موج که برای نور زرد سدیم ساخته شده‌اند و مشاهده پدیده فتوالاستیسیته به کمک میکروسکوپ پلاریزان.

وسایل آزمایش: میکروسکوپ پلاریزان - تیغه‌های نیم موج و ربع موج - برش سنگ گرانیت - ورق سلوفان - یک قطعه پلاستیک - چراغ سدیم - چراغ سفید.

شرح دستگاه میکروسکوپ پلاریزان - دستگاه شبیه میکروسکوپ معمولی است (شکل ۵ - ۶۸)، با این تفاوت که نور قبل از تابیدن به جسم مورد آزمایش از یک نیکل (پلاریزور) می‌گذرد و پلاریزه می‌شود و در بالای میکروسکوپ قبل از چشمی نیز نیکل دیگری (آنالیزور) وجود دارد که می‌توان آن را از مسیر نور خارج کرد یا در مسیر نور قرار داد. در ضمن آنالیزور را در سر جای خود می‌توان از صفر تا  $90^\circ$  و پلاریزور را از صفر تا  $360^\circ$  چرخاند. پلاتین میکروسکوپ (جایی که نمونه مورد آزمایش آنجا قرار می‌گیرد) نیز به هر اندازه‌ای قابل چرخش است و به کمک پیچهایی می‌توان آن را در سر جای خود ثابت نگه داشت. عدسیهای دیگری نیز برای موازی یا همگرا کردن نور وجود دارد که در این آزمایش مورد بحث ما نیستند.



شکل ۵-۶۸

## روش آزمایش

(الف) اثر تیغه نیم موج بر نور پلاریزه - چراغ زرد سدیم را روشن کنید و پلاریزور و آنالیزور را به هم عمود کنید، نور خاموش می شود. تیغه نیم موج را بین پلاریزور و آنالیزور روی پلاتین میکروسکوپ قرار دهید. به طور کلی آنالیزور روشن می شود، چرا؟

با یک دورگرداندن آنالیزور دو بار می توان نور را خاموش کرد. در این دستگاه چون آنالیزور بیش از  $90^\circ$  نمی گردد، پلاریزور را یک دور کامل بگردانید و دوبار خاموشی را مشاهده کنید و علت آن را شرح دهید.

تیغه را بردارید و دوبار خاموشی ایجاد کنید. تیغه را روی پلاتین بگذارید، در حالت کلی آنالیزور روشن می شود. حال به کمک پلاتین میکروسکوپ، تیغه را یک دور کامل بگردانید، چهار بار خاموشی مشاهده می کنید، علت را شرح دهید. اکنون با گرداندن تیغه، خاموشی ایجاد کنید و از این حالت تیغه را به اندازه  $K\frac{\pi}{4} \neq \alpha$  بگردانید، نیکل روشن می شود. با ذکر دلیل بنویسید که در این صورت نیکل را باید به اندازه  $2\alpha$  گرداند تا دوباره خاموشی ایجاد شود (چون آنالیزور در این دستگاه بیش از  $90^\circ$  نمی چرخد،  $\alpha$  را کوچکتر از  $45^\circ$  درجه اختیار کنید).

چراغ سفید را روشن و آنالیزور را خاموش کنید. تیغه نیم موج را روی پلاتین میکروسکوپ قرار دهید، آنالیزور روشن می شود. با یک بار گرداندن آنالیزور چون دو بار نور زرد سدیم خاموش می شود (تیغه برای نور زرد سدیم نیم موج است) در نتیجه رنگ ارغوانی مشاهده خواهد شد. در این میکروسکوپ چون آنالیزور بیش از  $90^\circ$  نمی گردد، پلاریزور را یک دور کامل بگردانید و رنگ ارغوانی را دو بار مشاهده کنید.

(ب) اثر تیغه ربع موج بر نور پلاریزه - برای نور زرد، آنالیزور را خاموش کنید و تیغه ربع موج را روی پلاتین میکروسکوپ قرار دهید. آنالیزور به طور کلی روشن می شود، علت چیست؟ آنالیزور را بگردانید، شدت کم و زیاد می شود، چرا؟ تیغه را بگردانید تا خاموشی ایجاد شود. از این حالت تیغه را  $45^\circ$  بگردانید. حال آنالیزور را بچرخانید و دلیل ثابت بودن شدت را بنویسید.

(پ) برش سنگ گرانیت - با نور سفید خاموشی ایجاد کنید. یک برش از سنگ گرانیت را روی پلاتین میکروسکوپ قرار دهید. علت رنگهایی را که مشاهده می کنید بنویسید. این رنگها را رنگ دوشکستی می گویند. تیغه گرانیت را یک دور کامل بگردانید، علت تغییراتی را که مشاهده می کنید ذکر کنید. آنالیزور و پلاریزور را موازی کنید، چه تغییری مشاهده می کنید؟ آنالیزور را بیرون بکشید آیا باز هم رنگی مشاهده می کنید؟

(ت) آزمایش با سلوفان (زرورق) - با نور سفید پلاریزور و آنالیزور را عمود کنید، سپس یک ورق کاغذ سلوفان را روی پلاتین میکروسکوپ قرار دهید، چه مشاهده می کنید؟ زرورق را چند لا کنید و

مشاهدات خود را بنویسید .

ث) پدیده فتوالاستیسیته - با نور سفید پلاریزور و آنالیزور را خاموش کنید . یک ورق پلاستیک معمولی روی پلاتین میکروسکوپ قرار دهید ، رنگی مشاهده نمی شود . (جسم همسانگرد است) سپس پلاستیک را از دو طرف بکشید و مشاهده کنید که رنگهایی پدیدار می شود . علت این است که در اثر کشش ، جسم همسانگرد به جسم ناهمسانگرد تبدیل شده است . گونیا یا نقالة پلاستیکی را بین پلاریزور و آنالیزور عمود بر هم قرار دهید ، علت فریزها و رنگهایی که مشاهده می کنید چیست ؟ آنالیزور را  $90^\circ$  بچرخانید ، علت تغییر رنگها چیست ؟

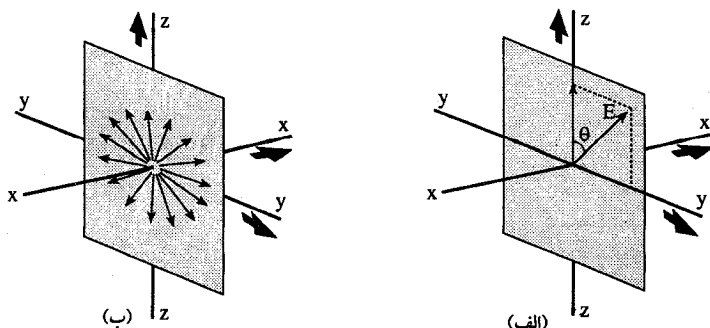
اگر میکروسکوپ پلاریزان در اختیار ندارید ، همین کارها را به وسیله دو ورقه پلاروید ، ولی با دقت کمتر ، می توانید انجام دهید .

# آزمایش ۴۸ تحقیق قانون مالوس و بررسی اثر تیغه ربع موج

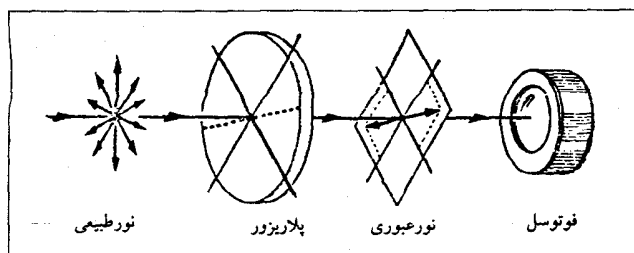
## مقدمه

امواج یک چشمه نوری از آنها و مولکولهای آن سرچشمه می‌گیرند. این اتمها و مولکولها مانند یک دو قطبی تابش می‌کنند و امواج هر اتم یا مولکول به طور خطی پلاریزه‌اند. البته نمی‌شود تنها یک مولکول را در نظر بگیریم و قطار موجی را که این مولکول می‌فرستد مطالعه کنیم، زیرا هر چشمه نوری شامل تعداد بسیاری از اتمها و مولکولهاست که تمام راستاهای ممکن را دارا هستند. برای یک دسته امواج نوری تخت از چنین چشمه‌هایی، که در راستای محور  $x$  و به طرف راست پیش می‌رود، صفحه موج موازی صفحه  $Y - Z$  است که مرکب از مخلوطی از امواجی است که برای هر کدام از آنها بردار  $E$  پلاریزه است و زاویه‌ای مانند  $\theta$  با محور  $Z$  می‌سازد (شکل ۵ - ۶۹ الف). از آنجا که تمام مقادیر زاویه  $\theta$  برای موجهای مختلف به طور مساوی محتمل هستند، بردارهای  $E$  همه راستاها را در صفحه  $Y - Z$  دارا خواهند بود، نظیر شکل (۵ - ۶۹ ب). این نوع نور «نور غیر پلاریزه» یا «نور طبیعی» نامیده می‌شود. هر کدام از بردارهای مختلف  $E$  دارای دو مؤلفه روی دو محور  $Y$  و  $Z$  صفحه موج است. روشهایی برای برگزیدن یکی از این دو مؤلفه و حذف مؤلفه دوم وجود دارد. این عمل را پلاریزه کردن نور می‌گوییم. تهیه نور پلاریزه در سه مرحله انجام می‌گیرد. تهیه نور طبیعی، تقسیم ارتعاش طبیعی به دو ارتعاش عمود بر هم و حذف یکی از این دو ارتعاش.

در ساختمان ورقه‌های پلاروید از خاصیت پلاریزاسیون به وسیله دو فامی یا دورنگی استفاده می‌شود. بعضی از اجسام این خاصیت را دارند که ارتعاش طبیعی را به دو ارتعاش عمود بر هم تجزیه و این دو ارتعاش عمود بر هم را به طور نامساوی جذب می‌کنند. یعنی اگر یک پرتو نور طبیعی به آنها بتابد یکی از ارتعاشها را جذب می‌کنند اما ارتعاش دیگر را عبور می‌دهند. در ساختن ورقه‌های پلاروید به شیوه مکانیکی مولکولهای دراز و باریک پلیمری را که با اتمهای ید همراه هستند به صورت رشته‌های باریک و موازی یکدیگر در می‌آورند. برای این کار ورقه نازک و شفاف از پلی وینیل الکل را قدری گرم



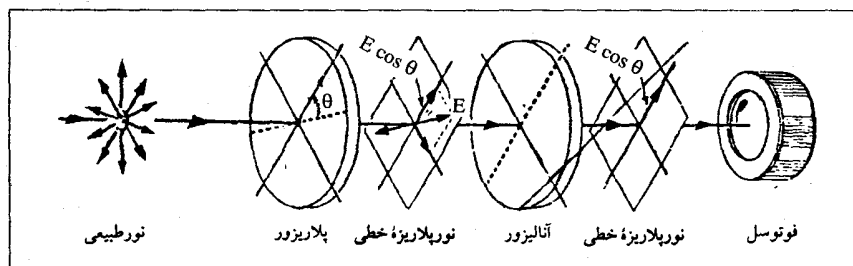
شکل ۵-۶۹



شکل ۵-۷۰

می‌کنند و سپس آن را به سرعت می‌کشند، به طوری که طول آن چند برابر طول اولیه‌اش شود. در حین کشش تعداد زیادی از مولکولهای پلیمر که ابتدا به طور غیر منظم قرار داشتند در راستای محور کشش به صورت رشته‌های نازک و موازی هم قرار می‌گیرند. سپس آن را به ورقه شفاف سختی مثل استات سلولز می‌چسبانند و آن را وارد محلولی که دارای ید زیادی است می‌کنند. در نتیجه اتمهای ید به رشته‌های موازی مولکولهای پلیمر می‌چسبند. حال اگر نور طبیعی به این ورقه دارای رشته‌های موازی برخورد کند، چون اتمهای ید دارای رسانایی الکتریکی خیلی زیادی هستند، در نتیجه مؤلفه میدان الکتریکی نور که موازی رشته‌ها باشد در این رشته‌ها تولید جریان الکتریکی خفیفی می‌کند و به صورت گرما تلف می‌شود. اما میدان الکتریکی نور که عمود بر راستای رشته‌ها باشد چون بین رشته‌ها عایق است تولید جریان نمی‌کند و به طور کامل از این ورقه می‌گذرد، در نتیجه یک مؤلفه به طور کامل جذب می‌شود و مؤلفه دیگر از ورقه می‌گذرد، یعنی نور گذر کرده به طور خطی پلاریزه می‌شود.

مطابق شکل ۵-۷۰، خط نقطه چین روی پلاریزور راستای بردار الکتریکی را در نور عبوری نشان می‌دهد. نور گذر کرده به یک فوتوسل تابانده می‌شود. جریان حاصل از فوتوسل از یک میکروآمپر متر که به فوتوسل وصل است می‌گذرد به طوری که انحراف عقربه آن با نور تابیده به فوتوسل متناسب است. هرگاه نور تابشی پلاریزه نباشد با چرخاندن پلاریزور (پلاریزید) دور محوری که در راستای پرتو تابشی است عقربه میکروآمپر متر مقدار ثابتی را نشان می‌دهد، زیرا تصویر بردارهای مختلف نور طبیعی بر راستای ارتعاش برگزیده پلاریزید با چرخاندن این راستا تغییر نمی‌کند. اما هرگاه پلاریزید دیگری که آنالیزور نام دارد در سر راه نور بین پلاریزور و فوتوسل مطابق شکل ۵-۷۱ قرار گیرد، به طوری که راستای گذر از آن با راستای ارتعاش برگزیده پلاریزور زاویه  $\theta$  بسازد، نور با دامنه  $E \cos \theta$  از آنالیزور می‌گذرد و چون



شکل ۵-۷۱

شدت نور متناسب با مجذور دامنه است خواهیم داشت

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

که  $I_0$  ماکسیم مقدار نور گذر کرده و  $I$  مقدار نور گذر کرده با زاویه  $\theta$  است. اگر پلاریزور و آنالیزور را بچرخانیم دامنه نور گذری با تغییر زاویه میان آن دو تغییر می‌کند.

اثر تیغه ربع موج - در یک بلور در هر صفحه موج دو بردار  $D'$  و  $D''$  عمود برهم وجود دارد که هرگاه ارتعاش الکتریکی موج نورانی در راستای هر کدام از این دو بردار واقع شده باشد این ارتعاش بدون تغییر شکل در بلور منتشر می‌شود. سرعت انتشار این دو ارتعاش با یکدیگر تفاوت دارند. هر ارتعاشی را که بر  $D'$  یا  $D''$  واقع نشده باشد، می‌توان به دو راستای  $D'$  و  $D''$  تجزیه کرد. چون این دو مؤلفه با دو سرعت متفاوت منتشر می‌شوند هنگام خروج از بلور ترکیب آنها با ارتعاش اصلی منطبق نیست زیرا یک اختلاف فازی مربوط به اختلاف دو سرعت پیدا کرده‌اند. هرگاه اختلاف راه  $k\lambda + \frac{\lambda}{4}$  باشد تیغه ربع موج نامیده می‌شود و یکی از مؤلفه‌ها هنگام خروج نسبت به دیگری  $\frac{\pi}{4}$  عقب می‌افتد و هنگامی که یکی از آنها ماکسیم است مؤلفه دیگر صفر است. در این صورت ارتعاش پلاریزه خطی به یک ارتعاش بیضی شکل تبدیل می‌شود.

وسایل آزمایش: فوتوسل - صفحات پلاروید در قاب مدرج - تیغه ربع موج - میکروآمپر متر - چراغ - تخت دیدگانی - چند سره - سیم رابط.

روش آزمایش: دو پلاروید را روی تخت دیدگانی سوار کنید. سپس پشت آنها یک فوتوسل قرار دهید و آن را به یک میکروآمپر متر وصل کنید. چراغ را جلو دو پلاروید روشن کنید. یکی از پلارویدها را بگردانید تا میکروآمپر متر ماکسیم جریان را نشان دهد. در این موقع دو محور پلارویدها باهم موازی‌اند. حال به تدریج یکی از پلارویدها را بچرخانید و جریانی را که از میکروآمپر متر می‌گذرد یادداشت کنید. زاویه پلاروید دوم را نسبت به پلاروید اول به تدریج تا  $180^\circ$  درجه تغییر دهید و تغییرات شدت جریان را با زاویه دو پلاروید رسم کنید. شدت به وسیله رابطه  $I = I_0 \cos^2 \theta$  تغییر می‌کند که در آن  $I_0$  ماکسیم مقدار نور عبوری و  $\theta$  زاویه میان محورهای دو پلاروید است.

پلاریزور و آنالیزور را برهم عمود کنید. می‌بینید که جریانی از میکروآمپر متر نمی‌گذرد. تیغه ربع موج را میان دو پلاروید قرار دهید. می‌بینید که جریان از میکروآمپر متر می‌گذرد، چرا؟ آیا با گرداندن آنالیزور می‌توان جریان را صفر کرد؟ چرا؟

پلاریزور و آنالیزور را برهم عمود کنید. تیغه ربع موج را میان دو پلاروید قرار دهید، با گرداندن تیغه جریان را صفر کنید. حال تیغه را از این وضعیت  $45^\circ$  درجه بچرخانید. آیا با گرداندن آنالیزور مقدار شدت جریان تغییر می‌کند؟ چرا؟ نتایج آزمایش را در جدولی خلاصه کنید.

# آزمایش ۴۹ = پلاریزاسیون چرخشی در بلور کوارتز

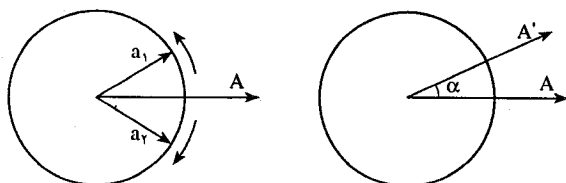
## مقدمه

بنابه فرضیه فرنل هر ارتعاش خطی را می‌توان برآیند دو ارتعاش دایره‌ای دانست که با سرعت مساوی در دو جهت مختلف می‌چرخند (شکل ۵-۷۲). دامنه هر کدام از ارتعاشهای دایره‌ای  $a_1$  و  $a_2$  نصف دامنه ارتعاش خطی است.  $a_1$  و  $a_2$  در امتداد A به هم می‌رسند و جمع آنها در آن موقع مساوی A است.

در بعضی از اجسام دو ارتعاش  $a_1$  و  $a_2$  با دو سرعت مختلف منتشر می‌شوند، یکی از ارتعاشها مثلاً  $a_1$  که کندتر منتشر می‌شود در یک مدت معین عده دورهای کمتری از ارتعاش  $a_2$  می‌زند و در نتیجه  $a_1$  و  $a_2$  در امتداد A به هم نمی‌رسند و در امتداد A' دیگری به هم می‌رسند که با امتداد A زاویه  $\alpha$  می‌سازد. این خاصیت را پلاریزاسیون چرخشی می‌گویند. زاویه  $\alpha$  با طول موج تغییر می‌کند. این تغییر زاویه نسبت به  $\lambda$  را پاشندگی چرخشی می‌نامند. بگو برای پاشندگی چرخشی فرمول  $\alpha = a + \frac{b}{\lambda^2}$  را داده است که شبیه فرمول کوشی برای پاشندگی معمولی است.  $a$  و  $b$  ضریبهای ثابتی هستند که به جنس جسم بستگی دارند. اگر برآیند A' به طرف راست چرخیده باشد جسم را راستگرد و اگر به طرف چپ چرخیده باشد جسم را چپگرد نامند.

وسایل آزمایش: دستگاه نورنبرگ - نیکل - بلور کوارتز - چراغ سدیم - چراغ سفید.

روش آزمایش: توسط دستگاه نورنبرگ با چراغ سدیم نور پلاریزه تهیه کنید. سپس توسط نیکل خاموشی ایجاد کنید. تیغه کوارتز را که عمود بر محور نوری بریده شده است سر راه نور قرار دهید. خاموشی از بین می‌رود. نیکل را بگردانید تا مجدداً خاموشی ایجاد شود. توجه کنید که چون نیکل فقط ارتعاشهای خطی را می‌تواند خاموش کند، نتیجه می‌گیریم که ارتعاش در عبور از کوارتز خطی باقی مانده است، اما مقداری چرخیده است. در صورتی که زاویه چرخش برای یک میلیمتر کوارتز با نور زرد سدیم ۲۱ درجه باشد، ضخامت کوارتز تقریباً چقدر بوده است؟ حال چراغ سفید را روشن کنید، در نیکل چه رنگی مشاهده می‌کنید و چرا؟ نیکل را بگردانید، به ترتیب چه رنگهایی را مشاهده می‌کنید و چرا؟ زاویه چرخش را برای رنگهایی که خاموش می‌شوند یادداشت کنید و تغییرات تقریبی



شکل ۵-۷۲

زاویهٔ چرخش را با طول موج با استفاده از جدول زیر رسم کنید، (باشندگی چرخشی).

زاویهٔ چرخش	طول موج حذف شده $\lambda^0$ (متوسط)	رنگ مکمل	رنگ حذف شده
	۷۰۸۵	سبز- آبی رنگ	قرمز
	۶۱۸۵	آبی- نیلی رنگ	نارنجی
	۵۷۵۰	نیلی- بنفش رنگ	زرد
	۵۲۶۰	تقریباً ارغوانی	سبز
	۴۷۳۵	قرمز مایل به نارنجی	آبی
	۴۴۰۰	نارنجی مایل به زرد	نیلی
	۴۰۲۵	زرد مایل به سبز	بنفش



# آزمایش ۵۰ = سویابی (پلاریمتری)

## مقدمه

قبلاً دیدیم که بعضی از بلورها از جمله کوارتز این خاصیت را دارند که سطح پلاریزاسیون نور را دوران می‌دهند. این خاصیت را فعالیت نوری می‌نامند. این نوع بلورها فقط در حالت جامد فعالیت نوری دارند و اگر آنها را ذوب کنیم دیگر فعالیت نوری ندارند. این امر نشان می‌دهد که فعالیت نوری این مواد به آرایش ویژه اتمها و مولکولها در بلور بستگی دارد، و این آرایش در حالت مایع و گازی که مولکولها نظم معینی ندارند از بین می‌رود. مواد دیگر مثل گلوکز، ساکاروز در حالت محلول بودن نیز فعالیت نوری خود را حفظ می‌کنند، یعنی در این مواد فعالیت نوری به تک تک مولکولها وابسته است نه به آرایش نسبی آنها. بنابراین اگر محلولی مثلاً از گلوکز بین دو پلاریزور و آنالیزور عمود برهم قرار گیرد، آنالیزور روشن می‌شود، یعنی سطح پلاریزاسیون نور چرخیده است. مقدار زاویه چرخش متناسب است با غلظت جسم فعال و طولی از محلول که نور پلاریزه از آن گذشته است. اگر غلظت را با  $\frac{m}{V}$  و طول محلول را با  $l$  و زاویه چرخش را با  $\alpha$  و ضریب تناسب را با  $P$  نشان دهیم داریم

$$\alpha = P.L.\frac{m}{V}$$

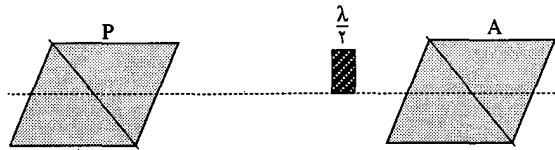
ضریب  $P$  توانایی چرخانایی نام دارد. بنابر تعریف، ضریب دورانی ویژه، عبارت است از زاویه‌ای که ارتعاش پلاریزه خطی با طول موج  $5893\text{\AA}$  (طول موج متوسط سدیم) ضمن عبور از ستونی از محلول به طول  $10$  سانتیمتر و به غلظت یک گرم بر سانتیمتر مکعب می‌چرخد. اگر محلول، ارتعاش را به‌طور ساعتگرد بگرداند آن را راستگرد و در غیر این صورت آن را چپگرد می‌گویند.

هدف آزمایش: تعیین غلظت محلولهای فعال نوری.

وسایل آزمایش: سویاب (پلاریمتر) - چراغ - لوله‌هایی با طولهای مختلف - استوانه مدرج - ترازو - آب مقطر - گلوکز.

شرح دستگاه - پلاریمتر تشکیل شده است از یک لوله که در یک طرف آن پلاریزور و در طرف دیگرش آنالیزور قرار دارد. به آنالیزور یک تیغه نیم موج متصل است، به‌طوری‌که نوری که از پلاریزور وارد آنالیزور می‌شود یک قسمت وارد تیغه نیم موج می‌شود و سپس از آنالیزور می‌گذرد، اما قسمت دیگر مستقیماً وارد آنالیزور می‌شود (آنالیزور نیمسایه). آنالیزور، تیغه نیم موج، و چشمی متصل به آن باهم می‌توانند روی یک صفحه مدرج حرکت کنند (شکل ۵ - ۷۳).

فرض می‌کنیم جهت ارتعاش پلاریزور و آنالیزور و محورهای  $x$  و  $y$  تیغه مطابق شکل ۵ - ۷۴ باشد. برای آن قسمت از پرتوهایی که وارد تیغه نیم موج نمی‌شوند تصویر  $P$  روی آنالیزور برابر  $p$  است.



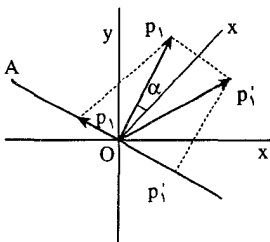
شکل ۵-۷۳

اما آن پرتوهایی که از تیغه نیم موج عبور می کنند ارتعاش  $P$  به  $P'$  تبدیل می شود یعنی نسبت به  $x$  قرینه می شود و تصویر آن روی آنالیزور  $P'$  است. در نتیجه در میدان دید دو نیمدایره با شدتهای مختلف مشاهده می شود. حال اگر آنالیزور را بچرخانیم تا محور  $ox$  بر امتداد  $P$  واقع شود، در این حالت دو تصویر  $p$  و  $p'$  مساوی خواهند شد و میدان دید، یکنواخت دیده می شود. زیرا در این حالت قرینه  $P$  یعنی  $P'$  بر خودش منطبق است. از این وضعیت به عنوان نقطه صفر دستگاه استفاده می شود (شکل ۵-۷۵).

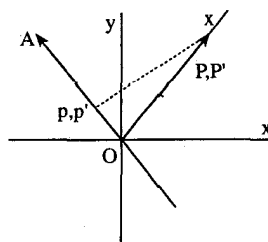
حال اگر یک محلول فعال نوری را بین پلاریزور و آنالیزور قرار دهیم، ارتعاش  $P$  به اندازه  $\alpha$  می چرخد و  $P$  به وضع  $P_\alpha$  درمی آید. در این صورت قرینه آن  $P'_\alpha$  می شود و دیگر دو تصویر  $p_\alpha$  و  $p'_\alpha$  باهم برابر نیستند (شکل ۵-۷۶). برای اینکه دو تصویر برابر شوند باید آنالیزور و تیغه متصل به آن را به اندازه زاویه  $\alpha$  در همان جهت چرخش  $P$  بگردانیم تا محور  $ox$  بر  $P_\alpha$  منطبق شود. به این ترتیب چرخش آنالیزور برای ایجاد یکنواختی مجدد، زاویه چرخش  $\alpha$  را به دست می دهد.

روش آزمایش ۲: گرم گلوکز را با ترازو وزن کنید و در استوانه مدرج بریزید و آن قدر آب مقطر به آن اضافه کنید تا حجم آن به ۲۰ سانتیمترمکعب برسد. موقع ریختن آب، محلول را به هم بزنید تا گلوکز کاملاً در آب حل شود. به این وسیله محلول ۱۰٪ به دست می آید.

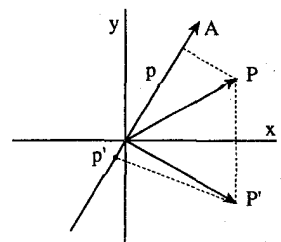
لوله محتوی آب خالص را روی دستگاه پلاریمتر قرار دهید. دو قسمت کم نور و پر نور میدان را مشاهده کنید. آنالیزور را بچرخانید تا میدان یکنواخت شود. درجه را یادداشت کنید. لوله آب خالص را بردارید و لوله محتوی گلوکز را به جای آن قرار دهید. روشنایی دو نیمه فرق می کند. آنالیزور را بچرخانید



شکل ۵-۷۶



شکل ۵-۷۵



شکل ۵-۷۴

و شدت دو نیمه را یکسان کنید و درجه چرخش را بخوانید. این عمل را برای محلولهایی با غلظتهای مختلف انجام دهید و جدول زیر را کامل کنید.

P	m/v	l	$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$	$\alpha_2$	$\alpha_1$	ترتیب آزمایش

حال با معلوم بودن توان چرخانایی P غلظت محلول مجهول را به دست آورید.

# ۶ حرارت

## آزمایش ۵۱ — گرماسنجی (کالریمتری)

### مقدمه

گرمای نوعی انرژی است. انرژی گرمایی یک جسم عبارت است از مجموع انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل مولکولها و اتمها و الکترونهای موجود در آن جسم. در گرماسنجی مقدار انرژی را نمی‌توان مشخص کرد بلکه تغییرات انرژی گرمایی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

موقعی که چند جسم سرد و گرم در مجاورت یکدیگر قرار گیرند، اجسام گرم انرژی گرمایی می‌دهند و اجسام سرد انرژی گرمایی می‌گیرند تا دمای همه آنها یکسان شود که به آن دمای تعادل گویند. مقدار گرمایی که اجسام گرم می‌دهند برابر مقدار گرمایی است که اجسام سرد می‌گیرند.

مقدار گرمای لازم، برای تغییر دمای چند جسم مختلف به یک اندازه، بستگی به جنس جسم دارد و برای همه آنها یکسان نیست. اگر گرمای لازم برای اینکه  $m$  گرم جسم از دمای  $t_1$  به  $t_2$  برسد به اندازه  $Q$  باشد، اختلاف دما  $\Delta t = t_2 - t_1$  است و نسبت  $\frac{Q}{\Delta t}$  را ظرفیت گرمایی گویند.

ظرفیت گرمایی واحد جرم هر جسم را، ظرفیت حرارتی مخصوص یا گرمای ویژه می‌نامند. بنابراین  $c = \frac{Q}{m\Delta t}$ ، یا به عبارت دیگر، گرمای ویژه هر جسم، مقدار گرمایی است که یک گرم جسم می‌گیرد تا دمایش یک درجه تغییر کند. گرمای ویژه آب را واحد گرما قرار داده‌اند و به آن کالری می‌گویند. بنابراین کالری مقدار گرمایی است که یک گرم آب می‌گیرد تا دمای آن یک درجه سلسیوس تغییر کند (به‌طور دقیقتر، دمای آب باید از  $14.5^\circ\text{C}$  به  $15.5^\circ\text{C}$  برسد).  $1000$  کالری، یک کیلوکالری و  $10^6$  کالری برابر یک ترمی است. B.T.U. مقدار گرمایی است که دمای یک پوند آب را یک درجه فارنهایت تغییر دهد (از  $58$  درجه فارنهایت به  $59$  درجه).

هنگام اندازه‌گیری کمیت‌های گرمایی به وسیله گرماسنج، مقداری انرژی گرمایی که توسط گرماسنج مبادله می‌شود مربوط به ظرف گرماسنج، به هم‌زن و دماسنج است. هرچه اختلاف دمای اولیه و ثانویه بیشتر باشد، این مقدار انرژی نیز بیشتر خواهد بود. در هر حال ظرفیت گرمایی گرماسنج حتماً باید در محاسبات مربوطه منظور شود.

ظرفیت گرمایی یا ارزش آبی گرماسنج را با A نشان می‌دهند و مقدار آن از رابطه زیر به دست می‌آید

$$A = \sum m_i c_i \text{ cal/C}^\circ$$

هدف آزمایش: تعیین ارزش آبی گرماسنج و اندازه‌گیری گرمای ویژه اجسام جامد و مایع

وسایل آزمایش: گرماسنج - دماسنج - چراغ گاز یا اجاق برقی - سه پایه - توری - پارافین - نمونه

فلزی

آزمایش الف) تعیین ظرفیت گرمایی (ارزش آبی) گرماسنج

روش آزمایش -  $M_1$  جرم گرماسنج را توسط ترازو به دست آورید. مقداری آب داخل گرماسنج بریزید و با توزین مجدد  $M_2$  جرم آن را تعیین کنید. جرم آب داخل گرماسنج  $M = M_2 - M_1$  خواهد بود. با دماسنج  $t_1$  دمای اولیه گرماسنج و اشیای داخل آن را اندازه‌گیری کنید و سپس در ظرفی مقداری آب را جوشانده و  $T_1$  دمای آب جوش را اندازه بگیرید و آن را داخل گرماسنج بریزید و به هم بزنید.  $t_2$  دمای تعادل را یادداشت کنید. گرماسنج را بار دیگر وزن کنید و  $M_2$  جرم آن را به دست آورید. جرم آب جوش  $m = M_2 - M_1$  است

آب جوش گرما داده است و ظرف و آب داخل آن و دماسنج و به هم زن گرما گرفته‌اند. طبق اصل تعادل حرارتی، می‌توان نوشت

$$Mc(t_f - t_1) + m_1 c_1 (t_f - t_1) + m_2 c_2 (t_f - t_1) + m_3 c_3 (t_f - t_1)$$

گرمایی که آب داخل	گرمایی که ظرف گرماسنج	گرمایی که به هم زن	گرمایی که دماسنج
گرماسنج گرفته است	گرفته است	گرفته است	گرفته است

$$= mc(T_1 - t_f)$$

گرمایی که آب جوش داده است

یا

$$(Mc + \underbrace{m_1 c_1 + m_2 c_2 + m_3 c_3}_{\text{مقداری است ثابت}})(t_f - t_1) = mc(T_1 - t_f)$$

ارزش آبی ظرف و دماسنج و به هم زن را مجموعاً ارزش آبی گرماسنج گویند و با حرف A نمایش می‌دهند. بنابراین

$$(Mc + A)(t_f - t_1) = mc(T_1 - t_f)$$

با جایگزینی اعداد حاصل از آزمایش در رابطه بالا، ارزش آبی گرماسنج را به دست آورید.

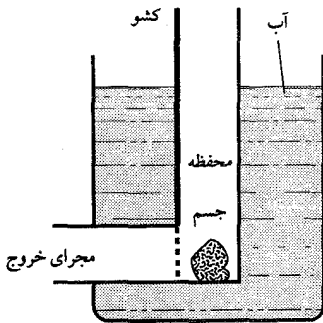
A ارزش آبی گرماسنج	m جرم آب جوش	$t_p$ دمای تعادل	T دمای آب جوش	$t_1$ دمای اولیه گرماسنج	M جرم آب داخل گرماسنج

### آزمایش ب) تعیین گرمای ویژه جامدات

روش آزمایش - آزمایش را مانند آزمایشی که برای تعیین ارزش آبی گرماسنج انجام دادید تکرار کنید با این تفاوت که جسم مورد نظر را داخل آب جوش قرار دهید و مدتی آن را بجوشانید تا دمای اولیه آن با دمای آب جوش یکسان شود. سپس آن را از آب جوش خارج و به سرعت خشک کنید و داخل گرماسنج بیندازید. با به هم زدن به آرامی به هم بزنید و دمای تعادل را بخوانید. در رابطه زیر

$$(Mc + A)(t_p - t_1) = mc'(T - t_p)$$

m جرم جسم است که با ترازو به دست می آید و با اندازه گیری سایر کمیتها مقدار  $c'$  گرمای ویژه جسم مورد نظر را به دست آورید.



شکل ۱-۶

تذکر - نظر به اینکه موقع خروج جسم از داخل آب جوش تا زمانی که خشک و به گرماسنج وارد شود مقداری گرما تلف می شود و دمای آن تنزل می کند، در آزمایشگاه آن را در محفظه ای که درون ظرفی قرار گرفته است می اندازند - مقطع ظرف در شکل ۶ - ۱ نشان داده شده است. ظرف و آب داخل آن را گرم می کنند. پس از مدتی که دمای جسم با دمای آب جوش یکسان شد کشورا به طرف بالا می لغزانند و مستقیماً جسم را وارد گرماسنج می کنند. این عمل به سرعت انجام می گیرد و از اتلاف گرما جلوگیری می شود.

c' گرمای ویژه فلز	A ارزش آبی گرماسنج	m جرم جسم	$t_p$ دمای تعادل	T دمای اولیه فلز	$t_1$ دمای اولیه گرماسنج	c گرمای ویژه آب	M جرم آب

### آزمایش پ) تعیین گرمای ویژه مایعات

روش آزمایش - آزمایش نظیر آزمایش قبل است، فقط به جای آب داخل گرماسنج مایع مورد نظر را بریزید. در رابطه

$$(Mc + A)(t_p - t_1) = mc'(T - t_p)$$

$M$  جرم مایع مورد نظر و  $c$  گرمای ویژه نامعلوم آن است.  $m$  جرم فلز گرم شده و  $c'$  گرمای ویژه آن است. در این آزمایش به جای فلز گرم شده می‌توان از آب جوش به عنوان جسم گرماده استفاده کرد.

$m$ جرم فلز	$c'$ گرمای ویژه فلز	$T$ دمای اولیه فلز	$M$ جرم آب	$A$ ارزش آبی گرماسنج	$t_1$ دمای اولیه گرماسنج	$t_p$ دمای تعادل	$c$ گرمای ویژه مایع

### پرسشها

۱- در آزمایشهای گرماسنجی برای دقت بیشتر معمولاً دمای آب اولیه داخل گرماسنج کمی بیشتر یا کمتر از دمای محیط است. در چه صورت دما را کمتر و در چه حالتی دما را بیشتر انتخاب می‌کنند؟ چرا؟

۲- ظرفیت حرارتی با ظرفیت حرارتی ویژه چه تفاوتی دارد؟

## آزمایش ۵۲ ————— تغییر حالت یک جسم خالص

### مقدمه

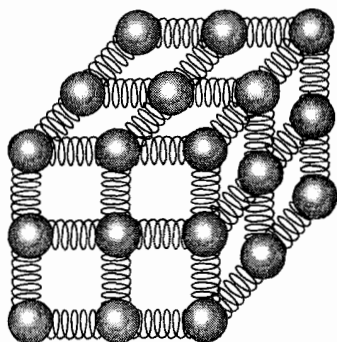
یک جسم خالص بسته به شرایطی که بر آن حکمفرماست می‌تواند به صورتهای مختلف جامد، مایع یا بخار ظاهر شود.

از نقطه‌نظر ترمودینامیک حالت یک جسم در وضع تعادل می‌تواند به وسیله سه متغیر فشار  $P$  و حجم  $V$  و دمای  $T$  مشخص شود. بین این سه متغیر روابطی وجود دارد که برای هر حالت جسم با دانستن دو متغیر، سومی به دست می‌آید. اگر شرایط تعادل عوض شود جسم ممکن است از یک حالت به حالت دیگر تبدیل شود (شکل ۶-۲).

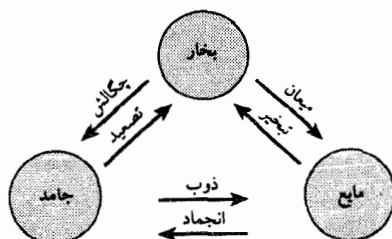
اگر جسمی به یکی از این سه صورت باشد می‌توان دو متغیر از سه متغیر را به دلخواه در محدوده وسیعی تغییر داد. در صورتی که دو حالت جسم در وضع تعادل باهم وجود داشته باشند با معلوم بودن یک متغیر، دیگری مشخص می‌شود و تغییر آن اختیاری نیست. اگر سه حالت جسم باهم وجود داشته و در وضعیت تعادل باشند سه متغیر  $P$  و  $V$  و  $T$  ثابت می‌شوند و آن را نقطه سه‌گانه می‌نامند.

۱- ذوب. ذوب عبارت از تغییر شکل جسم جامد به مایع است. جسم وقتی به حالت جامد است که اتمهای آن وضعیت ثابتی را در فضا اشغال کنند. موقعیت اتمها مشخص کننده گره‌ها در شبکه بلوری است. مثلاً در نمک طعام اتمها در رأس مکعبها به‌طور مشابه قرار می‌گیرند (شکل ۶-۳).

اتمها و یونهای یک بلور بر یکدیگر نیروهای الکتریکی و مغناطیسی وارد و وضعیت خود را تثبیت می‌کنند. این نیروها را می‌توان به فنر تشبیه کرد. اتمها وضعیت مشخصی دارند ولی می‌توانند حول وضع تعادلی خود حرکت نوسانی انجام دهند و انرژی داخلی یک جسم جامد اساساً همین انرژی ارتعاشی اتمهای آن است.



شکل ۳-۶



شکل ۲-۶



با افزایش دما، دامنه و در نتیجه انرژی متوسط ارتعاشی افزایش می‌یابد و در دمای معینی که به آن دمای ذوب می‌گویند مولکولها با دریافت انرژی زیاد از وضع قبلی خود خارج می‌شوند و به حالت مایع درمی‌آیند. اختلاف اساسی بین حالت جامد و مایع این نیست که فاصله بین مولکولهای مجاور تغییر می‌کند بلکه اختلاف برسر این است که مولکولهای جسم در حالت مایع به علت دارا بودن انرژی جنبشی قابل ملاحظه می‌توانند پیوسته نسبت به یکدیگر در حرکت باشند. این حرکت را حرکت براونی می‌گویند که کاملاً نامنظم است.

گرمای نهان ذوب مقدار گرمایی است که باید به یک گرم جسم جامد داد تا بدون بالا رفتن دما در فشار ثابت به حالت مایع درآید. در این مرحله تا ذوب شدن تمام قطعات جسم جامد، دما تغییر نمی‌کند.

۲- تبخیر. در شرایط معمولی مایع با بخار در حال تعادل است. در یک ظرف بسته فشار بخار در دمای مفروضی کاملاً معلوم است. در یک مایع مولکولها تحت اثر مولکولهای مجاورند و متوسط نیروی وارد بر آنها صفر است زیرا از همه جهت بر آنها نیروی مساوی وارد می‌شود. انرژی جنبشی متوسط مولکولها نیز مانند یکدیگر است و اندازه آن در حد وسیعی به فشار بستگی ندارد بلکه به دما مربوط است. برایند نیروهای وارد بر مولکولهای موجود در سطح مایع به طرف داخل مایع است. این مولکولها تحت اثر کشش سطحی اند و در برابر مولکولهای داخل مایع مانند یک سطح بازتاب‌دهنده عمل می‌کنند. وقتی مولکولی به این سطح برخورد کند واکنش سطح باعث تغییر جهت سرعت آن می‌شود و آن را به داخل می‌راند. چون سرعت همه مولکولها مشابه نیست بعضی از آنها قادر می‌شوند که باوجود واکنش سطح از آن عبور کنند و به صورت بخار درآیند. پدیده‌ای است که با بالا رفتن دما، انرژی جنبشی مولکولها زیاد می‌شود و عمل نحر با سرعت بیشتری انجام می‌گیرد.

از طرف دیگر مولکولهای بخار که به سطح مایع برخورد می‌کنند به داخل آن وارد می‌شوند و به حالت مایع در می‌آیند. در یک دمای معین مقدار مولکولهایی از بخار که در واحد زمان از واحد سطح داخل مایع می‌شوند بستگی به فشار بخار دارد.

اگر مایع زیر سربوشی خالی از هوا قرار گیرد شروع به بخار شدن می‌کند و سرعت تبخیر به دمای مایع بستگی دارد. در اثر بخار شدن بر فشار بخار افزوده می‌شود و این افزایش فشار تا به آنجا ادامه می‌یابد که تعداد مولکولهای بخار که از سطح مایع خارج می‌شود با تعدادی که وارد مایع می‌شود برابر شود.

در اثر افزایش دما، در شرایطی که فشار بخار مایع، معادل فشار جو باشد مشاهده می‌شود که حبابهایی از بخار مایع به سمت بالا حرکت می‌کنند. این پدیده را جوش می‌گویند. در تمام مدت جوش، دمای مایع ثابت می‌ماند و گرمای دریافتی باعث ازدیاد انرژی داخلی و تبدیل مایع به بخار می‌شود. مقدار گرمای لازم برای تغییر حالت واحد جرم مایع در دمای ثابت، گرمای تبخیر نام دارد و آن را با  $L_v$  نشان می‌دهند.

## آزمایش الف) بررسی پدیده ذوب

وسایل آزمایش: دو لوله آزمایش کوچک و بزرگ داخل هم که به عنوان ظرف دوجداره به کار

می رود - بشر - نفتالین - چوب پنبه - دماسنج - منبع حرارتی.

روش آزمایش - لوله آزمایش کوچک را داخل لوله آزمایش

بزرگتر قرار دهید. برای اینکه به یکدیگر نجسبند می توانید از ۲ یا ۳

حلقه لاستیکی مناسب بین آنها استفاده کنید. داخل لوله کوچکتر،

نفتالین بریزید و دهانه لوله را با چوب پنبه ای مسدود کنید و دماسنج

را از چوب پنبه عبور دهید. مطابق شکل ۶-۴ لوله ها را داخل بشر

پراز آبی بگذارید و آب را به آرامی گرم کنید. گرما به طور یکنواخت

به همه قسمت های نفتالین می رسد. دقیقه ای یک بار دمای نفتالین

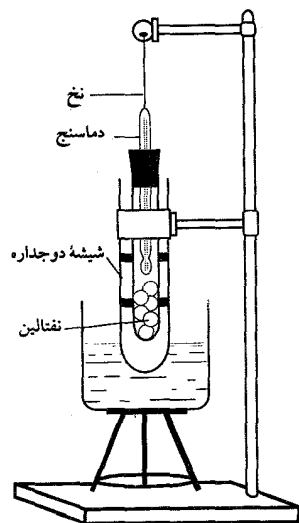
را یادداشت کنید. دما به تدریج بالا می رود تا قطره ای نفتالین مایع

ظاهر شود. پس از آن دما ثابت می ماند تا اینکه کلیه نفتالین تبدیل

به مایع شود. پس از آن مجدداً دمای نفتالین مایع افزایش می یابد.

پس از مدتی نفتالین را از منبع حرارتی دور کنید و بگذارید تا سرد

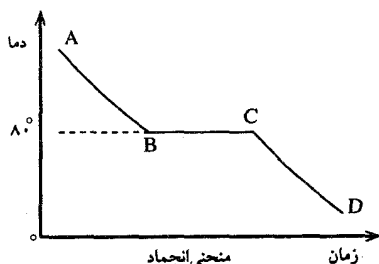
شود. دمای نفتالین را موقع انجماد نیز دقیقه به دقیقه یادداشت کنید.



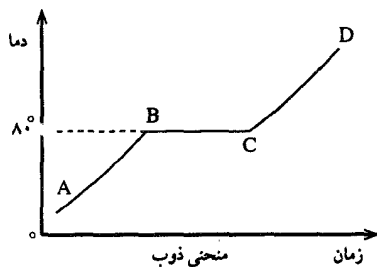
شکل ۴-۶

منحنی های ذوب (دما برحسب زمان یا در حقیقت گرمای دریافتی) و انجماد را رسم کنید،

نقطه های ذوب و انجماد را به دست آورید و آنها را با یکدیگر مقایسه کنید (شکلهای ۶-۵ و ۶-۶).



شکل ۶-۶



شکل ۵-۶

## آزمایش ب) اندازه گیری گرمای نهان ذوب

وسایل آزمایش: گرماسنج - دماسنج - ترازو - سه پایه - توری - بشر - یخ - کاغذ خشک کن - منبع

حرارتی.

روش آزمایش - گرماسنج را وزن کنید و در آن مقداری آب بریزید و با وزن کردن مجدد جرم آب

را به دست آورید (M). دماسنج را در گرماسنج قرار دهید و دمای مشترک گرماسنج و آب داخل آن را

یادداشت کنید ( $t_1$ ) . چند قطعه کوچک یخ را در بشر محتوی آب بیندازید و پس از مدتی که آب و یخ در حال تعادل قرار گرفتند (صفر درجه) ، یک قطعه یخ را بردارید و آن را خشک کنید به طوری که قطرات آب روی یخ باقی نماند . یخ را فوری داخل گرماسنج بیندازید و به هم بزنید تا یخ کاملاً ذوب و تعادل حرارتی برقرار شود . سطح جیوه دماسنج پایین می رود و در یک نقطه که دمای تعادل ( $t_2$ ) را نشان می دهد متوقف می شود . یک بار دیگر گرماسنج را وزن کنید ، اضافه وزن آن جرم یخ ( $m$ ) را نشان می دهد . با فرض اینکه درون گرماسنج محیطی منزوی است ، مقدار انرژی گرمایی که گرماسنج و محتویات آن داده اند برابر است با  $Q_1 = (Mc + A)(t_1 - t_2)$  . این انرژی گرمایی را یخ می گیرد و دو مرحله را می گذراند . در مرحله اول تغییر حالت می دهد و از یخ صفر درجه به آب صفر درجه تبدیل می شود ، و در مرحله دوم یخ ذوب شده تغییر دما می دهد و از صفر درجه به دمای تعادل می رسد . بنابراین

$$Q_2 = mL_f + mc(t_2 - t_3)$$

از برابری این دو مقدار نتیجه می شود

$$(Mc + A)(t_1 - t_2) = mL_f + mc(t_2 - t_3)$$

مقادیر حاصل از آزمایش و نتیجه محاسبات را در جدول زیر یادداشت کنید .

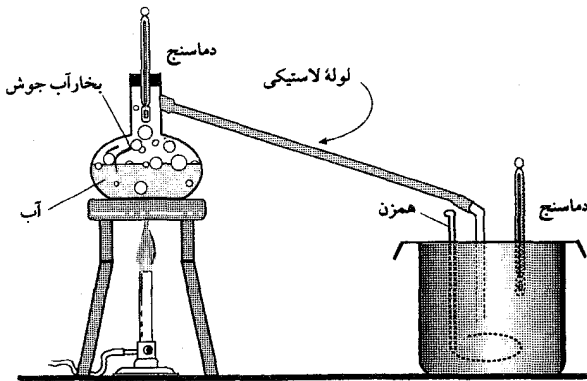
میانگین $L_f$	$L_f$	$m$	$t_2$	$t_1$	$A$	$M$	ترتیب آزمایش

### آزمایش پ) اندازه گیری گرمای تبخیر آب

وسایل آزمایش : گرماسنج - بالن - دماسنج - سه پایه - توری - منبع حرارتی - لوله لاستیکی - ترازو  
روش آزمایش : گرماسنج را وزن کنید و مقداری آب داخل آن بریزید و مجدداً وزن کنید . تفاضل این دو مقدار ( $M$ ) جرم آب اولیه داخل گرماسنج است .  $t_1$  دمای اولیه گرماسنج و آب داخل آن را یادداشت کنید .

در بالن مقداری آب بریزید و آن را روی منبع حرارتی قرار دهید و گرم کنید تا آب بجوشد . بگذارید تا مقداری بخار آب از داخل لوله لاستیکی عبور کند و وارد فضا شود . به این ترتیب دمای لوله لاستیکی تا نقطه جوش آب گرم می شود . در این موقع لوله لاستیکی را به گرماسنج مربوط کنید به طوری که بخار آب داخل گرماسنج شود . پس از ورود در حدود ۱۰ گرم بخار به گرماسنج ، جریان ورود بخار را قطع کنید (شکل ۶ - ۷) . پس از برقراری تعادل حرارتی ، دمای تعادل را یادداشت کنید .

در این عمل ، بخار آب جوش ، در دو مرحله گرما می دهد . در مرحله اول ، بخار بدون تغییر دما تبدیل به مایع می شود و سپس دمای مایع کم می شود و از نقطه جوش به دمای تعادل می رسد .



شکل ۷-۶

گرماسنج و آب داخل آن گرما می‌گیرند و از دمای  $t_1$  به دمای تعادل  $t_p$  می‌رسند بنابراین

$$(M + A)(t_p - t_1) = mL_v + mc(T - t_p)$$

در این رابطه  $m$  جرم بخاری است که وارد گرماسنج شده ،  $L_v$  گرمای تبخیر ،  $T$  دمای آب جوش ،  $M$  جرم آب اولیه داخل گرماسنج ،  $A$  ظرفیت گرمایی گرماسنج ،  $t_1$  دمای اولیه آب گرماسنج و  $t_p$  دمای ثانوی گرماسنج و محتویات آن است . پس از خاتمه آزمایش ، گرماسنج را وزن کنید ، اضافه وزن حاصل ، جرم بخار است .

مقادیر حاصل از آزمایش و نتیجه محاسبات را در جدول زیر یادداشت کنید

میانگین $L$	$L$	$m$	$T$	$t_p$	$t_1$	$A$	$M$	ترتیب آزمایش

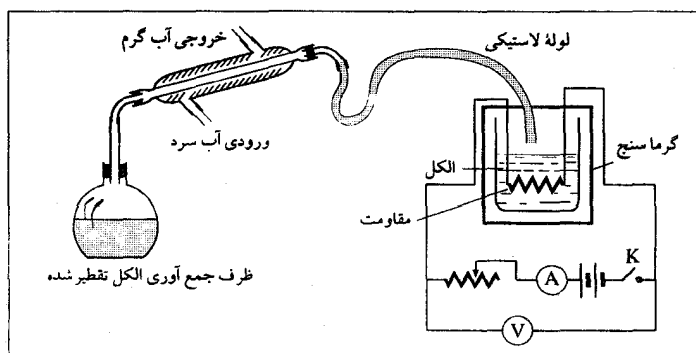
آزمایش (ت) اندازه‌گیری گرمای تبخیر آب به روش الکتریکی

وسایل آزمایش: گرماسنج - ولتسنج - آمپرسنج - دماسنج - منبع تغذیه - مقاومت الکتریکی - لوله سردکننده - بالن - لوله لاستیکی - کلید قطع و وصل - الکل - گرماسنج .

روش آزمایش: مدار را مطابق شکل ببندید و دستگاه را تنظیم کنید . کلید  $K$  را متصل کنید و با تغییر روستا مقدار شدت جریان را به اندازه مجاز برسانید . گرمای حاصل در مقاومت ، دمای الکل درون گرماسنج را بالا می‌برد و به نقطه جوش می‌رساند ، الکل تبخیر و وارد لوله سردکننده می‌شود . جریان آب سرد در لوله سردکننده از اطراف لوله محتوی بخار الکل می‌گذرد و آن را سرد می‌کند و باعث تقطیر الکل می‌شود . الکل تقطیر شده وارد ظرف جمع‌آوری الکل می‌شود (شکل ۷-۶) .

موقعی که اولین قطره مایع وارد ظرف جمع‌آوری الکل شد. زمانسنج را به‌کار بیندازید و پس از ۱۰ دقیقه کلید را قطع کنید. اختلاف پتانسیل دوسر مقاومت و شدت جریانی را که از آن می‌گذرد یادداشت کنید و  $M$  جرم الکل جمع‌آوری شده را به‌دست آورید. از تقسیم جرم بر زمان،  $m$  مقدار جرم در واحد زمان را برحسب کیلوگرم بر ثانیه پیدا کنید. آزمایش را تکرار کنید و به‌وسیله تغییر رثوستا، مقادیر متفاوتی برای شدت جریان و اختلاف پتانسیل به‌دست آورید و در جدول زیر بنویسید.

جرم در واحد زمان $m = \frac{M}{t}$	$t$	$P = VI$	$I$	$V$	ترتیب آزمایش



شکل ۸-۶

اگر مقدار گرمای تلف شده در دستگاه در واحد زمان را با  $Q$  نشان دهیم، برای دومرتبه آزمایش می‌توان نوشت

$$P = mL + Q$$

$$P' = m'L + Q$$

از تفاضل این دو مقدار نتیجه می‌شود

$$L = \frac{P - P'}{m - m'}$$

با توجه به جدول، منحنی نمایش تغییرات توان را برحسب جرم الکل تقطیر شده در واحد زمان رسم کنید. شیب خط گرمای نهان تبخیر را مشخص می‌کند. خط را امتداد دهید تا محور توان را قطع کند. فاصله نقطه تقاطع تا مبدأ مختصات مقدار حرارت تلف شده  $Q$  را تعیین می‌کند.

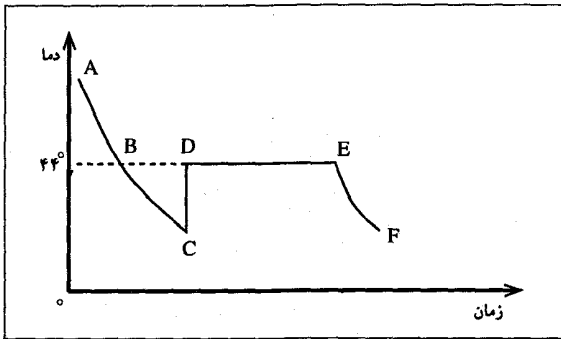
## پرسشها

۱- مقادیر گرمای نهان ذوب یخ و گرمای تبخیر آب را در  $100^\circ$  درجه سلسیوس در SI محاسبه کنید.

۲- تفاوت تبخیر، جوش و تصعید در چیست؟

۳- میعان چیست؟

۴- هنگام انجماد فسفر، منحنی به صورت شکل ۶-۹ درآمده است. با توجه به اینکه نقطه ذوب فسفر  $44^\circ$  درجه است علت این را که منحنی به این شکل رسم شده است شرح دهید.



شکل ۶-۹

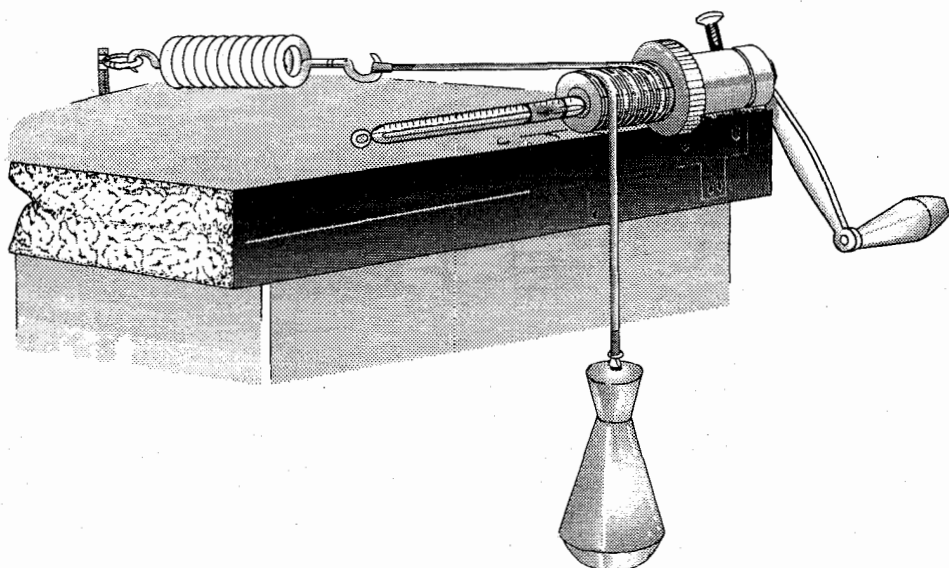
# آزمایش ۵۳ ===== معادل مکانیکی گرما

## مقدمه

هریک از شکلهای انرژی به شکل دیگر قابل تبدیل است. انرژی مکانیکی و الکتریکی معمولاً به ژول و انرژی گرمایی به کالری بیان می‌شوند. جهت تبدیل این دو به یکدیگر از رابطه  $W = JQ$  استفاده می‌شود. مقدار  $J = 4/18$  معادل مکانیکی گرما نام دارد. به وسیله اندازه‌گیری مقدار کار انجام شده و گرمای تولید شده در یک دستگاه تبدیل انرژی، می‌توان مقدار  $J$  را به دست آورد.

## آزمایش الف) تعیین معادل مکانیکی گرما به روش مکانیکی

دستگاه مطابق شکل ۶-۱۰ تشکیل شده است از استوانه‌ای فلزی که محور آن به دسته‌ای مربوط است و توسط آن می‌توان استوانه را چرخاند. دور استوانه یک نوار مسی پیچیده می‌شود که به وزنه‌ای به وزن  $w$  منتهی می‌شود. اگر دسته بچرخد در هر دور، تغییر مکان وزنه  $2\pi r$  و در  $n$  دور برابر  $2\pi nr$  است. با بالا آمدن وزنه، کاری که انجام می‌گیرد برابر  $2\pi nrw$  است. نیروی اصطکاک بین نوار مسی و استوانه فلزی مانع بالا آمدن وزنه می‌شود و در ضمن استوانه گرم می‌شود. در انتهای استوانه فلزی و در قاعده آن حفره‌ای پر از آب قرار دارد که دماسنجی در آن کار گذاشته شده است. در ابتدای آزمایش دما  $t_1$  و پس از  $n$  دور چرخش دما  $t_2$  است. در نتیجه حرارت حاصل



شکل ۶-۱۰

$(Mc + mc')(t_p - t_1)$  است که در آن  $M$  و  $c$  به ترتیب جرم و گرمای ویژه آب و  $m$  و  $c'$  جرم و گرمای ویژه فلزند. بنابراین

$$2\pi r n w = j(Mc + mc')(t_p - t_1)$$

یا

$$j = \frac{2\pi r n w}{(Mc + mc')(t_p - t_1)}$$

دستگاه هنگام آزمایش مقداری گرما به محیط خارج می‌دهد و در نتیجه در آخر آزمایش دمایی که خوانده می‌شود کمتر از دمای حقیقی است. برای دقت عمل بیشتر باید  $\Delta t$  تفاوت این دو را پیدا کرد و به دمای خوانده شده افزود تا دمای واقعی به دست آید. برای این کار زمان انجام آزمایش یعنی زمانی را که طول می‌کشد تا دستگاه از دمای  $t_1$  به  $t_p$  برسد یادداشت کنید و سپس دستگاه را به حال خود بگذارید تا گرما از دست بدهد. چون شرایط محیط تغییر نکرده است، در همان زمان به اندازه  $\Delta t$  خنکتر می‌شود. در این صورت با دقت نسبتاً خوبی  $\Delta t$  قابل اندازه‌گیری است. در بعضی از دستگاهها، دور شماری توسط چرخ دندانه‌داری که به استوانه مربوط است، تعداد دورهای چرخانده شده را نشان می‌دهد. در غیراین صورت باید هنگام آزمایش، تعداد دورهایی که دسته چرخانده می‌شود، شمرده.

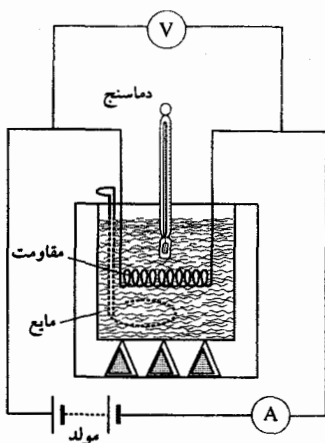
**روش آزمایش** - با کولیس شعاع استوانه را اندازه بگیرید.  $w$  وزن و  $W$  وزنه آویخته شده و  $m$  جرم استوانه فلزی را به دست آورید. در حفره آب بریزید و مجدداً  $m'$  جرم استوانه را تعیین کنید. تفاضل  $m' - m = M$  جرم آب خواهد بود. دستگاه را سوار کنید و مدتی صبر کنید تا دمای آب با دمای استوانه یکسان شود، سپس  $t_1$  دمای اولیه را یادداشت کنید.  $n = 100$  دور دسته را بچرخانید و فوری  $t_p$  دمای ثانویه را بخوانید.  $T$  زمانی را که دستگاه از دمای  $t_1$  به  $t_p$  رسیده است تعیین کنید و به همان مدت بگذارید که دستگاه سرد شود و  $\Delta t$  تنزل دما را به دست آورید و با  $t_p$  جمع کنید تا دمای ثانویه واقعی به دست آید. نتایج به دست آمده را در جدول زیر یادداشت و مقدار  $z$  را محاسبه کنید.

r	n	w	m	M	$t_1$	$t_p$	$\Delta t$	j

### آزمایش ب) تعیین $z$ به روش الکتریکی

دستگاه گرماسنجی است با ظرفیت گرمایی  $A$ ، که محتوی  $M$  گرم از مایعی به گرمای ویژه  $c$  است. داخل مایع مقاومت الکتریکی  $R$  قرار دارد. دوسر مقاومت را به مولدی وصل می‌کنیم. در مسیر آمپرسنجی به طور متوالی قرار دارد و جریانی را که از مقاومت می‌گذرد نشان می‌دهد. دوسر مقاومت به ولتسنجی متصل شده و اختلاف پتانسیل دوسر مقاومت قابل اندازه‌گیری است. معمولاً از اختلاف پتانسیل ۱۲ ولت استفاده می‌شود که توسط ترانسفورماتوری از برق شهر گرفته می‌شود.





شکل ۱۱-۶

روش آزمایش - مدار را مطابق شکل ۱۱-۶ ببینید. دمای اولیهٔ گرماسنج را توسط دماسنج بخوانید. سرورودی ترانسفورماتور را به پریز برق وصل کنید. چون برق شهر ممکن است هنگام آزمایش تغییراتی داشته باشد، هر سه دقیقه یک بار شدت جریان و اختلاف پتانسیل دوسر مقاومت را یادداشت کنید و در خاتمهٔ آزمایش، میانگین بگیرید. برای عبور جریان، مدت ۲۰ دقیقه کافی است. پس از خواندن دمای ثانویهٔ گرماسنج جریان برق را قطع کنید. مقادیر جرم و گرمای ویژهٔ مایع درون گرماسنج و ظرفیت گرمایی آن را از مربی آزمایشگاه بپرسید و آنها را همراه نتایج حاصل در جدول زیر یادداشت و مقدار  $z$  را محاسبه کنید.

$t_1$	V	I	t	m	c	A	$t_f$	j

انرژی داده شده به گرماسنج

$$W = RI^2t = VIt$$

و گرمای حاصل در گرماسنج برابر است با

$$Q = (Mc + A)(t_f - t_1)$$

$$j = \frac{VIt}{(Mc + A)(t_f - t_1)} \quad \text{بنابراین}$$

روش آزمایش - مدار را مطابق شکل ۱۱-۶ ببینید. دمای

اولیهٔ گرماسنج را توسط دماسنج بخوانید. سرورودی ترانسفورماتور

را به پریز برق وصل کنید. چون برق شهر ممکن است هنگام

آزمایش تغییراتی داشته باشد، هر سه دقیقه یک بار شدت جریان

و اختلاف پتانسیل دوسر مقاومت را یادداشت کنید و در خاتمه

آزمایش، میانگین بگیرید. برای عبور جریان، مدت ۲۰ دقیقه کافی است. پس از خواندن دمای ثانویهٔ

گرماسنج جریان برق را قطع کنید. مقادیر جرم و گرمای ویژهٔ مایع درون گرماسنج و ظرفیت گرمایی آن را

از مربی آزمایشگاه بپرسید و آنها را همراه نتایج حاصل در جدول زیر یادداشت و مقدار  $z$  را محاسبه

کنید.

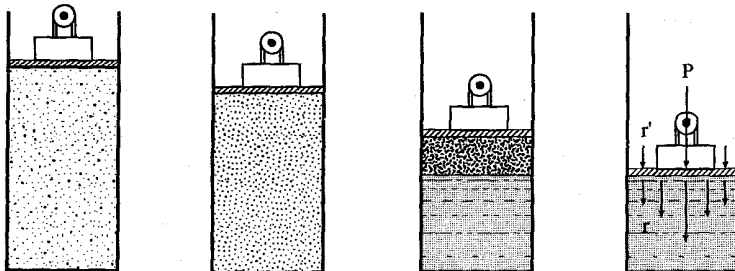
## آزمایش ۵۴ فشار بخار آب

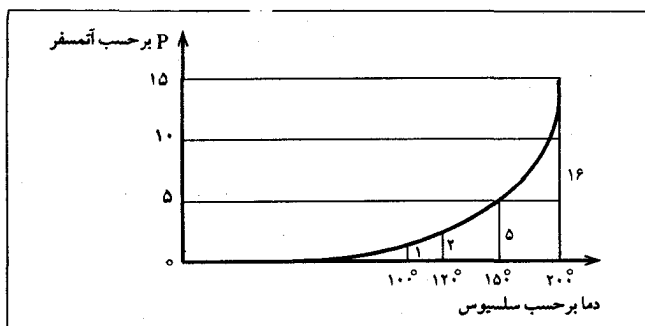
### مقدمه

مایعی را در یک استوانه که به وسیله پیستون وزینی محدود شده است در نظر می‌گیریم (شکل ۶-۱۲). مایع را گرم می‌کنیم، دمای آن بالا می‌رود. فشار مایع برابر فشار هوا به علاوه فشار ناشی از وزن پیستون و وزنه روی آن است. بنابراین فشار مایع همواره ثابت است. در اثر دریافت گرما، دما افزایش می‌یابد ولی تغییر حجم محسوس نیست.

با دریافت گرما، در ابتدا حبابهای کوچک گازی که عبارت از گازهای حل شده در آب است بالا می‌آیند و محو می‌شوند. سپس در انتهای استوانه، حبابهای کوچکی که رفته رفته درشت تر می‌شوند پدید می‌آیند. این حبابها به تدریج از جای خود کنده می‌شوند و به طرف بالا حرکت می‌کنند. در سطح مایع یک لایه بخار جمع می‌شود و پیستون بالا می‌آید. در صورت ادامه دریافت گرما، ذرات مایع، چه در جدار باشند یا در ته ظرف، به بخار تبدیل می‌شوند و پیستون را بیشتر به سمت بالا می‌رانند. اگر گرمای زیادی به مایع داده شود، تبدیل مایع به بخار با سرعت زیادی انجام می‌پذیرد. با زیوروشدن مولکولها، تلاطم و جوش و خروش ویژه‌ای به وجود می‌آید که این پدیده را جوش یا غلیان گویند. غلیان عبارت است از بخار شدن مایع به شکل حبابهایی که در مجاورت جدارهای گرم تشکیل می‌شوند.

تبخیر یک پدیده سطحی است، در صورتی که غلیان در تمام حجم مایع صورت می‌گیرد. قبل از غلیان، همیشه مایع تبخیر می‌شود و سرعت تبخیر با بالا رفتن دما، افزایش می‌یابد. در تمام مدت غلیان، فشار وارد بر جسم ثابت است و گرمای دریافتی فقط صرف تغییر حالت می‌شود. در چنین وضعی، در بخار، ذرات مایع ریزی به حالت تعلیق دیده می‌شود. به این جهت چنین بخاری را، بخار مرطوب اشباع گویند. موقعی که آخرین قطره مایع به بخار تبدیل شد، بخار از صورت مرطوب بودن خارج و خشک می‌شود. پس از آن گرما (در فشار ثابت)، دمای بخار را افزایش می‌دهد که با ازدیاد حجم نیز توأم است. زمانی که بخار در مجاورت مایع خود در حال تعادل است و عمل تبدیل مایع به بخار یا برعکس بخار به مایع ادامه دارد می‌گویند بخار سیر شده یا در حال اشباع است.





شکل ۶-۱۳

غلیان یا تقطیر ممکن است در ضمن تغییر فشار و تغییر دما نیز انجام پذیرد. در فشار ثابت، دما نیز ثابت خواهد بود. در نتیجه به ازای هر دمای معین، فشاری وجود دارد به نام فشار بخار سیر شده نظیر آن دما، به طوری که، در فشار کمتر از آن فقط بخار، بدون اینکه مایعی در مجاورتش باشد، وجود دارد و در آن فشار تبدیل به مایع می شود و در فشار بالاتر بخار وجود نخواهد داشت. به عبارت دیگر، برای جوش یا تقطیر بخار در فشار معین، دمای ثابت معینی وجود دارد که تابع فشار ذکر شده است و در مورد هر شاره یک منحنی می توان رسم کرد که رابطه فشار و دمای اشباع را مشخص می سازد.

در شکل ۶-۱۳، منحنی فشار اشباع بخار آب رسم شده است. ملاحظه می شود که تغییرات فشار اشباع بخار آب تابع نمایی از دماست. یعنی، فشار اشباع که در دمای معمولی نامحسوس و ضعیف است، در دمای بالاتر، شدت می یابد و در دمای ۱۰۰ و ۱۵۰ درجه سلسیوس به بالا به شدت زیاد می شود.

شناسایی فشار ماکسیمم بخار آب اهمیت زیادی دارد. در دمای کم دانستن این فشار در کارهای آزمایشگاهی مانند تعیین وزن یک گاز مرطوب و در امور مربوط به هواشناسی کاربرد دارد. همچنین در دماهای زیاد، دانستن فشار ماکسیمم بخار آب، برای محاسبه طرز عمل ماشینهای بخار مورد نیاز است.

### هدف آزمایش: بررسی فشار بخار آب

وسایل آزمایش: تلمبه تخلیه هوا - سردکننده - ۳ عدد بالن - ساچمه شیشه ای - دماسنج - لوله U شکل - جیوه - خطکش - شیلنگ لاستیکی - چوب پنبه - سه راهی - ۲ عدد شیر بلوری - چند پایه و گیره برای سوار کردن دستگاه.

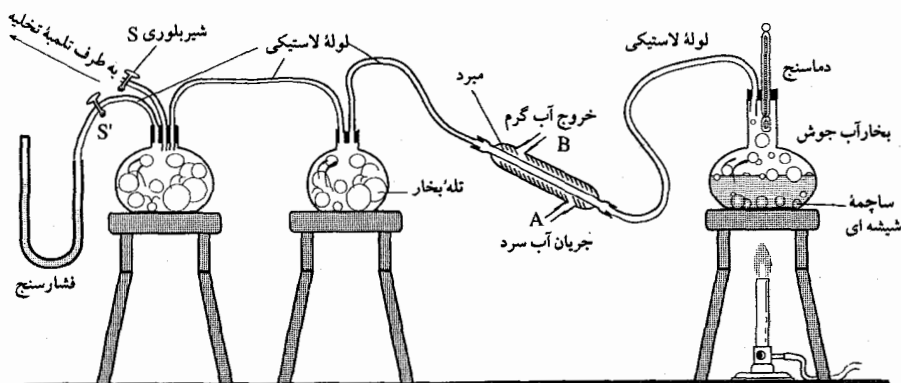
شرح دستگاه - مطابق شکل ۶-۱۴ بالنی که محتوی چند ساچمه شیشه ای است تا نیمه آب دارد و از چوب پنبه آن یک دماسنج و یک لوله لاستیکی عبور کرده است. ساچمه های شیشه ای باعث سهولت غلیان آب بالن می شوند و از پدیده تأخیر در جوش جلوگیری می کنند. لوله لاستیکی بخار آب را به قسمت پایین محفظه سردکننده هدایت می کند. این محفظه که معمولاً آن را به طور مایل یا قائم

سوار می‌کنند عبارت است از لولهٔ ماریپچی که داخل لولهٔ گشادتری قرار گرفته است و آب سرد از پایین وارد لولهٔ گشادتر می‌شود و پس از دریافت گرمای لولهٔ ماریپچی از بالا بیرون می‌رود. بخار آب در سرد کننده بی‌درنگ سرد و تبدیل به مایع می‌شود و به بالن برمی‌گردد. طرف دیگر سردکننده به ظرفی به نام تلهٔ بخار وصل می‌شود تا اگر بخاری از لولهٔ ماریپچی خارج شود از ورود آن به تلمبه جلوگیری کند. از چوب پنبهٔ بالن دیگر، سه لولهٔ خارج می‌شود، یکی مربوط به تلهٔ بخار است و دومی به فشارسنجی متصل است و در سر راه آن شیر  $S'$  را کار گذاشته‌اند. لولهٔ سوم به تلمبهٔ تخلیهٔ هوا وصل می‌شود و بین بالن و تلمبه شیر بلوری  $S$  قرار دارد (شیر بلوری با گریس مخصوصی روغن‌کاری می‌شود تا کاملاً آب‌بندی شود و سد راه نفوذ بخار به خارج باشد). این بالن به منظم بودن فشار کمک می‌کند و از تغییرات جزئی در فشار که اختلالی در فشارسنج ایجاد می‌کند، ممانعت می‌کند. با تلمبهٔ تخلیه فشار به قدر کافی پایین می‌آید و سپس شیر بلوری  $S$  بسته می‌شود. در این صورت فشار داخل بالن برابر است با

$$P = P_a - h$$

در این رابطه  $P_a$  فشار هوای محیط و  $h$  اختلاف ارتفاع جیوه در دو شاخهٔ فشارسنج است. فشارها برحسب سانتیمتر جیوه منظور می‌شوند. دمای بخار در بالن به وسیلهٔ دماسنج اندازه‌گیری می‌شود. اگر موقعی که تلمبه کار نمی‌کند شیر  $S$  باز شود تا هوا داخل دستگاه شود ممکن است آب وارد فشارسنج شود. از این رو شیر  $S'$  با یک سه‌راهی کار گذاشته شده است و برای ورود هوا به دستگاه از آن استفاده می‌شود.

روش آزمایش - شیلنگ  $A$  را به شیر آب لوله‌کشی وصل کنید و شیلنگ  $B$  را به فاضلاب مربوط کنید و بگذارید تا مدتی آب جریان یابد، چون باید دمای آب در سردکننده ثابت باشد. شیر  $S'$  را باز کنید تا سطح جیوه در دو شاخهٔ فشارسنج یکسان شود و فشار داخل و خارج برابر شوند. سپس آب



را بجوشانید . وقتی که آب چند دقیقه‌ای جوشید دمای  $T$  را یادداشت کنید . شیر  $S'$  را ببندید و تلمبه را به‌کار اندازید و شیر  $S$  را باز کنید تا تلمبه هوا را بمکد و فشار داخل به‌اندازه  $5\text{cmHg}$  تغییر کند . دما را یادداشت کنید . همین‌طور آزمایش را ادامه دهید و هر بار فشار را به‌اندازه  $5\text{cmHg}$  تغییر دهید و دما را بخوانید .

روی محور  $x$  دمای بخار و روی محور  $y$  فشار بخار اشباع را منظور کنید و منحنی مربوط را رسم

کنید .

P	
h	

## آزمایش ۵۵ — ضریب انبساط طولی اجسام

### مقدمه

در اثر گرما ابعاد اجسام در جهتهای مختلف افزایش می‌یابد. این افزایش در صورتی که دامنه تغییرات درجه حرارت زیاد نباشد متناسب با درجه حرارت، جنس فلز و طول اولیه فلز مورد نظر است،  
 $\Delta l = \lambda l_0 \Delta t$

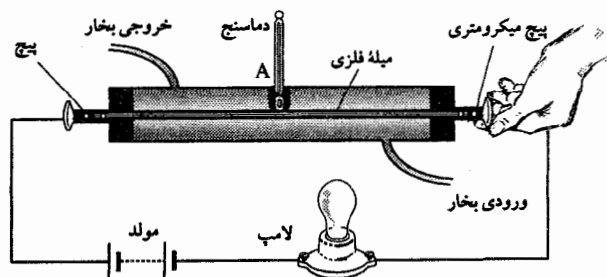
$\lambda$  را ضریب انبساط طولی می‌گویند و عبارت است از ازدیاد طول واحد طول به ازای یک درجه حرارت

$$\lambda = \frac{l_2 - l_1}{l_1 (t_2 - t_1)}$$

هدف آزمایش: اندازه‌گیری ضریب انبساط خطی فلزات

وسایل آزمایش: دستگاه آزمایش انبساط طولی - دماسنج - سه پایه - توری - منبع حرارتی - ظرف تولید بخار.

روش آزمایش - دستگاه اندازه‌گیری ضریب انبساط طولی، شکل ۶-۱۵، لوله‌ای است که از طرفین روی دو پایه فلزی قرار می‌گیرد. در طرفین لوله دو درپوش لاستیکی وجود دارد و از وسط آنها میله مورد نظر عبور می‌کند. دو پیچ در دو طرف و در راستای میله قرار دارند که می‌توانند با میله تماس پیدا کنند. یکی از این پیچها وصل به ریزسنجی است که جابه‌جایی پیچ را با دقت یک صدم میلیمتر اندازه می‌گیرد.  $l_0$  طول میله را به دقت اندازه بگیرید. میله را داخل دستگاه سوار کنید و پس از تعادل حرارتی با دماسنج از روزنه A دمای اولیه میله را یادداشت کنید. پوسته ریزسنج را طوری بپیچانید که صفر پوسته در امتداد خط مدرج بدنه قرار گیرد و سپس پیچ طرف دیگر را آن قدر بپیچانید که میله از دوسر با پیچ طرفین تماس پیدا کند و مدار الکتریکی مسدود و لامپ روشن شود. پیچ ریزسنج‌دار را در حدود ۲ یا ۳



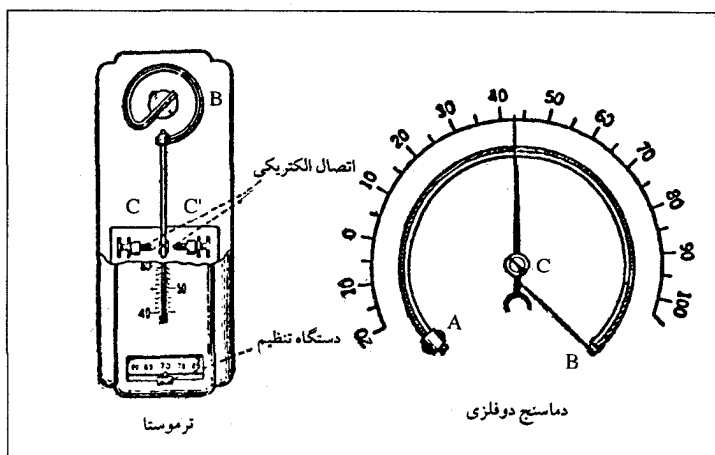
شکل ۱۵-۶

میلیمتر از میله دور کنید، چراغ خاموش می شود. ظرف تولید بخار را تا حدود  $\frac{2}{3}$  حجمش از آب پر کنید و روی سه پایه قرار دهید. با چراغ گاز یا اجاق برقی آن را بجوشانید و بخار آب را توسط لوله لاستیکی به یک طرف لوله دستگاه وارد کنید. بخار آب از اطراف میله عبور می کند و از طرف دیگر لوله خارج می شود. دمای ثانویه میله را یادداشت کنید و پوسته ریزسنج را به عقب برانید تا لامپ دوباره روشن شود. مقدار تغییر مکان پوسته را از فاصله ای که ایجاد کرده بودید (۲ یا ۳ میلیمتر) کم کنید، تفاضل ازدیاد طول میله است. به ازای هر ۵ درجه کاهش دما، ازدیاد طول میله را در جدول زیر یادداشت کنید. دما را بر محور x و ازدیاد طول را بر محور y برید و منحنی نمایش تغییرات طول را برحسب دما که به صورت یک خط مستقیم است رسم کنید. حاصل ضرب شیب خط در  $\frac{1}{L_1}$  برابر ضریب انبساط طولی است.

$\Delta t$ تغییرات دما	
$\Delta l$ تغییرات طول	

## پرسشها

- ۱- چند نمونه از کاربردهای انبساط طولی را ذکر کنید.
- ۲- مقدار خطا را در تعیین ضریب انبساط طولی محاسبه کنید.
- ۳- ثابت کنید که ضرایب انبساط سطحی و حجمی به ترتیب ۲ و ۳ برابر ضریب انبساط خطی اند.
- ۴- شکلهای ۶-۱۶ مربوط به یک نوع دماسنج و ترموستا (دماپا) هستند، طرز کار آنها را شرح دهید.



شکل ۶-۱۶

## آزمایش ۵۶ = ضریب رسانایی گرمایی

### مقدمه

اگر اختلاف دمای معینی بین دوسریک میله برقرار شود، انرژی به شکل گرما از سر داغ به طرف سردتر آن منتقل خواهد شد.

میله‌ای به طول  $l$  و سطح مقطع  $A$  را در نظر می‌گیریم. این میله در امتداد محور طولها قرار دارد و یک طرف آن گرم به دمای  $T_1$  و طرف دیگرش سرد به دمای  $T_2$  است. کمیت  $\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1}$  را گرادیان دما گویند. این کمیت نشان می‌دهد که با چه سرعتی دما در امتداد میله تغییر می‌کند.

کمیت  $\frac{\Delta Q}{A \Delta t}$  مقدار گرمایی را نشان می‌دهد که از واحد سطح مقطع در واحد زمان منتقل می‌شود و آن را شارش گرمایی می‌نامند.

مطابق قانون رسانش گرمای فوریه، شارش گرما با گرادیان دما متناسب است

$$\frac{\Delta Q}{A \Delta t} = -K \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

علامت منفی به علت آن است که شارش گرما، کمیتی مثبت و گرادیان دما کمیتی منفی است. کمیت  $K$  رسانندگی گرمایی جسمی است که از طریق آن گرما منتقل می‌شود. واحدهای  $K$  وات بر کلوین متر و کیلوکالری بر ساعت متر درجه سلسیوس و کالری بر ثانیه بر سانتیمتر بر درجه سلسیوس است. بنابراین مقدار گرمایی که از میله عبور می‌کند برابر است با

$$Q = -K A t \left( \frac{T_2 - T_1}{l} \right) \quad (1)$$

نسبت گرما به زمان عبور آن را جریان گرمایی می‌گویند،  $H = \frac{Q}{t}$ ، در نتیجه

$$H = -K A \left( \frac{T_2 - T_1}{l} \right)$$

یک طرف میله توسط جریان برق که از مقاومت‌های الکتریکی عبور می‌کند گرم می‌شود و طرف دیگر توسط جریان آب در دمای ثابت نگهداشته می‌شود. آب باید با شدت و دمای ثابت جریان یابد. اگر دمای آب ورودی  $T'_1$  و دمای آب خروجی  $T'_2$  باشد و در زمان  $t$  جرم آب جاری که در ظرفی جمع می‌شود  $M$  باشد، مقدار گرمایی که آب در واحد زمان از انتهای میله می‌گیرد برابر است با

$$H = \frac{Q}{t} = \frac{M c}{t} (T'_2 - T'_1)$$

با قراردادن این مقدار در رابطه (۱) نتیجه می‌شود

$$\frac{M c}{t} (T'_2 - T'_1) = -K A \left( \frac{T_2 - T_1}{l} \right)$$

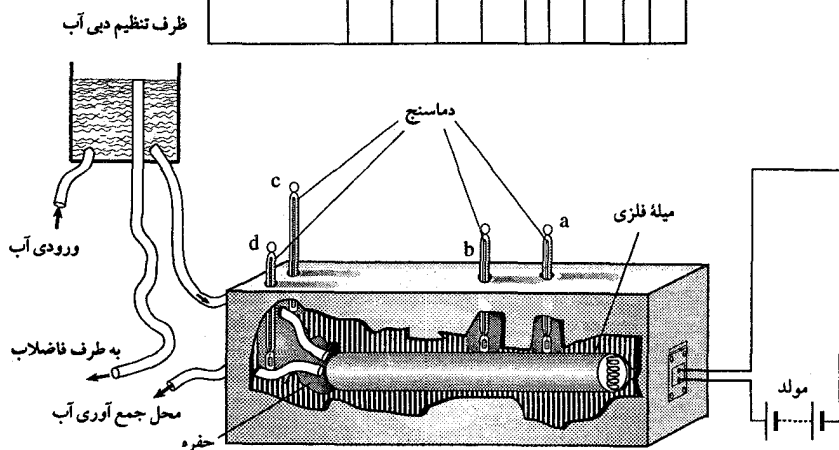


$$K = - \frac{Mcl(T'_f - T'_i)}{tA(T_f - T_i)}$$

هدف آزمایش: اندازه‌گیری ضریب رسانایی گرمایی فلزات  
وسایل آزمایش: دستگاه تعیین ضریب رسانایی گرمایی - دماسنج - بشر - زمانسنج - ترانسفورماتور-کولیس.

روش آزمایش-دستگاه را مطابق شکل ۶-۱۷ سوار کنید. شیر آب را باز و شدت جریان را طوری تنظیم کنید که آب به‌طور یکنواخت جریان یابد. جریان برق را وصل کنید و پس از تقریباً نیم‌ساعت که ثبات دمایی برقرار شد (اختلاف دمایی که دماسنجهای c و d نشان می‌دهند ثابت می‌شود)، توسط دماسنجهای a و b که به فاصله l از یکدیگر روی میله قرار دارند دماهای  $T_p$  و  $T_f$  توسط دماسنجهای c و d که در مسیر ورود و خروج آب قرار گرفته‌اند، دماهای  $T'_f$  و  $T'_p$  را یادداشت کنید. مقداری آب را در ظرفی جمع‌آوری کنید و زمان لازم برای جمع‌آوری آب را با کرنومتر به‌دست آورید. M جرم آب و t زمان جمع‌آوری آن است. با اندازه‌گیری l و A مقادیر به‌دست آمده را در جدول ثبت کنید. سپس شدت جریان آب را تغییر دهید و عمل را تکرار کنید. مقادیر به‌دست آمده در هر یک از دو حالت را در فرمول قرار دهید و اندازه‌های K را پیدا کنید و میانگین آن دو را به‌دست آورید.

ترتیب آزمایش	$T_f$	$T_p$	$T'_f$	$T'_p$	l	A	M	t	K

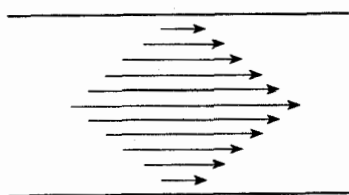


شکل ۶-۱۷

## آزمایش ۵۷ = وشکسانی (ویسکوزیته)

### مقدمه

سرعت تغییر شکل حاصل از تنش لغزشی برای سیالات مختلف، با یکدیگر متفاوت است و بستگی به جنس سیال دارد. لذا بعضی از مایعات به سهولت جریان می‌یابند و برخی مشکلتر جریان پیدا می‌کنند. بر اثر حرکت دو سطح جامد روی هم، نیروی اصطکاک بین آنها اثر می‌کند. در مورد مایعات هم وقتی دو لایهٔ استوانه‌ای مجاور با سرعت‌های مختلف روی هم بلغزند چنین نیرویی بین دو لایه از مایع اثر می‌کند که آن را وشکسانی یا چسبناکی مایع گویند. در نتیجه سیالی که در لوله‌ای جریان می‌یابد تحت اثر تنش‌های لغزشی حاصل از نیروهای اصطکاک قرار می‌گیرد، این نیروها تمایل به آهسته کردن جریان مایع دارند. هنگامی که سیال از حرکت بیفتد نیروهای مذکور از بین می‌روند و نیروهایی برای برگرداندن سیال به حالت اولیه وجود نخواهد داشت. اگر سیال به



شکل ۱۸-۶

تعدادی لایه‌های استوانه‌ای نازک تقسیم شود، جریان سیال عبارت است از لغزش هر لایه روی لایهٔ مجاور. سرعت لایه‌هایی که نزدیک به محور لوله قرار دارند از لایه‌های کناری بیشتر و به عبارت دیگر مطابق شکل ۶-۱۸ سرعت حرکت در جدار لوله تقریباً صفر و با نزدیک شدن به محور افزایش می‌یابد.

در شکل ۶-۱۹ عنصر حجمی کوچکی را که در داخل سیال حرکت افقی دارد، در نظر می‌گیریم. تنش لغزشی در روی این عنصر حجمی برابر  $\frac{F}{A}$  است که در آن  $F$  نیروی افقی است که بر سطح بالایی اثر می‌کند و  $A$  سطح مقطع افقی است. برای تغییر شکلهای کوچک مقدار لغزش برابر است با جابه‌جایی افقی بین دو سطح تقسیم بر فاصله عمودی بین آنها. بنابراین اگر  $dv$  اختلاف سرعت بین سطوح بالایی و پایینی باشد، مقدار لغزش در واحد زمان برابر است با  $\frac{dv}{dr}$ . این نسبت را گرادیان سرعت می‌گویند که نشانگر مقدار تغییر سرعت لایه‌های موازی نسبت به فاصله بین آنهاست. در صورتی که ذرات مایع با سرعت ثابت در امتداد محور لوله جریان یابند، در دمای ثابت نسبت بین تنش لغزشی (نیروی مماسی وارد بر واحد سطح) و سرعت لغزش (گرادیان سرعت) مقداری است ثابت. این نسبت را ضریب وشکسانی گویند و با  $\eta$  نمایش می‌دهند

$$\eta = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{dv}{dr}} = \frac{Fdr}{A dv}$$

در دستگاه  $c \cdot g \cdot s$  واحد  $\eta$  برابر است با  $\frac{\text{دین}}{\text{تانه/سانتیمتر مربع}} = \frac{\text{سانتیمتر} \times \text{دین}}{\text{تانه} / \text{سانتیمتر} \times \text{سانتیمتر مربع}}$ . این

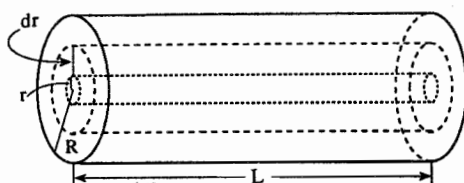
مقدار را پواز گویند و آن ضریب وشکسانی سیالی است که در اثر تنش لغزشی یک دین بر سانتیمتر مربع،

گرادیان سرعت واحد ایجاد کند.

$$\text{ابعاد وشکسانی} = \frac{MLt^{-2}}{L^2T^{-1}} = ML^{-1}T^{-1}$$

مطابق شکل ۶-۱۹ لوله‌ای به شعاع  $R$  و به طول  $L$  در نظر می‌گیریم و فرض می‌کنیم که سیالی درون آن جریان دارد. اگر  $f$  نیروی وارد بر واحد سطح در فاصله  $r$  از محور لوله و نمایش نیروی اصطکاکی یک لایه روی لایه بعدی باشد، مقدار  $f$  برابر است با حاصل ضرب وشکسانی در سرعت لغزش، و چون سرعت لغزش برابر است با مشتق سرعت نسبت به فاصله شعاع از محور لوله

$$f = \eta \frac{dv}{dr}$$



شکل ۶-۱۹

حاصل ضرب این نیرو در سطح استوانه داخلی عبارت است از مجموع نیروهای اصطکاکی بین دو لایه مجاور، یعنی،

$$\text{مجموع نیروهای اصطکاکی} = 2\pi r L f = 2\pi r L \eta \frac{dv}{dr}$$

علاوه بر نیروی مربوط به وشکسانی نیروی حاصل از اختلاف فشار بین دو سر لوله نیز بر مایع استوانه‌ای به شعاع  $r$  تأثیر می‌کند و مقدار آن برابر است با حاصل ضرب اختلاف فشار  $p$  در سطح مقطع مایع استوانه‌ای، یعنی

$$\text{نیروی حاصل از اختلاف فشار} = p\pi r^2$$

این دو نیرو مساوی و در خلاف جهت یکدیگرند

$$p\pi r^2 = -2\eta\pi r L \frac{dv}{dr}$$

علامت منفی به خاطر آن است که  $\frac{dv}{dr}$  منفی است، یعنی سرعت مایع در وسط بیشتر از کنار آن است.

پس

$$r dr = -\frac{2\eta L}{p} dv$$

در دیواره لوله  $r = R$  و  $v = 0$  است. اگر در فاصله  $r$  مطابق شکل ۶-۱۹،  $v = u$  فرض شود

$$\int_r^R r dr = -\frac{2\eta L}{p} \int_u^0 dv$$

در نتیجه

$$\frac{1}{r}(R^r - r^r) = 2\eta L \frac{u}{p}$$

یا

$$u = p(R^r - r^r) \frac{1}{4\eta L}$$

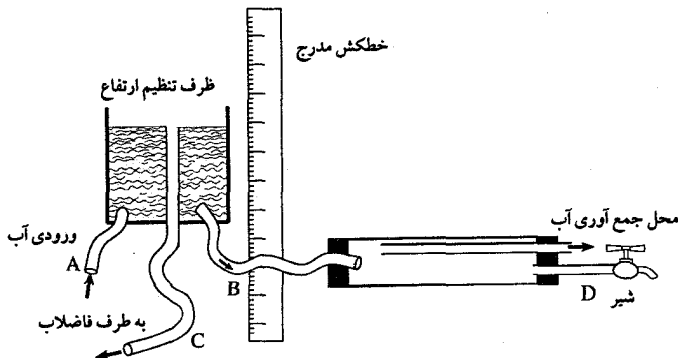
در سطح مقطع لوله، دو دایره به شعاعهای  $r$  و  $r + dr$  در نظر می‌گیریم. سطح محصور بین این دو دایره  $2\pi r dr$  است. مقدار مایعی که در واحد زمان از این سطح مقطع می‌گذرد برابر است با

$$dq = 2\pi r dr \cdot u = p\pi(R^r - r^r) \frac{rdr}{2\eta L}$$

برای به‌دست آوردن حجم کل مایعی که در واحد زمان از لوله‌ای به شعاع  $R$  و به طول  $L$  می‌گذرد، باید از رابطه فوق در حدود  $q = Q$  و  $q = 0$  که نظیر  $r = R$  و  $r = 0$  است انتگرال گرفت

$$Q = \int_0^R p\pi(R^r - r^r) \frac{rdr}{2\eta L} = \frac{\pi p R^r}{4\eta L}$$

شرح دستگاه - مطابق شکل ۶ - ۲۰ لوله موئینی به طول  $L$  داخل لوله شیشه‌ای قرار دارد. ظرفی روی پایه قائمی قرار دارد و می‌توان آن را در ارتفاعهای مختلف ثابت کرد. سه لوله لاستیکی به ظرف مربوط است. آب از لوله A وارد و از لوله B خارج و داخل دستگاه می‌شود. لوله سوم C سطح آب را در ظرف ثابت نگه می‌دارد، اگر آب بیشتر وارد ظرف شود توسط آن به خارج هدایت می‌شود. در نتیجه همواره اختلاف سطح آب در ظرف و محور لوله و در نتیجه اختلاف فشار دو سر لوله ثابت می‌ماند. در طرف دیگر لوله شیشه‌ای، لوله D قرار دارد که به شیری منتهی می‌شود و جهت تخلیه هوا به‌کار می‌رود.



شکل ۶-۲۰

هدف آزمایش: تعیین ضریب وشکسانی آب.

وسایل آزمایش: دستگاه تعیین ضریب وشکسانی - زمانسنج - بشر - ترازو - وزنه - متر.

روش آزمایش - ظرف آب را در بالاترین نقطه ممکن روی پایه قائم ثابت کنید. لوله A را به شیر آب لوله‌کشی شهر وصل کنید. آب از لوله موین فوران می‌کند. اگر حبابهای هوا در لوله مشاهده کردید، شیر D را باز کنید و دستگاه را کمی تکان دهید تا حبابهای هوا کاملاً خارج شوند و سپس شیر D را ببندید و دیگر تا آخر آزمایش به آن دست نزنید. مدت ۵ دقیقه آب خروجی از لوله موین را جمع‌آوری و جرم آن را به دست آورید. از تقسیم جرم آب حاصل بر زمان، مقدار آبی که در واحد زمان از سطح مقطع لوله جریان پیدا کرده است (دبی آب) به دست می‌آید. ارتفاع آب از سطح آب در ظرف تا محور لوله را اندازه بگیرید. ظرف را هر بار ۵ سانتیمتر پایین بیاورید و با ارتفاع جدید، دبی آب را به دست آورید و جدول زیر را پر کنید.

h	
Q	

منحنی نمایش تغییرات دبی را بر حسب ارتفاع رسم کنید. شیب خط  $\tan \alpha = \frac{Q}{h}$  است. مقادیر R شعاع داخلی لوله موین و L طول لوله را اندازه‌گیری کنید. در فرمول  $Q = \frac{p\pi R^f}{\lambda\eta L}$  به جای p مقدار  $\rho gh$  را قرار دهید و طرفین رابطه را بر h تقسیم کنید،  $\frac{Q}{h} = \frac{\rho g\pi R^f}{\lambda\eta L}$  یا  $\tan \alpha = \frac{\rho g\pi R^f}{\lambda\eta L}$  و در نتیجه  $\eta = \frac{\rho g\pi R^f}{\lambda L \tan \alpha}$ . با قراردادن مقادیر به دست آمده در فرمول بالا مقدار  $\eta$  را تعیین کنید.

### پرسشها

- ۱- گرادیان سرعت را تعریف کنید.
- ۲- تغییرات دما چه اثری بر ضریب وشکسانی دارد؟
- ۳- واحد وشکسانی در SI چه رابطه‌ای با پواز دارد؟

## آزمایش ۵۸ = ضریب اتمیسیته گازها

### مقدمه

خارج قسمت گرمای ویژه گاز در فشار ثابت به گرمای ویژه آن در حجم ثابت را ضریب اتمیسیته گاز گویند و با حرف  $\gamma$  نمایش می‌دهند،  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ .

ضریب  $\gamma$  به ساختار اتمی گاز بستگی دارد و یکی از مهمترین خصوصیات هرگازی به حساب می‌آید. مقدار  $\gamma$  برای گازهای یک اتمی ۱/۶۷ و برای گازهای دو اتمی ۱/۴۰ و برای گازهای سه اتمی ۱/۳۰ است.

فرض می‌کنیم در محفظه‌ای مقداری هوای خشک با فشار کمی بیشتر از فشار جو، موجود باشد. در صورتی که محفظه را به هوای آزاد مربوط کنیم، با خروج گاز، فشار باقیمانده گاز با فشار جو یکسان می‌شود و بر اثر انبساط، دمای آن پایین می‌آید.

مجرای خروج گاز را مسدود می‌کنیم و می‌گذاریم تا دمای آن به دمای اتاق برسد. فشار گاز قبل از خروج مقداری گاز از آن را با  $P_1$  و بعد از خروج را با  $P_2$  و فشار جو را با  $P_a$  نشان می‌دهیم. بنابراین

$$P_1 = P_a + \rho gh_1 \quad (1)$$

$$P_2 = P_a + \rho gh_2 \quad (2)$$

$h_1$  و  $h_2$  اختلاف ارتفاع در دو شاخه فشارسنج در دو حالت و  $\rho$  جرم حجمی مایع درون فشارسنج است.

گاز درون مخزن، انبساط بی‌دررو پیدا می‌کند و فشارش از  $P_1$  به  $P_2$  می‌رسد (شکل ۶-۲۱). بنابراین

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\gamma = \frac{P_1}{P_2} \quad (3)$$

یا

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$$

به علت یکسان بودن دمای اولیه و ثانویه گاز، تحول همدماست و خواهیم داشت

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

یا  $\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$  که آن را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^\gamma = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\gamma \quad (4)$$

شكل ٦-٢١

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = \frac{P_1}{P_2} \quad \text{et} \quad \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\gamma} = \frac{P_1}{P_2}$$
$$\left(1 + \frac{\rho g h_1}{P_a}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = \frac{P_a + \rho g h_1}{P_a + \rho g h_2} \quad \text{b.} \quad \left(\frac{P_a + \rho g h_1}{P_a}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = \frac{P_a + \rho g h_1}{P_a + \rho g h_2}$$
$$\frac{1}{\gamma} \frac{\rho g h_1}{P_a} = \frac{\rho g (h_1 - h_r)}{P_a + \rho g h_r} \quad \text{b.} \quad 1 + \frac{1}{\gamma} \frac{\rho g h_1}{P_a} = \frac{P_a + \rho g h_1}{P_a + \rho g h_r}$$
$$\gamma = \frac{h_{\lambda}}{h_{\lambda} - h_{\nu}}$$

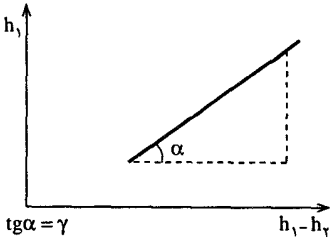
وسایل آزمایش: ۲ عدد بالن - فشارسنج - جیوه - شیر بلوری - تلمبه تخلیه .

روش آزمایش - مطابق شکل ۶-۲۲، دستگاه را سوار کنید و به خاطر اینکه در مخزنها هوای

خشک وجود داشته باشد، جسمی جذب کننده رطوبت در آنها قرار دهید.

شیر B و C را ببندید و شیر A را باز کنید و توسط تلمبه مقداری هوا به مخزن ۱ وارد کنید. سپس شیر A را ببندید و قدری صبر کنید تا تعادل حرارتی حاصل شود. در این موقع شیر B را برای مدت کوتاهی باز کنید و دوباره ببندید تا هوا وارد مخزن ۲ شود. اختلاف ارتفاع مایع را در دو شاخه لوله‌های فشارسنج ( $h_1$ ) یادداشت کنید. شیر C را لحظه‌ای باز کنید و ببندید تا فشار هوای داخل مخزن با فشار جو یکسان شود. چون پس از بستن شیر C هوای مخزن ۲ به تدریج در حجم ثابت گرم می‌شود، فشار نیز افزایش

می‌یابد و موقعی که دمای آن با دمای محیط یکسان شد دوباره اختلاف ارتفاع را در دو شاخه فشارسنج یادداشت کنید. آزمایش را چندبار تکرار و جدول زیر را پر کنید و از روی آن منحنی نمایش تغییرات  $h$ ، نسبت به  $h_1 - h_2$  را رسم کنید (شکل ۶-۲۳) و شیب منحنی یعنی مقدار  $\gamma$  را به دست آورید.



شکل ۶-۲۳

ترتیب آزمایش	$h_1$	$h_2$	$h_1 - h_2$	$\gamma$



# آزمایش ۵۹ اندازه‌گیری گرمای ویژه مایعات باروش سردکردن

## مقدمه

- تبادل انرژی گرمایی بین دو محیط مختلف به راههای مختلفی انجام می‌پذیرد:
- ۱- رسانایی که در اثر تماس مولکولهای جسم گرم با جسم سرد، انرژی گرمایی که ناشی از حرکت مولکولهاست به‌طور مستقیم انتقال پیدا می‌کند.
  - ۲- همرفت ذرات که انتقال گرما همراه با انتقال ماده است.
  - ۳- تابش که در آن انرژی گرمایی به‌صورت امواج حرارتی (امواج الکترومغناطیسی) به اطراف پراکنده می‌شود.

در شرایط و محیطهای عادی قسمت بیشتر انرژی گرمایی به‌وسیله همرفت انجام می‌پذیرد. گرمای دریافتی یا اتلافی یک سطح در دمای معین و در تماس با یک شاره تابع عوامل متعددی است. مثلاً شکل و امتداد قرارگرفتن سطح، خواص گرمایی و مکانیکی شاره و طبیعت جریان شاره (لایه‌ای یا آشفته) در اندازه گرمای جابه‌جا شده مؤثرند.

برای تعیین مقدار انرژی گرمایی داده شده یا گرفته شده در واحد زمان توسط هر جسم رابطه تقریبی و تجربی  $H = hA\Delta t$  برقرار است که برای زمان  $T$  می‌توان نوشت

$$Q = hA\Delta t \cdot T$$

در این رابطه  $Q$  مقدار گرما و  $h$  ضریب همرفتی و  $A$  سطح همرفت و  $\Delta t$  اختلاف دمای سطح همرفت با محیط (مایع یا گاز) و  $T$  زمان است. اگر دو جسم در شرایط مشابه به‌یک اندازه سرد شوند (تغییر دما برای هر دو یکسان باشد)، جسمی که دارای گرمای ویژه کمتری است زودتر و دیگری دیرتر سرد می‌شود. به‌طوری‌که می‌توان نوشت

$$Q_1 = hA\Delta t \cdot T_1$$

$$Q_2 = hA\Delta t \cdot T_2$$

از تقسیم دو رابطه بریکدیگر نتیجه می‌شود

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

هدف آزمایش: اندازه‌گیری گرمای ویژه مایعات

وسایل آزمایش: ۲ عدد لوله آزمایش - ۲ عدد پایه و گیره - منبع حرارتی - ۲ عدد دماسنج -

زمانسنج - بشر

روش آزمایش - در یک لوله آزمایش مقداری آب بریزید. در لوله دیگر نظیر لوله اولی به همان اندازه مایع مورد نظر را بریزید. هر دو لوله را به‌طور قائم به‌یک اندازه در آبی که در بشری قرار دارد فرو برید و آنها را توسط گیره به پایه محکم کنید، (شکل ۶ - ۲۴). بشر را حرارت دهید. آب بشر و در نتیجه لوله‌ها و محتویات آنها گرم می‌شوند. عمل حرارت دادن را تا حدی که دمای آنها پایینتر از نقطه

جوش آب و مایع مورد نظر باشد ادامه دهید. سپس بشر را دور کنید و بگذارید تا لوله‌ها سرد شوند. چون گرمای ویژه آب و مایع مورد نظر متفاوت است، سرعت سرد شدن آنها یکسان نخواهد بود. دمای هریک از لوله‌ها را هر ۲ یا ۳ دقیقه یک‌بار قرائت و در جدول مربوطه ثبت کنید. موقعی که دما به میزان کمی بیشتر از دمای محیط رسید عمل را متوقف کنید. منحنی تغییرات دما را نسبت به زمان برای هر دو مایع رسم کنید، (شکل ۶-۲۵).

برای آب در زمان  $T_1$  افت دما  $\Delta t = t_p - t_1$  و برای مایع مورد نظر در زمان  $T_p$  افت دما  $\Delta t = t_p - t_1$  خواهد بود (تغییر دما را روی محور به یک اندازه اختیار کنید). زمانهای  $T_1$  و  $T_p$  را از روی منحنی به دست آورید.

مقدار انرژی حرارتی که لوله و آب محتوی آن از دست داده‌اند برابر است با

$$Q_1 = (m_1 c_1 + mc) \Delta t$$

و مقدار گرمایی که لوله و مایع مورد نظر از دست داده‌اند برابر است با

$$Q_p = (m_p c_p + mc) \Delta t$$

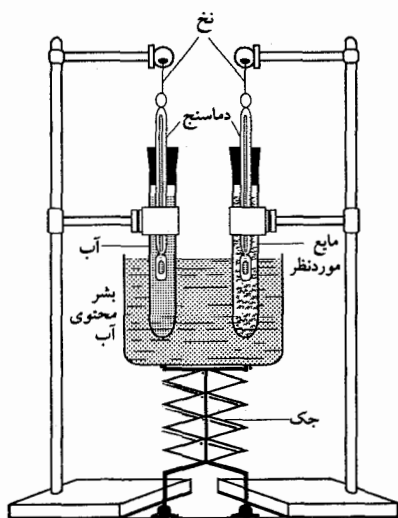
از تقسیم دو رابطه به یکدیگر نتیجه می‌شود

$$\frac{Q_1}{Q_p} = \frac{m_1 c_1 + mc}{m_p c_p + mc}$$

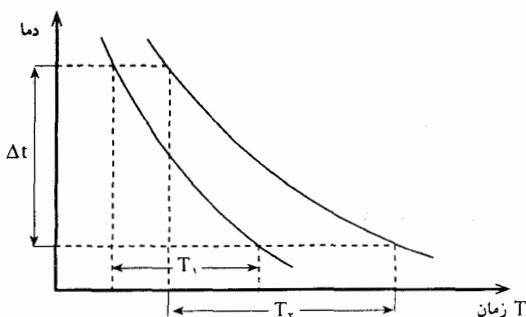
از طرفی چون  $\frac{Q_1}{Q_p} = \frac{T_1}{T_p}$ ، در نتیجه خواهیم داشت

$$\frac{m_1 c_1 + mc}{m_p c_p + mc} = \frac{T_1}{T_p}$$

$m_1$  و  $c_1$  جرم و گرمای ویژه آب،  $m_p$  و  $c_p$  جرم و گرمای ویژه مایع مورد نظر و  $m$  و  $c$  جرم و گرمای ویژه لوله آزمایش است. با توجه به اینکه گرمای ویژه شیشه  $c = 0.19$  کالری بر گرم بر درجه سلسیوس است، تمام مقادیر به‌جز  $c_p$  معلوم‌اند.



شکل ۶-۲۴



شکل ۶-۲۵

# آزمایش ۶۰ قانون بویل - ماریوت

## مقدمه

بویل در سال ۱۶۶۲ و ماریوت در سال ۱۶۷۶ میلادی هریک بدون اطلاع دیگری به طور آزمایشی به این نتیجه رسیدند که برای مقداری گاز محبوس در یک ظرف موقعی که دمایش ثابت و از دمای مایع شدن دور باشد، حاصل ضرب فشار در حجم این گاز، تقریباً مقداری است ثابت. یعنی اگر فشار گاز، بیشتر شود به همان نسبت از حجمش کاسته خواهد شد.

موقعی که فشار گاز  $P$  و حجمش  $V$  باشد و بدون تغییر دما، فشار و حجم آن  $P'$  و  $V'$  شوند خواهیم داشت،  $PV = A$  و  $P'V' = A$  یا

$$PV = P'V' = \dots = A$$

این مقدار ثابت  $A$  برای مقدار معینی گاز فقط تابع دمای آن گاز است. در صورتی که مقدار گاز تغییر یابد مقدار ثابت  $A$  نیز تغییر می کند.

ابعاد  $A$  یا  $P \cdot V$  ابعاد انرژی است. در SI که فشار برحسب پاسکال و  $V$  برحسب مترمکعب است،  $A$  برحسب ژول و در دستگاه  $c \cdot g \cdot s$  که فشار برحسب باری و  $V$  برحسب سانتیمترمکعب است،  $A$  برحسب ارگ است.

به طوری که گفته شد قانون بویل - ماریوت، قانونی است تقریبی و در فشارهای خیلی کم صادق است. قانون ماریوت به صورت  $PV = A + BP + CP^2$  تکمیل شده است که در فشارهایی تا حدود ۱۲ اتمسفر از ضریب  $B$  و در فشارهایی تا حدود ۲۰ اتمسفر از ضریب  $C$  به بعد صرف نظر می شود.

برای سهولت بررسی و مطالعه گازها، آنها را به دو گروه تقسیم کرده اند:

(الف) گازهای ساده یا کامل

(ب) گازهای حقیقی

در گازهای کامل فرض بر این است که:

ابعاد مولکول نسبت به فواصل مولکولها از یکدیگر بسیار کوچک است و می توان مولکول را نقطه مادی فرض کرد.

برخورد مولکولها با یکدیگر کاملاً الاستیک است و مجموعه انرژی داخلی گاز ثابت است.

مولکولها بر اثر برخورد به یکدیگر و همچنین برخورد به جدار ظرف، جز نیروی کششی هیچ نیرویی بین خود رد و بدل نمی کنند.

گاز کامل در طبیعت وجود ندارد ولی در محدوده ای گاز حقیقی را می توان کامل فرض کرد.

برای اثبات نظری قانون ماریوت، مکعب بسته ای را در نظر می گیریم که دارای  $n$  مولکول است.

حرکت مولکولها کاملاً نامنظم و اتفاقی است و می توان چنین فرض کرد که در کل  $\frac{1}{6}$  مولکولها به هریک

از جدارهای ظرف برخورد می‌کنند.

مولکولی که به یکی از جدارها برخورد می‌کند در صورتی که مؤلفه عمودی سرعت آن را بر جدار  $v$  فرض کنیم با سرعتی که مؤلفه عمودیش  $-v$  است برمی‌گردد. تغییرات اندازه حرکت برابر است با  $mv - m(-v) = 2mv$  که  $m$  جرم مولکول است و تغییر اندازه حرکت معرف ضربه نیرو است که در طول مدت  $dt$  بر مولکول وارد می‌شود،  $\Delta f \cdot \Delta t = 2mv$ . مولکول پس از برگشت به جدار مقابل برخورد می‌کند و مجدداً برمی‌گردد. نیروی متوسط ضربه  $\overline{\Delta f}$  نیرویی است که در زمان  $\Delta t$  یعنی زمان رفت و برگشت مولکول بر جدار اثر می‌کند. با توجه به اندازه  $\Delta t$ ، یعنی  $\overline{\Delta f} \cdot \Delta t = 2mv$  خواهیم داشت  $\Delta t = \frac{2\Delta l}{v}$  و در نتیجه  $\overline{\Delta f} = \frac{mv^2}{\Delta l}$ .

اگر  $n_1$  تعداد مولکولهای هم سرعت باشد که با سطوح عمود بر محور  $x$  مکعب برخورد می‌کنند و تصویر سرعت آنها را بر این محور  $v_1$  بنامیم، نیروی متوسط حاصل از این مؤلفه سرعت، روی هریک از این سطوح برابر است با

$$\bar{f}_1 = n_1 \frac{mv_1^2}{\Delta l}$$

ابعاد مکعب  $\Delta l$  است. فشار وارد بر هر سطح  $P_1 = n_1' mv_1^2$  خواهد شد،  $n_1'$  تعداد مولکولهایی از نوع  $n_1$  در واحد حجم است.

به همین ترتیب برای مولکولهایی که مؤلفه سرعتشان در امتداد محور  $y$  برابر  $v_y$  و تعدادشان  $n_y$  است داریم  $P_y = n_y' mv_y^2$ . بنابراین فشاری که تمام مولکولها با مؤلفه‌های مختلف سرعت عمود بر سطح به سطوح وارد می‌کنند برابر است با  $P = n_1' mv_1^2 + n_2' mv_2^2 + \dots$ . با در نظر گرفتن  $n$  به عنوان تعداد کل مولکولهای گاز در واحد حجم، مقدار مجذور سرعت متوسط در یک امتداد عبارت است از

$$P = n \cdot m \bar{v}_x^2 \quad \text{و در نتیجه} \quad \bar{v}_x^2 = \frac{n_1' v_1^2 + n_2' v_2^2 + n_3' v_3^2}{n}$$

سرعت متوسط نسبت به تمام مولکولها برابر خواهد بود با  $\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2$ . چون گاز در ظرف همگن شده است مؤلفه‌های سرعت در هر نقطه ظرف و در همه امتدادها یکسان است، بنابراین  $\bar{v}^2 = 3\bar{v}_x^2$  یا  $\bar{v}_x^2 = \frac{1}{3}\bar{v}^2$ . در نتیجه رابطه فشار به صورت زیر درمی‌آید

$$P = \frac{1}{3} n \cdot m \bar{v}^2$$

نظر به اینکه  $m \cdot n = \rho$  است و  $\rho = \frac{M}{V}$ ، پس می‌توان نوشت

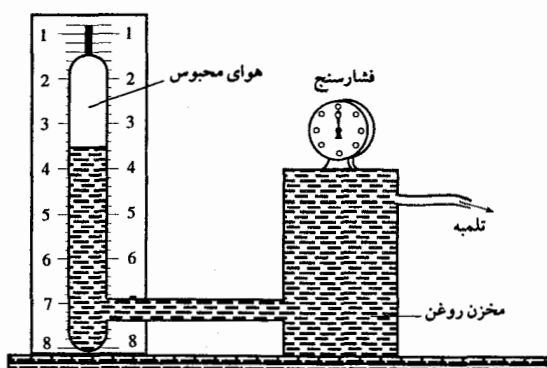
$$P = \frac{1}{3} \cdot \frac{M}{V} \cdot \bar{v}^2$$

$$PV = \frac{1}{3} M \bar{v}^2 = \text{ثابت}$$

یا

هدف آزمایش: بررسی قانون بویل - ماریوت

آزمایش الف) دستگاه آزمایش شامل مخزنی است که از روغن قرمز رنگی پر شده است و از طرفی به لوله شیشه‌ای مسدودی مربوط است که تغییرات حجمی هوا را نشان می‌دهد و از طرف دیگر به



شکل ۶-۲۶

تلمبه‌ای مربوط است که توسط آن هوای متراکم وارد مخزن می‌شود و سطح روغن را در لوله قائم تغییر می‌دهد (شکل ۶-۲۶)، و در نتیجه حجم هوای محبوس در قسمت بالای لوله تغییر می‌کند. حجم هوا را در صفحه مدرجی که در پشت لوله است و فشار آن را با فشارسنجی که در بالای مخزن قرار دارد نشان می‌دهند.

ابتدا شیر دستگاه را باز و فشار داخل مخزن را زیاد کنید. سپس شیر را ببندید و حجم هوا و فشار مربوط را یادداشت کنید. شیر دستگاه را با احتیاط باز کنید و با کم کردن تدریجی فشار، حجم هوای محبوس را به‌ازای فشارهای مختلف در جدول زیر بنویسید.

خطای نسبی	خطای مطلق	PV میانگین	PV	V	P	ترتیب آزمایش

از روی جدول منحنی تغییرات P را نسبت به  $\frac{1}{V}$  رسم کنید.

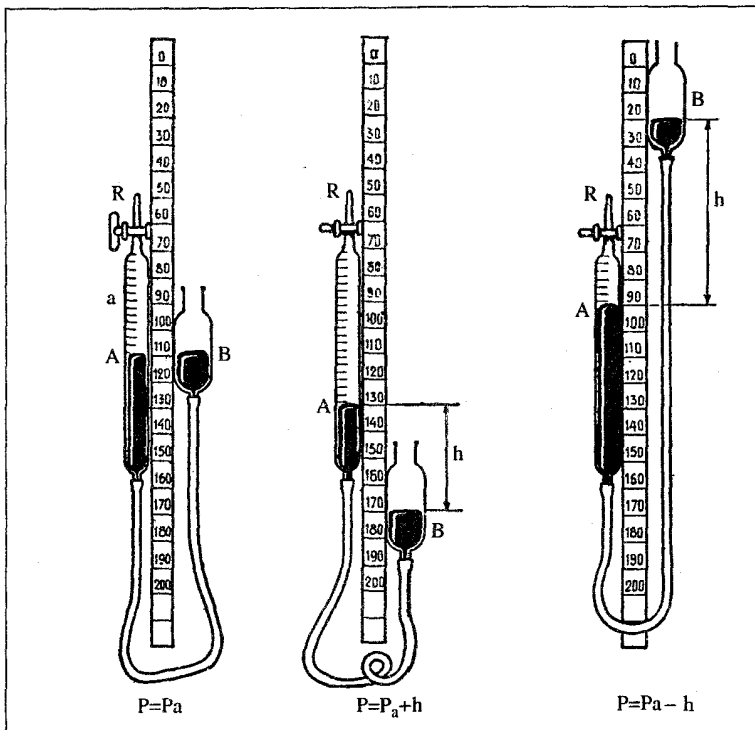
تذکر - تغییرات فشار باید به‌آهستگی انجام گیرد زیرا در غیراین صورت هوا با روغن مخلوط می‌شود و نتیجه صحیح نخواهد بود.

آزمایش ب) دستگاه مطابق شکل ۶-۲۷ تشکیل شده است از دو لوله شیشه‌ای که توسط یک لوله لاستیکی به یکدیگر مربوطند. در قسمت بالای لوله A شیر R وجود دارد که با بستن شیر مقداری هوا در لوله محبوس می‌شود. در شروع آزمایش شیر باز و ارتفاع جیوه در لوله‌های A و B یکسان است ( $h = 0$ ). شیر را می‌بندیم و ارتفاع ستون هوای محبوس را از محل شیر تا سطح جیوه در لوله A یادداشت می‌کنیم. این ارتفاع را با a نشان می‌دهیم. حجم هوای محبوس  $V = a \cdot S$  است. چون لوله‌های A و B مشابه‌اند می‌توان با کولیس قطر داخلی لوله B را به‌دست آورد و از روی

آن مقدار  $S$  را محاسبه کرد یا اینکه حجمها را با توجه به مقادیر  $a$  برحسب  $S$  یادداشت کرد. با پایین و بالا بردن لوله‌ها موقعیت نسبی دو لوله  $A$  و  $B$  را تغییر می‌دهیم و هر بار  $h$  اختلاف سطح جیوه را در دو لوله به دست می‌آوریم. فشار هوای محبوس از رابطه  $P = P_a \pm h$  به دست می‌آید. واحد فشار سانتیمتر جیوه و  $P_a$  فشار هوا در محیط آزمایشگاه است. اگر لوله  $B$  بالاتر باشد  $h$  مثبت و اگر لوله  $A$  بالاتر باشد  $h$  منفی خواهد بود. جدول زیر را پر کنید. خطای مطلق و خطای نسبی هر آزمایش را محاسبه کنید.

ترتیب آزمایش	V	h	P	PV	PV میانگین	خطای مطلق	خطای نسبی

با توجه به اعداد به دست آمده منحنی نمایش تغییرات  $h$  برحسب  $\frac{1}{V}$  را رسم کنید. نمودار یک خط راست خواهد بود. امتداد این خط محور فشار را در نقطه‌ای قطع می‌کند که فاصله آن از مبدأ مختصات مقدار فشار جو در محیط آزمایشگاه را نشان می‌دهد.



# آزمایش ۶۱ تعیین ضریب انبساط حجمی مایعات (روش اول)

## مقدمه

اجسام بر اثر افزایش دما، انبساط پیدا می‌کنند. ازدیاد حجم جسم با حجم اولیه و میزان افزایش دما متناسب است. ضریب تناسب به جنس مایع بستگی دارد.  $\Delta V = kV\Delta t$  یا  $V_2 - V_1 = kV_1\Delta t$  در نتیجه  $V_2 = V_1(1 + kt)$ . ضریب  $k$  را ضریب انبساط حجمی گویند و آن ازدیاد حجم واحد حجم جسم به ازای افزایش یک درجه حرارت است. ضریب انبساط مایع را با  $\beta$  و ضریب انبساط جامد را با  $\gamma$  نشان می‌دهیم.

اگر به ظرفی که درون آن مایعی وجود دارد، گرما داده شود، هم ظرف و هم مایع منبسط می‌شوند. در صورتی که حجم ظرف در صفر درجه  $V_0$  باشد، حجم آن در دمای  $t$  برابر است با

$$V = V_0(1 + \gamma t) \quad (1)$$

چگالیهای مایع در صفر درجه و در  $t$  درجه برابرند با

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_0(1 + \beta t)} \quad \text{و} \quad \rho_0 = \frac{m}{V_0}$$

از این دو رابطه نتیجه می‌شود

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta t} \quad (2)$$

از طرفی در دمای  $t$  درجه جرم مایع برابر است با

$$M = \rho V$$

با توجه به رابطه‌های (۱) و (۲) می‌توان نوشت

$$M = \frac{\rho_0 V_0 (1 + \gamma t)}{1 + \beta t} = \frac{M_0 (1 + \gamma t)}{1 + \beta t}$$

چون

$$\frac{1}{1 + \beta t} = (1 - \beta t + \beta^2 t^2 - \beta^3 t^3 + \dots)$$

بنابراین

$$M = M_0 (1 + \gamma t) (1 - \beta t + \beta^2 t^2 - \beta^3 t^3 + \dots)$$

در بسیاری از حالتها  $\beta$  کوچک است و می‌توان از جمله‌هایی که در آن  $\beta^2$  و  $\beta^3$  وجود دارد چشمپوشی کرد، بنابراین

$$M = M_0 (1 + \gamma t) (1 - \beta t) = M_0 (1 - \beta t + \gamma t - \beta \gamma t^2)$$

چون  $\gamma$  نیز کوچک است از جمله آخر صرفنظر می‌شود  
در نتیجه

$$M = M_0 - M_0(\beta - \gamma)t$$

این رابطه نشان می‌دهد که تغییرات جرم نسبت به دما خطی است.

اگر با آزمایش مقادیر مختلف  $M$  را در دماهای مختلف تعیین کنیم و محور  $x$  برای دما و محور  $y$  برای جرم

انتخاب شوند، نمودار خط مستقیمی است که محل تقاطع آن با محور  $y$  نشاندهنده  $M_0$  جرم مایع در صفر درجه است که ظرف را پر کرده است (شکل ۶-۲۸). شیب خط برابر است با

$$\tan \theta = -M_0(\beta - \gamma)$$

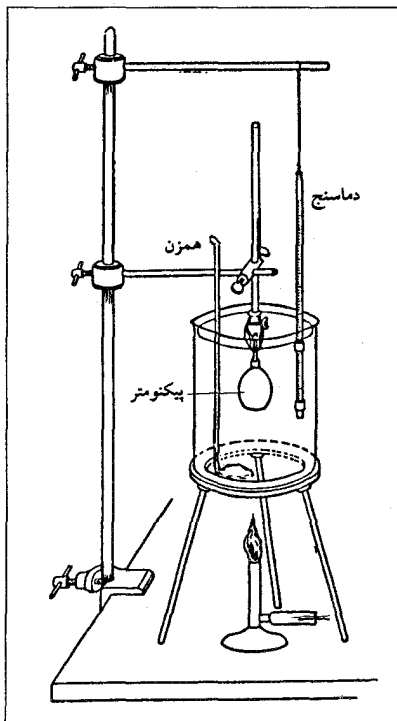
با دانستن  $\gamma$  ضریب انبساط حجمی ظرف می‌توان  $\beta$  ضریب انبساط مایع را به دست آورد.

**هدف آزمایش:** تعیین ضریب انبساط حجمی مایعات

**وسایل آزمایش:** پیکنومتر-ترازو-وزنه-دماسنج-بشر-به هم زن - چشمه حرارتی.

**روش آزمایش:** پیکنومتر را وزن کنید و  $m$  جرم آن را به دست آورید. مایع مورد نظر را در آن بریزید به طوری که لبریز شود، سپس آن را در بشر محتوی آب غوطه‌ور کنید. مدتی صبر کنید تا پیکنومتر با آب درون بشر به تعادل دمایی برسد. پیکنومتر را درآورید و خشک کنید تا قطره‌های آب در جدار آن نباشد و فوری با ترازو  $m'$  جرم آن را به دست آورید.  $M = m' - m$  جرم مایع خواهد بود (شکل ۶-۲۹).

پیکنومتر را دوباره در بشر غوطه‌ور کنید. در یک طرف آن به هم زن و در طرف دیگرش دماسنجی را در آب فرو برید. بشر را حرارت دهید و با به هم زن به طوری که با پیکنومتر برخوردی نداشته باشد آب را به هم بریزید تا گرما به طور یکنواخت به پیکنومتر برسد. هر بار موقعی که دمای آب در حدود  $20^\circ$  درجه بالا رفت بشر را از چشمه حرارتی دور کنید و بگذارید تا پیکنومتر با آب به تعادل دمایی برسد و باز با خشک کردن آن  $M$  را به دست آورید. آزمایش را به همین ترتیب تکرار کنید و هر بار در حدود  $20^\circ$  درجه آن را گرم کنید تا به دمای جوش برسد. موقعی که پیکنومتر و آب



شکل ۶-۲۹



به حالت تعادل دمایی می‌رسند دماها را یادداشت کنید. نتایج حاصل را در جدول زیر بنویسید.

ترتیب آزمایش	m	m'	M	t

منحنی نمایش تغییرات جرم مایع برحسب دما را رسم کنید و با پیدا کردن شیب خط و دانستن ضریب انبساط حجمی شیشه ( $10^{-4} \times 276$ ) ضریب انبساط حجمی مایع را به دست آورید.

### پرسشها

- ۱- ضرایب انبساط حقیقی و ظاهری مایعات را تعریف کنید.
- ۲- مقدار خطا را در تعیین  $\beta$  از فرمول  $M = M_0 - M_0(\beta - \gamma)t$  محاسبه کنید.
- ۳- چگونه می‌توان بدون توزین، جرم مایع را در صفر درجه به دست آورد؟

## آزمایش ۶۲ تعیین ضریب انبساط حجمی مایعات (روش دوم)

### مقدمه

اگر جرم مقدار معینی مایع در دمای  $t_1$  برابر  $m_1$  و جرم آن با حجم ثابت در دمای  $t_r$  برابر  $m_r$  باشد چگالی آن در این دو حالت برابر خواهد بود با

$$\rho_1 = \frac{m_1}{V} \quad \text{و} \quad \rho_r = \frac{m_r}{V}$$

از تقسیم آن دو بر یکدیگر نتیجه می‌شود

$$\frac{\rho_1}{\rho_r} = \frac{m_1}{m_r} \quad (۱)$$

در صورتی که حجم در دمای  $t_1$  برابر  $V_1$  و در دمای  $t_r$  برابر  $V_r$  باشد خواهیم داشت

$$\rho_1 = \frac{m}{V_1} \quad \text{و} \quad \rho_r = \frac{m}{V_r}$$

یا

$$\frac{\rho_1}{\rho_r} = \frac{V_r}{V_1} \quad (۲)$$

موقع انبساط مایع، رابطه بین دو مقدار حجم برابر است با  $V_r = V_1(1 + \beta \Delta t)$ . در نتیجه رابطه (۲) به صورت زیر درمی‌آید

$$\frac{\rho_1}{\rho_r} = \frac{V_1(1 + \beta \Delta t)}{V_1}$$

با توجه به رابطه (۱) خواهیم داشت

$$\frac{m_1}{m_r} = 1 + \beta \Delta t$$

یا

$$\beta = \frac{m_1 - m_r}{m_r \Delta t} \quad (۳)$$

که در آن  $\Delta t$  اختلاف دما یعنی  $t_r - t_1$  است.

هدف آزمایش: تعیین ضریب انبساط حجمی مایعات

وسایل آزمایش: ارلن یا بالن - پایه و گیره - سه پایه - توری - چراغ گاز - دماسنج - دستگاه تعیین

ضریب انبساط حجمی.

آزمایش الف) در ظرفی که مربوط به لوله موئینی است آن قدر الکل بریزید که کاملاً لبریز شود. آن را در داخل ظرف بزرگتری که در آن آب ریخته‌اید قرار دهید. پس از تبادل حرارتی  $t_1$  دمای اولیه را یادداشت کنید و با توزین ظرف خالی ( $m$ ) و پر از الکل ( $m'$ ) مقدار  $m_1$  جرم الکل در دمای  $t_1$  را به دست آورید.

ظرف بزرگتر را حرارت دهید. ظرف کوچکتر و الکل داخل آن به طور یکنواختی گرمتر می‌شود. الکل منبسط شده و به اندازه افزایش حجم حاصل، از لوله موئین خارج می‌شود. از ضریب انبساط شیشه در مقابل ضریب انبساط الکل صرف‌نظر می‌کنیم، بنابراین انبساط خود ظرف قابل چشم‌پوشی است و می‌توان حجم را قبل و بعد از گرم شدن ثابت فرض کرد. موقعی که ظرف بزرگتر را از روی چراغ برمی‌دارید، مدتی صبر کنید تا کاملاً مطمئن شوید که الکل با آب داخل ظرف بزرگتر به تعادل حرارتی رسیده است.  $t_2$  دمای ثانوی الکل را یادداشت کنید و  $m''$  جرم ظرف و الکل و با کمک آن جرم الکل را در این حالت به دست آورید.

هنگامی که ظرف را وزن می‌کنید جدار خارجی آن را کاملاً خشک کنید تا قطره‌های ریز آب روی آن قرار نگرفته باشد.

جدول زیر را پر و با استفاده از رابطه (۳) مقدار  $\beta$  را تعیین کنید.

ترتیب آزمایش	$m$	$m'$	$m' - m$	$t_1$	$m''$	$m'' - m$	$t_2$	$\beta$

آزمایش ب) دستگاه مطابق شکل ۶ - ۳۰ شامل دو لوله به قطریک سانتیمتر است که داخل لوله‌هایی به قطر تقریبی ۳ سانتیمتر قرار گرفته‌اند و به طور قائم روی پایه‌ای سوار شده‌اند. لوله‌های وسطی از پایین توسط لوله موئینی به یکدیگر متصل‌اند. در یک لوله آب و در لوله دیگر مایع مورد نظر موجود است و در هر کدام دماسنجی برای تعیین دما قرار دارد. از چوب پنبه قسمتهای پایین و بالای لوله‌های کلفت‌تر شیلنگهای لاستیکی عبور کرده است. در یک طرف، شیلنگ مربوط به آب سرد است که وارد لوله کلفت می‌شود و از دور لوله نازک عبور می‌کند و خارج می‌شود. به این ترتیب در تمام مدت آزمایش، دمای آب داخل لوله نازک ثابت می‌ماند. در طرف دیگر، شیلنگ مربوط به آب جوش است که دمای مایع مورد نظر را به دمای آب جوش می‌رساند.

در ابتدای آزمایش چون چگالی مایعات با یکدیگر تفاوت دارند، ارتفاع آنها یکسان نخواهد بود. فشار دو مایع در سطح پایین لوله‌ها در دو شاخه به قرار زیر است

$$P_v = \rho_v g h_v \quad \text{و} \quad P_a = \rho_a g h_a$$

چون فشار نقاط واقع در یک سطح برابرند،  $P = P'$  و در نتیجه

$$\rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2$$

یا

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{h_2}{h_1} \quad (۱)$$

اگر دمای آب ثابت بماند و مایع گرم شود، انبساط می‌یابد و ارتفاعش بیشتر می‌شود. جرم مایعات در دو شاخه لوله برابرند با

$$m_2 = \rho_2 V_2 \quad \text{و} \quad m_1 = \rho_1 V_1$$

چون فشارهای وارد به ته لوله‌ها برابرند و سطح مقطع لوله‌ها یکسان است، وزن مایعات و در

نتیجه جرم آنها مساوی و  $m_1 = m_2$  است. پس  $\rho_1 V_1 = \rho_2 V_2$

یا

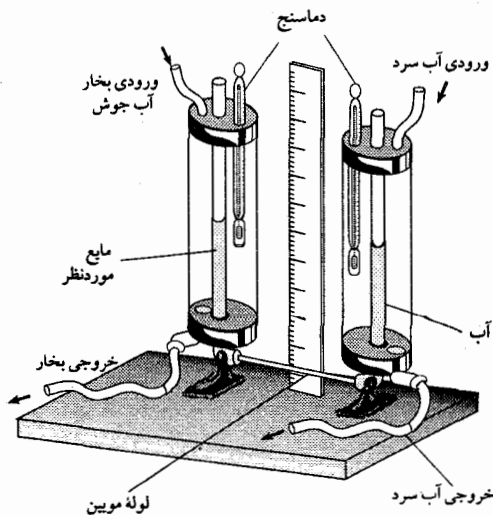
$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (۲)$$

از روابط (۱) و (۲) نتیجه می‌شود

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{V_2}{V_1}$$

چون  $V_2 = V_1(1 + \beta \Delta t)$  است، پس

$$\frac{h_2}{h_1} = 1 + \beta \Delta t$$



شکل ۳۰-۶

در نتیجه

$$\beta = \frac{h_r - h_l}{\Delta t} \quad (3)$$

روش آزمایش ب-  $h_l$  ارتفاع مایع مورد نظر و  $t_l$  دمای آن را اندازه بگیرید. شیلنگ مربوط به لوله آب را به جریان آب سرد و شیلنگ مربوط به مایع مورد نظر را به بالنی که روی چشمه حرارتی قرار دارد وصل کنید. حدود ۱۰ دقیقه بعد از آنکه بخار از لوله خارج شد و لوله و مایع مورد نظر کاملاً با بخار آب جوش به تعادل گرمایی رسیدند  $h_r$  ارتفاع مایع و  $t_r$  دمای آن را اندازه بگیرید. اعداد حاصل را در جدول زیر بنویسید و از رابطه ۳ مقدار  $\beta$  ضریب انبساط مایع را پیدا کنید.

$h_l$	$t_l$	$h_r$	$t_r$	$\Delta t = t_r - t_l$

# ۷ الکتریسیته

## آزمایش ۶۳ \_\_\_\_\_ آشنایی با وسایل اندازه‌گیری الکتریکی

### مقدمه

آومتر دستگاهی است که می‌تواند چند کمیت مختلف را اندازه‌گیری کند و نام آن از حروف اول کلمات  $\text{Ampere}$  و  $\text{Volt}$  و  $\text{Ohm}$  تشکیل شده است.

کلیه آومترها با جزئی اختلاف ظاهری مانند یکدیگرند. برای آشنایی با طرز کار این دستگاه و طرز قرار گرفتن آن در مدار به شرح یکی از مدل‌های آن می‌پردازیم.

آومتر تشکیل شده است از یک قاب با سیم‌پیچ که در یک میدان مغناطیسی دائمی قرار می‌گیرد و میزان چرخش آن را عقربه‌ای نشان می‌دهد. وقتی جریان معینی از سیم‌پیچ عبور کند قاب منحرف می‌شود و عقربه متصل به آن روی صفحه مدرج مقدار جریان را نشان می‌دهد. روی صفحه آومتر سه قسمت زیر مشاهده می‌شود (شکل ۷-۱)

۱- صفحه مدرج و عقربه

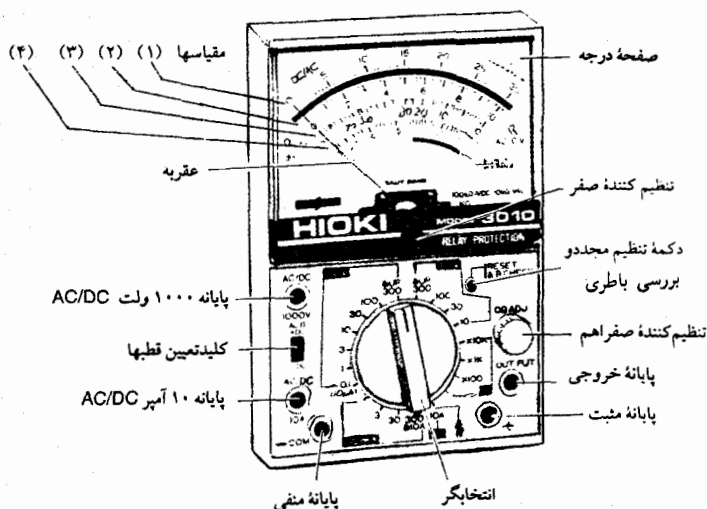
۲- کلید انتخابگر

۳- پایانه‌های ورودی و دگمه‌های تنظیم کننده.

در آومتر مورد نظر روی صفحه مدرج در چهار ردیف، کمیت‌هایی که اندازه‌گیری می‌شوند نوشته و هر ردیف به درجات مختلفی تقسیم شده است. روی صفحه مدرج علائم  $V$  برای اختلاف پتانسیل و  $A$  برای شدت جریان و  $\Omega$  برای مقاومت و  $AC$  برای جریان تناوب و  $DC$  برای جریان مستقیم به کار رفته است. درجات مقاومت از راست به چپ و سایر درجه‌بندیها از چپ به راست است.

انتخابگر کلیدی است که روی صفحه دایره‌ای شکل حرکت می‌کند. دور دایره به درجاتی که نماینده حوزه کار دستگاه است تقسیم شده است. معمولاً اعدادی که روی صفحه انتخابگر نوشته شده است کوچکتر یا بزرگتر از اعداد ردیفهای مدرج است. لذا باید حوزه کار انتخاب شده را بر آخرین عدد صفحه مدرج تقسیم و ضریب به دست آمده را که ضریب قرائت نام دارد در عددی که عقربه نشان می‌دهد ضرب کرد.

موقع کار با دستگاه به نکات زیر توجه کنید



شکل ۷-۱

- ۱- برای اندازه‌گیری شدت جریان ، دستگاه را به طور متوالی در مدار قرار دهید.
  - ۲- برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل ، دستگاه را به صورت موازی در مدار قرار دهید.
  - ۳- موقع اندازه‌گیری مقاومت، عبور جریان برق را قطع کنید. در غیر این صورت اهم‌سنج خواهد سوخت. همچنین هنگامی که مقاومت در مدار قرار دارد و جریانی از آن عبور نمی‌کند برای اندازه‌گیری مقدار آن، یک طرف آن را باز کنید.
  - ۴- با احتیاط دستگاه را جابه‌جا کنید و از وارد شدن ضربه به آن یا سقوطش جلوگیری کنید.
  - ۵- پیچ تنظیم صفر را دست کاری نکنید، زیرا این قسمت خیلی حساس است و ممکن است فنر زیر عقربه قطع و دستگاه خراب شود.
  - ۶- همیشه برای اندازه‌گیری کمیت، انتخابگر را روی ماکسیمم درجه قرار دهید و به تدریج آن را کمتر کنید تا به دستگاه لطمه‌ای نرسد.
  - ۷- همواره سعی کنید که انتخابگر ساعتگرد پیچیده شود و از پیچاندن آن در خلاف جهت خودداری کنید.
  - ۸- طرز قرار گرفتن دستگاه با علائم  $\perp$  برای افقی و  $\perp$  برای عمودی مشخص شده است. اگر این موضوع رعایت نشود درجات خوانده شده با مقدار واقعی تفاوت خواهند داشت.
  - ۹- اگر انتخابگر روی ماکسیمم مقدار قرار گیرد و عقربه از مقدار مجاز بیشتر منحرف شود دستگاه برای اندازه‌گیری این کمیت مناسب نیست و باید دستگاه را عوض کرد.
  - ۱۰- اگر عقربه در جهت معکوس بچرخد یا باید دو سر فیشها را در مدار جابه‌جا کرد یا اینکه کلید DC را در جهت منفی قرار داد.
- معمولاً در آمترها آینه‌ای به موازات صفحه مدرج وجود دارد که به وسیله آن می‌توان خطای اندازه‌گیری را کاهش داد، زیرا برای خواندن صحیح درجات باید به صورت عمود به صفحه نگاه کرد تا تصویر عقربه در آینه و خود عقربه بر هم منطبق شوند.

## هدف آزمایش: چگونگی طرز کار با اُومتر Avometer یا Multimeter.

طرز اندازه‌گیری مقاومت - انتخابگر را روی مقاومت قرار دهید. فیش سیاه را در پایانه - یا COM، و فیش قرمز را در پایانه + قرار دهید. انتهای دو فیش را به هم وصل کنید. اگر عقربه روی صفر قرار نگرفت دستگاه تنظیم نیست و باید به وسیله پیچ تنظیم آنرا تنظیم کرد. پیچ تنظیم روی دستگاه با علامت  $O\Omega ADJ$  مشخص شده است. در صورتی که عقربه روی صفر برنگردد باتری فرسوده است و باید عوض شود.

پس از تنظیم، دو سر فیش را به طرفین مقاومت مورد نظر وصل کنید و با توجه به دامنه انتخاب شده (از بیشترین مقدار به کمترین مقدار) مقدار مقاومت را به دست آورید.

طرز اندازه‌گیری ولتاژ مستقیم - فیش سیاه را در پایانه COM- و فیش قرمز را در پایانه + قرار دهید. دو سر آزاد فیشها را به طور مناسب به دو قطب مدار وصل کنید. انتخابگر را روی بالاترین مقیاس DCV بگذارید. اگر عقربه حرکت نکرد، به تدریج مقدار را کمتر کنید تا مقیاس مناسب به دست آید.

اگر انتخابگر روی  $0.1$  باشد، مقیاس شماره (۲) را می‌خوانیم و نتیجه را بر  $100$  تقسیم می‌کنیم.

اگر انتخابگر روی  $1$  باشد، مقیاس شماره (۱) را می‌خوانیم و نتیجه را بر  $10$  تقسیم می‌کنیم.

اگر انتخابگر روی  $3$  باشد، مقیاس شماره (۲) را می‌خوانیم و نتیجه را بر  $10$  تقسیم می‌کنیم.

اگر انتخابگر روی  $10$  باشد، مقیاس شماره (۲) را به طور مستقیم می‌خوانیم.

اگر انتخابگر روی  $30$  باشد، مقیاس شماره (۱) را به طور مستقیم می‌خوانیم.

اگر انتخابگر روی  $100$  باشد، مقیاس شماره (۲) را می‌خوانیم و نتیجه را در  $10$  ضرب می‌کنیم.

اگر انتخابگر روی  $300$  باشد، مقیاس شماره (۱) را می‌خوانیم و نتیجه را در  $10$  ضرب می‌کنیم.

برای اندازه‌گیری بیش از  $300$  ولت، فیش قرمز را در  $AC/DC 1000V$  قرار دهید و انتخابگر را روی  $300 \times$  بگذارید. مقیاس شماره (۲) را بخوانید عدد به دست آمده را  $100$  برابر کنید.

طرز اندازه‌گیری جریان مستقیم (DCmA) - پس از قرار دادن فیشها و انتخاب دامنه مناسب مانند حالت قبل دستگاه را به طور متوالی در مدار طوری قرار دهید که فیش قرمز به طرف قطب مثبت (+) و فیش سیاه به طرف قطب منفی (-) باشد. در صورتی که عقربه به طرف منفی حرکت کرد، کلید قطبها را به طرف DC- بلغزانید. برای اندازه‌گیری تا  $10$  آمپر فیش قرمز را در  $AC/DC 10A$  قرار دهید و انتخابگر را در  $10 \times 300$  بگذارید و مقدار شدت جریان را بخوانید.

طرز اندازه‌گیری ولتاژ متناوب ACV - دستگاه را به طور موازی با قسمتی از مدار که می‌خواهید ولتاژش را اندازه بگیرید، قرار دهید و دامنه مناسب را انتخاب کنید و مقدار اختلاف پتانسیل دو سر مدار را روی دستگاه بخوانید. برای اندازه‌گیری ولتاژی بیش از  $300V$  فیش قرمز را به پایانه  $AC/DC 1000V$  وصل کنید و انتخابگر را به طرف ولتاژ متناوب  $300 \times$  بگردانید و مقدار ولتاژ را بخوانید.

طرز اندازه‌گیری جریان متناوب ACA - فیش سیاه را در COM- و فیش قرمز را در پایانه  $AC/DC 10A$  قرار دهید. کلید قطبها را به  $DC.AC\Omega$  و انتخابگر را به سمت  $10A$  بگردانید. با توجه به دامنه انتخاب شده و مقیاس صفحه، مقدار واقعی کمیت را تعیین کنید.



## آزمایش ۶۴ \_\_\_\_\_ قانون اهم و به هم بستن مقاومتها

### مقدمه

اگر دو سر رسانای R به اختلاف پتانسیل V مربوط باشد و جریانی به شدت I از آن عبور کند، همواره نسبت اختلاف پتانسیل به شدت جریان مقداری است ثابت که به آن مقاومت الکتریکی رسانا می‌گویند

$$V = RI \quad \text{یا} \quad \frac{V}{I} = R$$

این رابطه بیان‌کننده قانون اهم است و نشان می‌دهد که منحنی نمایش تغییرات اختلاف پتانسیل برحسب شدت جریان خطی است.

هدف آزمایش: بررسی قانون اهم و به هم بستن مقاومتها به طور متوالی، موازی و ترکیبی.

تذکر- موقعی که جریان از رسانا عبور می‌کند، مطابق قانون ژول در آن گرما ایجاد می‌شود و گرمای حاصل باعث تغییر مقاومت رسانا می‌شود. در این آزمایش از تغییرات دما صرف‌نظر می‌شود.

وسایل آزمایش: پتانسیومتر- چند مقاومت معلوم- ولتسنج- میلی آمپرسنج- منبع تغذیه- سیمهای رابط- کلید قطع و وصل.

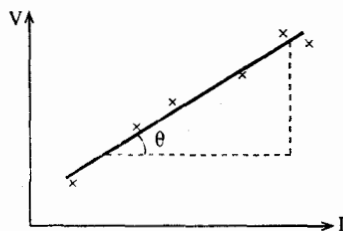
آزمایش الف) مطابق شکل دو سر پتانسیومتری را به باطری وصل کنید و در سر راه آن یک کلید قطع و وصل قرار دهید و یک طرف پتانسیومتر را به مقاومت مجهول و طرف دیگر را به آمپرسنج ببندید. طرف دیگر آمپرسنج را به قسمت متحرک پتانسیومتر متصل کنید. ولتسنجی را به طور انشعابی با مقاومت مجهول قرار دهید تا اختلاف پتانسیل دو سر آن را نشان دهد (شکل ۷-۲).

کلید را وصل کنید و مقادیر اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت و شدت جریانی را که از آن می‌گذرد به وسیله ولتسنج و آمپرسنج بخوانید. سپس قسمت لغزنده پتانسیومتر را تغییر دهید و هر بار اختلاف پتانسیل و شدت جریان مربوط به آن را در جدول یادداشت کنید.

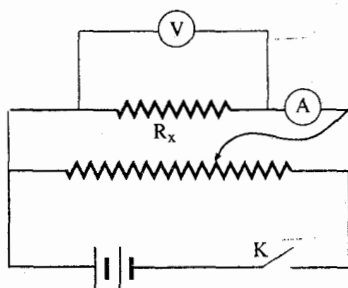
شماره	I	V	R

منحنی نمایش تغییرات اختلاف سطح برحسب شدت جریان را رسم کنید. شیب خط برابر مقاومت است (شکل ۷-۳).

$$\tan \theta = \frac{V}{I} = R_x$$

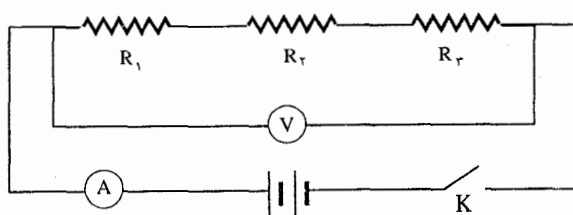


شکل ۳-۷



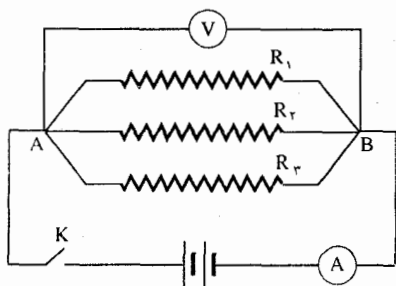
شکل ۲-۷

آزمایش ب) به هم بستن مقاومتها به طور متوالی - سه مقاومت معلوم  $R_1$  و  $R_2$  و  $R_3$  را به طور متوالی به یکدیگر مربوط کنید و مجموعه را با یک آمپرسنج و مولد به طور متوالی به هم ببندید (شکل ۴-۷). مقاومت معادل را از رابطه  $R = R_1 + R_2 + R_3$  محاسبه کنید.



شکل ۴-۷

اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه مقاومتها را با ولتسنج اندازه‌گیری کنید و شدت جریانی را که از آنها می‌گذرد از روی آمپرسنج بخوانید و با استفاده از قانون اهم مقاومت مجموعه را به دست آورید. مقاومت معادل را که از دو راه به دست آورده‌اید با یکدیگر مقایسه کنید.



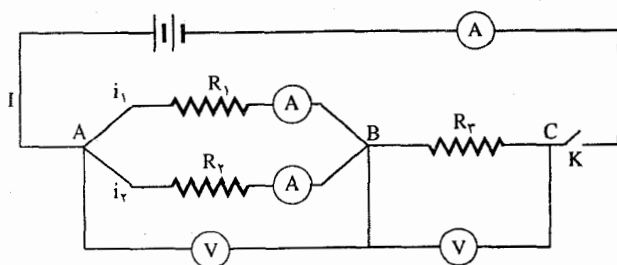
شکل ۵-۷

آزمایش پ) به هم بستن مقاومتها به طور موازی - سه مقاومت معلوم  $R_1$  و  $R_2$  و  $R_3$  را به طور موازی به یکدیگر ببندید. دو سر مجموعه را به طور متوالی به آمپرسنج و کلید قطع و وصل و مولد ببندید و ولتسنجی را به دو سر انشعاب وصل کنید (شکل ۵-۷). کلید را وصل کنید و مقادیر اختلاف پتانسیل دو سر مقاومتها و شدت جریان اصلی را بخوانید و مطابق قانون اهم مقدار مقاومت مجموعه را به دست آورید.

مقاومت معادل را یک بار هم از رابطه  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$  محاسبه کنید. دو مقداری را که برای مقاومت معادل به دست آورده‌اید با هم مقایسه کنید.

آزمایش (ت) به هم بستن ترکیبی - مطابق شکل ۷-۶ دو مقاومت  $R_p$  و  $R_r$  را به طور موازی به هم مربوط کنید و مجموعه را با مقاومت  $R_p$  و کلید قطع و وصل و مولد به طور متوالی به هم ببندید. شدت جریان اصلی و شدت فرعی در هر یک از انشعابها را با آمپرسنجی اندازه گیری کنید. با ولتسنجی اختلاف پتانسیل دو سر تک مقاومتها و همچنین اختلاف پتانسیل سطح بین کلیه مقاومتها ( $V_A - V_C$ ) را اندازه گیری کنید. جدول زیر را پر کنید.

I	$i_1$	$i_r$	$V_A - V_B$	$V_B - V_C$	$V_A - V_C$	R



شکل ۷-۶

مقاومت معادل را از رابطه  $V_A - V_C = RI$  به دست آورید و آن را با مقاومت معادل که از راه محاسبه حاصل شده است مقایسه کنید و درصد خطا را به دست آورید.

## آزمایش ۶۵ تحقیق قانون $R = \rho \frac{L}{S}$

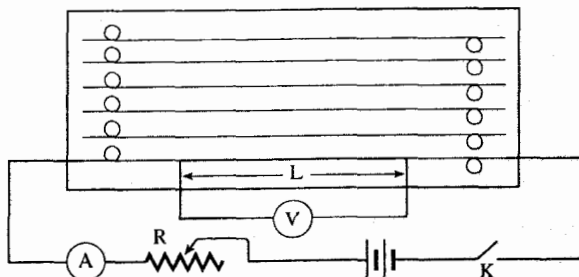
هدف آزمایش: بررسی رابطه بین مقاومت یک سیم رسانا با طول و سطح مقطع و جنس آن و همچنین رابطه بین مقاومت رسانا با تغییر دما.

وسایل آزمایش: تخته مقاومتها شامل سیمهایی با طولها و سطح مقطعه‌ها و جنسهای مختلف - ولتسنج - آمپرسنج - سیمهای رابط - کلید قطع و وصل - ریزسنج - متر - اهم سنج - منبع تغذیه - رثوستا - گرماسنج - سیم مقاومت دار - ظرف پارافین - دماسنج.

آزمایش الف) دو سر آزاد یکی از سیمها را به طور متوالی در مداری که شامل آمپرسنج و مولد است قرار دهید و شدت جریان را به دست آورید. به عنوان یک عمل احتیاطی در مدار رثوستا و کلید قطع و وصل بگذارید (شکل ۷-۷). دو سر ولتسنج را در این آزمایش به دو نقطه از سیم که طول آن به ترتیب  $L_1 = 100 \text{ cm}$  و  $L_2 = 90 \text{ cm}$  و  $L_3 = 80 \text{ cm}$  است، وصل کنید و هر بار اختلاف پتانسیل دوسر سیم را به دست آورید. جدول زیر را پر کنید.

مقاومت	اختلاف پتانسیل	شدت جریان	طول	ترتیب آزمایش
$R_1$	$V_1$	$I_1$	$L_1$	۱
$R_2$	$V_2$	$I_2$	$L_2$	۲
$R_3$	$V_3$	$I_3$	$L_3$	۳

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{L_1}{L_2} \quad , \quad \frac{R_1}{R_3} = \frac{L_1}{L_3} \quad , \quad \frac{R_2}{R_3} = \frac{L_2}{L_3}$$



شکل ۷-۷

آزمایش ب) با ریزسنج قطره‌های چند سیم هم جنس را به دست آورید و سطح مقطع آنها را محاسبه کنید. مدار را مانند حالت قبل تشکیل دهید و مقدار مقاومت را برای سیمهای هم طول و هم جنس با

سطح مقطعهای مختلف به دست آورید و جدول زیر را پر کنید.

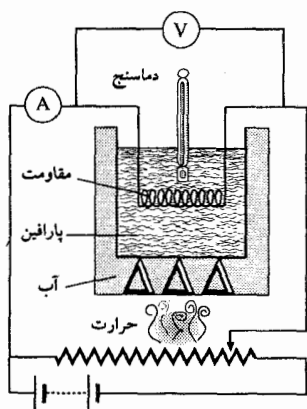
مقاومت	اختلاف پتانسیل	شدت جریان	سطح مقطع	قطر	ترتیب آزمایش
$R_1$	$V_1$	$I_1$	$S_1$	$d_1$	۱
$R_2$	$V_2$	$I_2$	$S_2$	$d_2$	۲
$R_3$	$V_3$	$I_3$	$S_3$	$d_3$	۳

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{S_2}{S_1}, \quad \frac{R_1}{R_3} = \frac{S_3}{S_1}, \quad \frac{R_2}{R_3} = \frac{S_3}{S_2}$$

آزمایش پ) آزمایش را برای دو سیم با جنس مختلف که طولها و سطح مقطعهای آنها یکسان است تکرار کنید و با پرکردن جدول زیر مقدار مقاومت ویژه این دو سیم را به دست آورید.

$\rho = \frac{RS}{L}$	S	d	L	R	V	I	ترتیب آزمایش
							۱
							۲

آزمایش ت) مدارى مطابق شکل ۷-۸ شامل منبع تغذیه، رثوستا، آمپرسنج، ولتسنج، یک مقاومت و کلید قطع و وصل را تشکیل دهید. مقاومت را داخل پارافین قرار دهید و ظرف پارافین را درون ظرف پرازآبی بگذارید. ظرف آب را حرارت دهید. به این ترتیب گرما به طور یکنواخت به مقاومت منتقل می شود. اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت و جریانی را که از آن می گذرد به وسیله ولتسنج و آمپرسنج بخوانید و دمای مقاومت را ۵ درجه به ۵ درجه به وسیله دماسنجی که در پارافین قرار دارد بخوانید و جدول زیر را پر کنید. نظر به اینکه تغییرات جریان بسیار کم است، اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت را توسط تغییر محل لغزنده رثوستا همواره روی یک ولت تنظیم کنید.

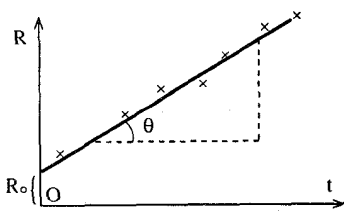


شکل ۷-۸

مقاومت	دما	شدت جریان	اختلاف پتانسیل	ردیف

منحنی نمایش تغییرات  $R$  و  $t$  را رسم کنید. با توجه به اینکه مقاومتها در دماهای متوسط برحسب تغییر دما مطابق رابطه  $R = R_0(1 + \alpha t)$  تغییر می کنند، منحنی نمایش تغییرات این دو کمیت خط مستقیم است. اگر  $R$  محور  $y$  ها و  $t$  محور  $x$  ها انتخاب شوند، جایی که خط مذکور محور  $R$  را قطع می کند، یعنی عرض از مبدأ آن، مقدار  $R_0$  را نشان می دهد و شیب خط برابر  $\tan \theta = \frac{R}{t} = R_0 \alpha$

است که از روی آن می‌توان مقدار  $a$  ضریب حرارتی مقاومت را به دست آورد (شکل ۷-۹).



شکل ۷-۹

با اهم‌سنج، مقادیر مقاومت‌های  $R_1$  و  $R_2$  را در دماهای  $t_1$  و  $t_2$  به دست آورید و با استفاده از دو رابطه زیر اندازه‌های  $a$  و  $R_0$  را تعیین کنید و  $R_0$  حاصل را با  $R_0$  که از روی نمودار معین شده است مقایسه کنید

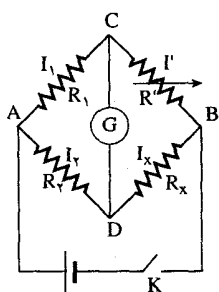
$$R_1 = R_0 (1 + at_1)$$

$$R_2 = R_0 (1 + at_2)$$

# آزمایش ۶۶ تعیین مقاومت مجهول به روش پل وتستون و پل تار

## مقدمه

پل وتستون طرحی است که برای اولین بار توسط فیزیکدان انگلیسی چارلز وتستون در سال ۱۸۴۳ پیشنهاد شده است و برای تعیین مقدار مقاومتهای مجهول به کار می رود. مطابق شکل ۷-۱۰ دو مقاومت



شکل ۷-۱۰

معلوم  $R_1$  و  $R_2$  و یک مقاومت متغیر معلوم (معمولاً برای این کار جعبه مقاومت به کار می رود که به وسیله آن می توان مقاومتهای معلومی را در مدار قرار داد) و مقاومت مجهول به هم مربوطند. این چهار مقاومت دو به دو به طور متوالی به یکدیگر متصل شده اند. سپس دو مجموعه به طور موازی بین دو نقطه  $A$  و  $B$  قرار گرفته اند و  $A$  با یک کلید و مولدی به طور متوالی به هم وصل اند. بین  $C$  و  $D$  گالوانومتری بسته شده است که عبور جریان را نشان می دهد. مقدار مقاومت متغیر را آن قدر تغییر می دهیم تا عقربه گالوانومتر روی صفر قرار گیرد. بنابراین بین دو نقطه  $C$  و  $D$  اختلاف پتانسیلی وجود ندارد و می توان نوشت

$$\begin{aligned} V_A - V_C &= V_A - V_D, & V_C - V_B &= V_D - V_B \\ I_1 &= I', & I_2 &= I_x \end{aligned}$$

مطابق قانون اهم می توان نوشت

$$\begin{aligned} V_A - V_C &= R_1 I_1, & V_C - V_B &= R' I' \\ V_A - V_D &= R_2 I_2, & V_D - V_B &= R_x I_x \end{aligned}$$

با توجه به رابطه های بالا داریم

$$R_1 I_1 = R_2 I_2, \quad R' I' = R_x I_x$$

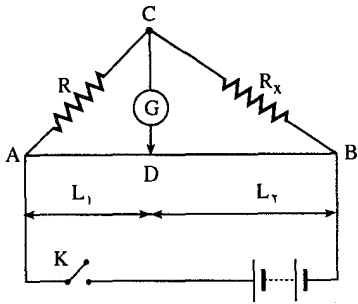
از تقسیم دو رابطه بالا به یکدیگر و در نظر گرفتن روابط بین شدتهای جریان خواهیم داشت

$$\frac{R_1}{R'} = \frac{R_2}{R_x}$$

در نتیجه:

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R' \quad (1)$$

در پل تار دو سربیک رشته سیم مقاوم  $AB$  مطابق شکل ۷-۱۱ به مقاومتهای معلوم  $R$  و مجهول  $R_x$  مربوط است. نقاط  $A$  و  $B$  به کلید قطع و وصل و مولد بسته شده است. یک طرف گالوانومتری



شکل ۱۱-۷

به محل اتصال دو مقاومت مذکور مربوط است و طرف دیگر آن می‌تواند روی سیم AB بلغزد و آن را به دو قسمت  $L_1$  و  $L_2$  تقسیم کند. در حقیقت پل تار همان پل وتستونی است که قطعه‌های  $L_1$  و  $L_2$  سیم به جای دو مقاومت به کار رفته است، بنابراین می‌توان نوشت

$$\frac{R}{L_1} = \frac{R_x}{L_2} \quad (۱)$$

$$R_x = \frac{L_2}{L_1} R \quad (۲)$$

$L_1$  و  $L_2$  را به وسیله خطکش اندازه‌گیری می‌کنیم و با در نظر گرفتن اینکه  $R$  معلوم است مقدار  $R_x$  به دست می‌آید.

هدف آزمایش: شناسایی پل وتستون و پل تار و اندازه‌گیری مقاومت‌های مجهول به وسیله آنها.

وسایل مورد نیاز: جعبه مقاومت - ولتسنج - آمپرسنج - سه عدد مقاومت مجهول - چند عدد مقاومت معلوم - یک رشته سیم مقاومت‌دار - سیم‌های رابط - کلید قطع و وصل - منبع تغذیه. آزمایش الف) مدار پل وتستون را مطابق آنچه ذکر شد ببندید. کلید را وصل کنید و مقاومت‌های جعبه مقاومت را آن قدر تغییر دهید تا جریان در گالوانومتر به صفر برسد و مقاومت جعبه مقاومت را محاسبه کنید. مقادیر  $R_1$  و  $R_2$  نیز معلوم‌اند. از رابطه (۱) مقدار مقاومت مجهول را به دست آورید. آزمایش را برای دو مقاومت مجهول دیگر انجام دهید و جدول زیر را پر کنید.

شماره مقاومت مجهول	$R_1$	$R_2$	$R'$	$R_x$

آزمایش ب) مدار پل تار را با رشته سیمی که روی میز قرار دارد و یک مقاومت معلوم و یک مقاومت مجهول مطابق شکل به هم مربوط کنید. با تغییر قسمت لغزنده روی تار کاری کنید که جریانی از گالوانومتر عبور نکند.  $L_1$  و  $L_2$  را اندازه‌بگیرید و با استفاده از رابطه (۲) مقاومت مجهول را به دست آورید.

آزمایش را برای دو مقاومت مجهول دیگر انجام دهید و جدول زیر را پر کنید.

شماره مقاومت مجهول	$L_1$	$L_2$	$R$	$R_x$



# آزمایش ۶۷ قوانین کیرششف

## مقدمه

برای اینکه در یک رسانا، جریان الکتریسته برقرار شود باید میدان الکتریکی معینی در داخل آن ایجاد کرد. بر اثر عبور جریان مقداری از انرژی الکتریکی در سیم به گرما تبدیل می شود. بنابراین برای برقراری جریان الکتریکی در رسانا باید دستگاهی باشد تا انرژی آن صرف نگهداری جریان در مدار شود. این دستگاه که مولد نامیده می شود می تواند انرژیهای مانند شیمیایی و مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل کند.

وقتی بار الکتریکی در یک مدار از نقطه ای به نقطه دیگری می رود انرژی پتانسیل آن تغییر می کند. بنابر تعریف اختلاف پتانسیل آن دو نقطه برابر کاهش انرژی پتانسیل یک کولن الکتریسته در حرکت بین آن دو نقطه است.

اگر مدار شامل مولد و مقاومت باشد و  $dq$  کولن الکتریسته ضمن عبور از مدار به اندازه  $dw$  انرژی تلف کند به طوری که قسمتی از آن در خارج مدار و قسمت دیگر در داخل مدار تلف شود به ازای یک کولن الکتریسته، انرژی تلف شده  $\frac{dw}{dq}$  خواهد بود. این مقدار را نیروی الکتروموتوری مولد گویند و همان انرژی تلف شده ای است که باید توسط مولد به انرژی الکتریکی تبدیل شود

$$e = \frac{dw}{dq}$$

واحد نیروی الکتروموتوری ژول بر کولن یا ولت است.

در دستگاههایی مانند الکتروموتورها یا ظرفهای الکترولیز، عمل تبدیل انرژیها عکس مولدهاست. یعنی در آنها انرژی الکتریکی به سایر انرژیها نظیر مکانیکی و شیمیایی تبدیل می شود.

بنابر تعریف مقدار انرژی یک کولن بار الکتریکی که به صورت غیر گرمایی در این قبیل وسایل به مصرف می رسد و به سایر انرژیها تبدیل می شود نیروی ضد الکتروموتوری نام دارد.

در مدارهای الکتریکی اگر جهت جریان طوری باشد که در داخل مولد از قطب منفی به طرف قطب مثبت باشد مولد دارای نیروی الکتروموتوری است و برعکس اگر جریان از قطب مثبت وارد و از قطب منفی خارج شود مولد دارای نیروی ضد الکتروموتوری است.

گوستاو اربارت کیرششف برای به دست آوردن اندازه های غیر معلوم در مدارهایی که شامل مقاومتها و دستگاههایی با نیروهای الکتروموتوری و ضد الکتروموتوری هستند و به طور ترکیبی (متوالی و موازی) به یکدیگر بسته شده اند دو قانون زیر را بیان کرد.

۱- در هر نقطه تقاطع از مدار، جمع جبری جریانها (جریان ورودی مثبت، جریان خروجی منفی)

برابر صفر است

$$\sum I = 0$$

منظور از نقطه تقاطع، نقطه‌ای است که حداقل سه سیم در آنجا به هم متصل شده باشند.

۲- در هر مدار بسته، جمع جبری نیروهای الکتروموتوری (مثبت) و ضد الکتروموتوری (منفی) برابر جمع جبری حاصل‌ضربهای مقاومت در شدت جریان در قسمتهای مختلف آن است

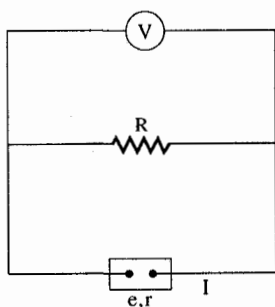
$$\sum e = \sum Ir$$

هدف آزمایش: تحقیق قوانین کیرشهف و به دست آوردن مقاومت داخلی منبع تغذیه.

وسایل آزمایش: ۳ عدد مقاومت - ۳ عدد کلید قطع و وصل - ۲ عدد منبع تغذیه.

آزمایش الف) تعیین مقاومت داخلی مولدها

منبع تغذیه را روشن کنید و دو سولتسنج را به دو قطب آن وصل کنید. اندازه‌ای که ولتسنج نشان می‌دهد نیروی الکتروموتوری منبع تغذیه است. مدار را مطابق شکل ۷-۱۲ ببینید. اگر مقاومت خارجی  $R$  و مقاومت داخلی  $r$  و نیروی الکتروموتوری  $e$  و جریانی که از مدار می‌گذرد  $I$  باشد، مطابق قانون دوم کیرشهف خواهیم داشت



شکل ۷-۱۲

$$e = IR + Ir$$

یا

$$e = V + Ir \quad (۱)$$

$$r = \frac{e - V}{I} \quad \text{پس}$$

و در نتیجه

$$r = \frac{(e - V)R}{V} \quad (۲)$$

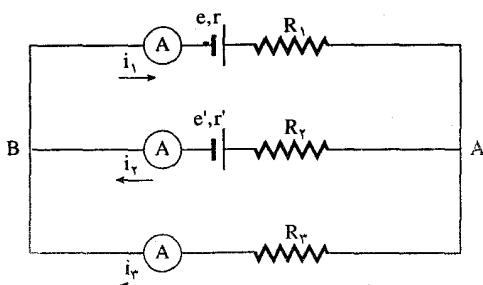
مقاومت‌های ۲۰ و ۲۵ و ۳۰ و ۳۵ و ۴۰ اهم را به منبع تغذیه مربوط کنید و ولتسنج را به طور موازی

به دو سر مقاومت وصل کنید و هر بار اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت را بخوانید و از رابطه (۲) اندازه  $r$  را محاسبه و نتایج به دست آمده را در جدول زیر یادداشت کنید.

میانگین $r$	$r$	$V$	$e$	$R$

# آزمایش ب) بررسی قوانین کیرشهف

مولدها و مقاومتهای  $R_1$  و  $R_2$  و  $R_3$  را مطابق شکل ۷-۱۳ به هم وصل کنید و در هر انشعاب یک کلید قطع و وصل و یک آمپرسنج قرار دهید. شدت جریان را در هر یک از انشعابها از روی آمپرسنج بخوانید. قانون اول کیرشهف را برای نقطه تقاطع A تحقیق کنید. با معلوم بودن  $e, r, e', r'$  که در آزمایش قبل پیدا کرده‌اید و با نوشتن روابط بین آنها، درستی قانون دوم کیرشهف را بررسی کنید.



شکل ۷-۱۳

## آزمایش ۶۸ \_\_\_\_\_ اندازه‌گیری مقاومت داخلی و نیروی محرکه پیلها

هدف آزمایش: تعیین مقاومت داخلی و نیروی محرکه پیلها و به هم بستن آنها به طور متوالی و موازی و ترکیبی.

وسایل آزمایش: چهار عدد پیل - چند عدد مقاومت معلوم - آمپرسنج ولتسنج - کلید - سیمهای رابط - جعبه مقاومت.

آزمایش الف) یک عدد پیل و مقاومت و آمپرسنج و کلید قطع و وصل را به طور متوالی به هم ببندید (شکل ۷-۱۴). کلید را ببندید و شدت جریان را به دست آورید. سپس مقاومت را عوض و آزمایش را تکرار کنید، و دوباره شدت جریان را به دست آورید.

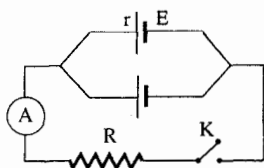
$$\begin{array}{c|c} (۱) & R_1 = \\ \hline & I_1 = \\ (۲) & R_2 = \\ \hline & I_2 = \end{array}$$

با توجه به روابط  $E = I_1(R_1 + r)$  و  $E = I_2(R_2 + r)$  می‌توان مقدار  $r$  مقاومت داخلی مولد  $E$  و نیروی محرکه مولد را به دست آورد.

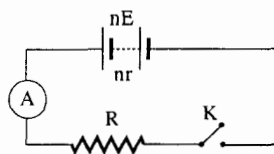
آزمایش ب) در مدار ۲ عدد پیل و مقاومت معلوم و آمپرسنج و کلید قطع و وصل را به طور متوالی قرار دهید و شدت جریانی را که آمپرسنج نشان می‌دهد یادداشت کنید (شکل ۷-۱۵). شدت جریان را از رابطه  $I = \frac{\sum E}{R + \sum r}$  به دست آورید.

آیا مقادیری را که برای شدت جریان به دست آورده‌اید با یکدیگر برابرند؟ در صورتی که این دو مقدار با هم مساوی نیستند علت چیست؟

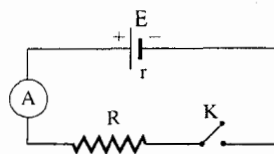
آزمایش پ) دو پیل متشابه را به طور موازی به یکدیگر مربوط کنید و دو سر آنها را با آمپرسنج و مقاومت معلوم و کلید قطع و وصل به طور متوالی به هم ببندید (شکل ۷-۱۶). عددی را که آمپرسنج نشان



شکل ۷-۱۶



شکل ۷-۱۵



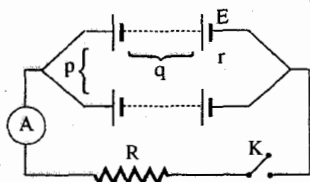
شکل ۷-۱۴

می‌دهد یادداشت کنید و از فرمول  $I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}}$  که در آن  $n = 2$  است مقدار شدت جریان را محاسبه و مقادیر به دست آمده را با یکدیگر مقایسه کنید.

آزمایش (ت) دو مولد را به طور متوالی به هم ببندید و آنها را به طور موازی به دو مولد متوالی دیگر وصل کنید و مجموعه را با یک مقاومت معلوم و آمپرسنج و کلید قطع و وصل به یکدیگر ببندید (شکل

۷-۱۷). شدت جریان را در مدار توسط آمپرسنج معین و با مقداری که از رابطه  $I = \frac{nE}{pR + qr}$  به دست می‌آید مقایسه کنید. در این رابطه  $q$  تعداد مولدها به طور متوالی و  $p$  تعداد رشته‌هایی است که به طور موازی بسته شده‌اند و  $n = p \cdot q$  تعداد کل مولدها یعنی  $n$  است.

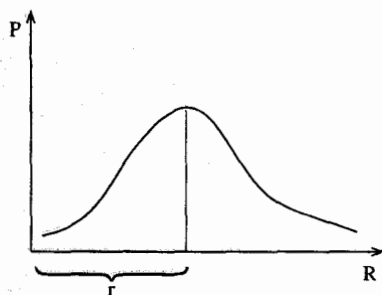
آزمایش (ث) مداری مطابق شکل ۷-۱۸ تشکیل دهید. شدت جریان و ولتاژ را از روی دستگاهها بخوانید. با تغییر دادن مقاومت، مقادیر شدت جریان و ولتاژ حاصل را به دست آورید. با توجه به رابطه  $P = VI$  مقدار توان را برای هر آزمایش محاسبه و جدول زیر را پر کنید.



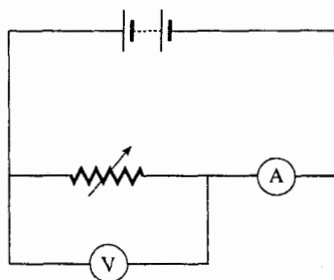
شکل ۷-۱۷

R									
V									
I									
P									

مقادیر مقاومت را روی محور  $x$  ها و مقادیر توان را روی محور  $y$  ها به دست آورید و منحنی تغییرات توان را بر حسب مقاومت رسم کنید (شکل ۷-۱۹). مقاومت مربوط به ماکسیمم توان برابر مقاومت داخلی مولد است.



شکل ۷-۱۹



شکل ۷-۱۸

## آزمایش ۶۹ \_\_\_\_\_ اسیلوسکوپ (نوسان‌نما)

### مقدمه

اسیلوسکوپ دستگاهی است که به وسیله آن می‌توان هر نوع پدیده متغیری را که قابل تبدیل به ولتاژ یا جریان باشد، روی صفحه‌ای مشاهده کرد و مورد مطالعه قرار داد. نظر به اینکه اساس کار اسیلوسکوپ، حرکت دسته‌ای از الکترونهاست که تقریباً بی‌وزن بوده و به سهولت می‌توان آنها را به حرکت درآورد و منحرف کرد لذا، دستگاه تغییرات خفیف کمیت مورد نظر را به طور مستقیم نشان می‌دهد. اسیلوسکوپ مطابق شکل ۷-۲۰ از قسمتهای زیر تشکیل شده است

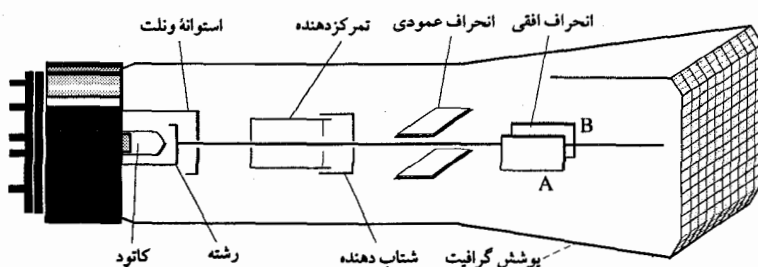
لامپ اسیلوسکوپ حباب شیشه‌ای بزرگی به صورت مخروط ناقص است که به لوله‌ای منتهی می‌شود. در قسمت باریک لوله‌ای شکل، کاتود، آنود و صفحه‌های انحراف قرار دارند. داخل حباب خالی از هواست و صفحه کوژ جلوی آن با لایه‌ای از مواد فلورسانس پوشیده شده است. این مجموعه متشکل از سه قسمت است

۱- تغنگ الکترونی یا بخش مربوط به تهیه و تمرکز پرتوها.

۲- الکترودهای منحرف کننده پرتوها.

۳- صفحه تصویری که با ماده فلورسانس اندود شده است.

کاتود از جنس اکسید نیکل و به شکل استوانه ساخته شده است و در اولین قسمت لوله باریک قرار گرفته است. منبع تغذیه معمولاً با ولتاژ  $۶/۳$  ولت رشته را گرم می‌کند و باعث التهاب کاتود می‌شود، در نتیجه الکترونها از آن خارج می‌شوند. در جلوی کاتود استوانه وِیلت قرار دارد و در وسط دارای منفذی برای عبور الکترونهاست. الکترونها پس از عبور از این منفذ به سمت صفحه هدایت می‌شوند. استوانه وِیلت به پتانسیل منفی وصل است و نقش یک شبکه کنترل را بازی می‌کند. با تغییر ولتاژ آن نسبت به کاتود می‌توان شماره الکترونها را خارج شده را با شدت پرتوهای الکترونی کنترل کرد. پتانسیومتری روی صفحه دستگاه اسیلوسکوپ وجود دارد که با کلمه Intensity مشخص شده و با تغییر آن، پتانسیل شبکه نسبت به کاتود تغییر می‌کند و با تغییر شدت پرتوهای الکترونی، می‌توان مقدار روشنایی نقطه تصویر را به دلخواه کم و زیاد کرد.



شکل ۷-۲۰

چون الکترونها، دارای بارهای الکتریکی همنام‌اند در طول راه یکدیگر را دفع می‌کنند و از هم دورتر می‌شوند و شکل حاصل روی صفحه فلورسان که باید هر چه جمع‌وجورتر و نازکتر باشد به خوبی مشاهده نمی‌شود. برای رفع این عیب و به دست آوردن پرتوهای الکترونی نزدیک به هم و باریک و اثر نقطه‌ای شکل روی صفحه فلورسان، از عدسیهای الکتریکی یا مغناطیسی استفاده می‌شود.

بعد از استوانه وینت، قسمتی است که شامل دو آنود و یک یا دو الکتروده به منظور تمرکز پرتوهای الکترونی است. آنود اول استوانه فلزی کوچکی است که دارای پتانسیل مثبت زیادی است و به آن الکتروده کانونی‌ساز یا آنود تمرکز دهنده گویند. این آنود الکترودهای اطراف کاتود ملتهب را جذب می‌کند و به آنها شتاب می‌دهد. الکترونها با سرعت بسیار زیاد از داخل استوانه آنود عبور می‌کنند و به طرف جلو پرتاب می‌شوند. آنود استوانه‌ای شکل دوم، با پتانسیل مثبتی بیشتر از آنود اول در کار شتاب دادن به الکترونها کمک می‌کند. و آنها را به شکل یک پرتو باریک روی صفحه فلورسان تمرکز می‌دهد. پتانسیومتری که روی صفحه دستگاه با کلمه Focus مشخص شده است، پتانسیل آنود را تغییر می‌دهد و در اثر این تغییرات نقطه یا خط حاصل روی صفحه فلورسان باریکتر یا پهنتر می‌شود.

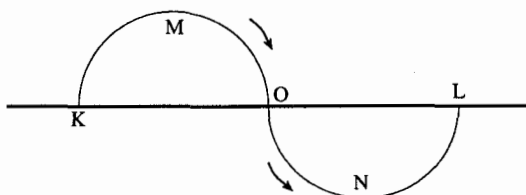
پرتوهای الکترونی پس از خروج از تفنگ الکترونی از میدانهای الکترودهای انحراف دهنده عبور می‌کنند. در این قسمت دو میدان که یکی مربوط به صفحه‌های عمودی و دیگری مربوط به صفحه‌های افقی است روی پرتوها اثر می‌کند. اگر دو صفحه قائم به دو سرب یک باتری وصل شده باشد، الکترونها در اثر میدان الکتریکی حاصل به علت بار منفی که دارند به طرف صفحه مثبت جذب می‌شوند. موقعی که محل اتصال دو قطب باتری تغییر می‌کند، پرتوها در جهت مخالف منحرف می‌شوند. در صورتی که جریان متناوبی به دو صفحه داده شود لکه‌ای که دسته الکترونها روی صفحه فلورسان پدید می‌آورند دارای حرکت رفت و برگشتی خواهد شد. در صورت تجاوز بسامد از ۱۰، چشم حرکت را تشخیص نمی‌دهد و مسیر حرکت الکترونها به صورت خط مستقیمی دیده می‌شود. بدیهی است ماده فلورسان نیز تا مدتی اثر روشنایی را نگه می‌دارد که این امر کمک می‌کند تا حرکت نقطه روشن روی صفحه به صورت خط دیده شود.

هنگامی که دسته الکترونها از داخل صفحه‌های قائم که مربوط به ولتاژ متغیری هستند عبور کنند در امتداد قائم نیز حرکتی خواهند داشت و شکل حاصل روی صفحه فلورسان در اثر حرکت لکه روی دو محور عمود بر هم مشاهده می‌شود.

علاوه بر این طریقه که به طریقه الکتروستاتیکی موسوم است، به روش دیگری نیز پرتوهای الکترونی را منحرف می‌کنند. روش دوم، الکترومغناطیسی است. در خارج حباب لامپ سیم‌پیچهایی قرار دارند، جریانی از آنها عبور می‌کند و میدان مغناطیسی به وجود می‌آورد که باعث انحراف پرتوهای الکترونی می‌شود. یک مدار ایجاد نوسان در داخل اسیلوسکوپ تهیه شده است که به دو سر صفحه‌های افقی مربوط می‌شود. برای کنترل حرکت افقی نقطه نورانی در این مدار سه دگمه تعبیه شده است. اولی تعداد رفت و برگشت نقطه را در ثانیه تنظیم می‌کند و دومی طول خط روشن روی صفحه فلورسان و سومی شدت و تمرکز نقطه نورانی را کنترل می‌کند.

مدار مورد نظر را به دو فیش آزاد مربوط به دو صفحه افقی متصل می‌کنند. مثلاً اگر مدار جریان متناوبی به این دو فیش متصل شود، پتانسیل متناوب مدار باعث تغییر تناوبی بار صفحه‌های افقی

می‌شود و همزمان با این تناوب، پرتو الکترونی حرکت قائم انجام می‌دهد. در این موقع صفحه‌های A و B نیز متناسب با بسامد تنظیم شده می‌خواهند پرتو الکترونی را در یک سطح افقی حرکت دهند. در نتیجه نقطه روشن تحت اثر این دو، روی یک منحنی سینوسی حرکت می‌کند. در نیم دوره اول جریان متناوب مورد مطالعه، نقطه روشن ضمن یک حرکت افقی از K تا O مقداری نیز بالا می‌رود و پس از رسیدن به ماکسیمم دوباره به صفر برمی‌گردد. در نیم دوره دوم چون جهت جریان عوض می‌شود، جهت حرکت نیز تغییر می‌کند و نقطه روشن ضمن حرکت افقی از O تا L به همان مقدار که در نیم دوره اول بالا رفته بود، پایین می‌آید و به مینیمم N می‌رسد و دوباره صفر می‌شود. نقطه روشن روی منحنی KMONL حرکت می‌کند. چون این حرکت بیش از ۱۶ مرتبه در ثانیه است حرکت نقطه به صورت یک منحنی متصل سینوسی روشن به نظر می‌رسد (شکل ۷-۲۱).



شکل ۷-۲۱

صفحه تصویر که همان دیواره جلوی لامپ اسیلوسکوپ است با انحنای کمی ساخته شده است. قسمت داخلی این صفحه شیشه‌ای از موادی پوشیده شده است که هنگام برخورد الکترون‌ها می‌درخشند. رنگ نور بستگی به جنس ماده فلورسان دارد که معمولاً سبز متمایل به زرد یا آبی است. به طوری که از شکل ظاهری یک اسیلوسکوپ پیداست این وسیله دارای دگمه‌هایی است که برای کار با اسیلوسکوپ باید همه آنها را به خوبی شناخت و وظیفه هر کدام را دانست.

**هدف آزمایش:** آشنایی با دستگاه اسیلوسکوپ و طرز کار کردن با آن.

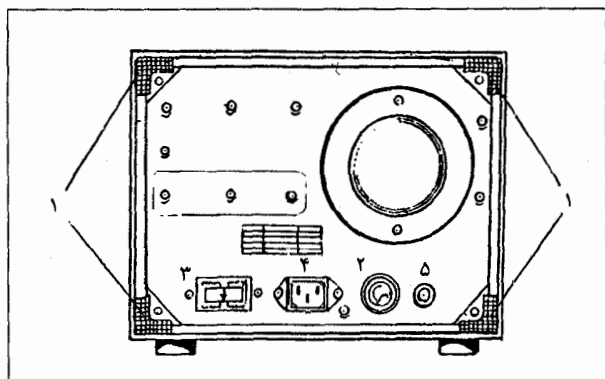
**متناوب:** علامتهای دو کانال به طور متناوب نمایش داده می‌شود. (پایه زمانی بین ۰/۵ ثانیه و ۱ میلی ثانیه توصیه می‌شود).

**مقطع:** نمایش روی صفحه اسیلوسکوپ با بسامدی در حدود ۲۰۰ کیلوهرتز بین علائم دو کانال نوسان می‌کند. (پایه زمانی بین ۰/۵ ثانیه و ۱ میلی ثانیه توصیه می‌شود).

**مجموع:** نمایش روی صفحه اسیلوسکوپ حاصل جمع موجهای دو کانال است. وقتی پیچ تغییر مکان  $CH_1$  کشیده شود، موج کانال ۲ از موج کانال ۱ کم می‌شود و اختلاف دو موج روی صفحه ظاهر می‌شود.

**شرح دستگاه:** در اینجا شما با «نوسان‌نمای ۲۰ مگاهرتزی - صا - ۲۰۲» آشنا می‌شوید. در پشت دستگاه به طوری که در شکل ۷-۲۲ پیداست قسمتهای زیر را مشاهده می‌کنید





شکل ۷-۲۲

۱- جای کابل . موقعی که با دستگاه کار نمی شود یا هنگام حمل آن از محلی به محل دیگر کابل برق در این جا کابلی پیچیده می شود . همچنین وقتی لازم است دستگاه بر صفحه پشت آن مستقر شود ، از این جا کابلها می توان به منزله پایه استفاده کرد .

۲- جافیوزی . برای برق ۱۱۰ و ۱۱۷ ولت از فیوز یک آمپر و برای ۲۲۰ یا ۲۴۰ ولت از فیوز ۰٫۵ آمپر استفاده می شود .

۳- کلید انتخاب ولتاژ . امکان تغذیه دستگاه با منابع تغذیه ۱۱۰ - ۱۱۷ - ۲۲۰ یا ۲۴۰ ولتی را فراهم می کند .

۴- پریز برق . برای اتصال کابل برق دستگاه است .

۵- ورودی محور Z . محل اتصال ولتاژ برای مدولاسیون شدت نور ، ولتاژ بالا روشنایی تصویر را زیاد می کند و ولتاژ پایین روشنایی را کاهش می دهد .

آنچه که در صفحه جلوی دستگاه مطابق شکل ۷ - ۲۳ مشاهده می شود و کار هر یک از آنها به شرح زیر است

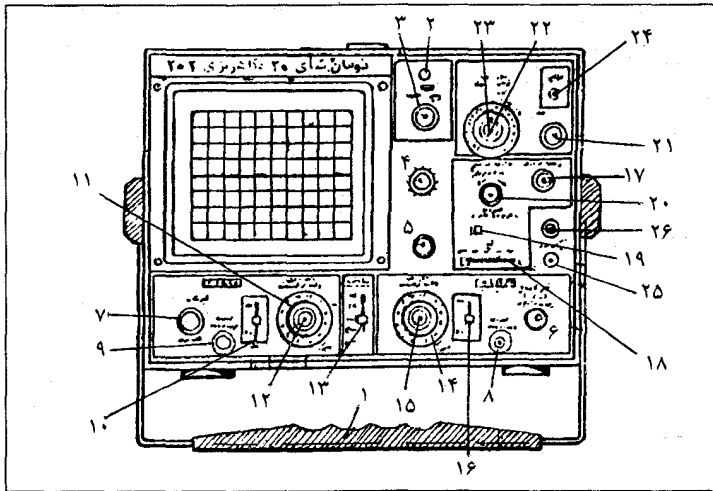
۱- دستگیره که هم به منزله پایه مورد استفاده قرار می گیرد و هم برای حمل و نقل دستگاه . برای جابه جا کردن دستگیره باید قرصهای انتهایی را به طرف داخل فشار داد و سپس دستگیره را چرخاند .

۲- موقعی که برق وارد دستگاه می شود این چراغ روشن می شود .

۳- کلید شماره (۳) برای روشن و خاموش کردن دستگاه به کار می رود . موقعی که به سمت راست پیچانده می شود دستگاه روشن می شود .

۴- کلید شماره (۴) مخصوص تنظیم شدت روشنایی روی صفحه به منظور سهولت مشاهدات است . وقتی به سمت چپ پیچانده شود تصویر ناپدید خواهد شد .

۵- کلید شماره (۵) برای کانونی کردن دسته پرتوهایست ، تا واضحترین تصویر نسبت به میزان روشنایی به دست آید .



شکل ۲۳-۷

۶- کلید شماره (۶) برای جابه‌جایی موج کانال ۲ در امتداد محور افقی است و وقتی بیرون کشیده شود قطبش معکوس می‌شود.

۷- کلید شماره (۷) برای جابه‌جایی دامنه شکل موج کانال ۱ در امتداد محور عمودی است.

۸- محل اتصال علامت ورودی کانال ۲ یا ورودی افقی در حالت نمایش  $X - Y$  است.

۹- محل اتصال علامت ورودی کانال ۱ یا ورودی عمودی در حالت نمایش  $X - Y$  است.

۱۰- اهرم سه وضعیتی، برای کنترل علامت ورودی است.

AC - راه را بر مؤلفه DC علامت ورودی می‌بندد.  $\equiv$  مسیر سیگنال را باز و ورودی تقویت‌کننده عمودی را به زمین وصل می‌کند. به این ترتیب خط صفری به دست می‌آید که از آن می‌توان به منزله مبنا در اندازه‌گیریهای DC استفاده کرد.

DC هر دو مؤلفه AC و DC علامت ورودی را عبور می‌دهد.

۱۱- ولت بر قسمت. تضعیف‌کننده عمودی برای کانال ۱ که تنظیم مرحله به مرحله حساسیت عمودی را امکانپذیر می‌سازد. وقتی پیچ «تنظیم دقیق» در وضعیت کالیبره قرارگیرد بهره عمودی را در ۱۲ محدوده کالیبره از ۵ میلی‌ولت تا ۲۰ ولت بر قسمت می‌توان تغییر داد.

۱۲- تنظیم دقیق. برای تنظیم دقیق تضعیف‌کننده عمودی کانال ۱، وقتی تا انتها در جهت ساعتگرد پیچانده شود، تضعیف‌کننده عمودی کالیبره می‌شود. در حالت نمایش  $X - Y$  آن را برای تنظیم دقیق بهره عمودی به کار می‌گیرند.

۱۳- اهرم پنج وضعیتی. این اهرم آنچه را که روی صفحه اسیلوسکوپ نمایش داده می‌شود به شرح زیر کنترل می‌کند

$CH_1$ : فقط علامت ورود به کانال ۱ را نشان می‌دهد.

$CH_p$ : فقط علامت ورود به کانال ۲ را نشان می‌دهد.

۱۴ و ۱۵ - کار کلیدهای ۱۱ و ۱۲ را برای کانال ۲ انجام می‌دهند.

۱۶ - کلید  $DC / \equiv$  / AC اهرمی است که در سه وضعیت برای کنترل علامت ورودی به کار می‌رود. AC راه را بر مؤلفه DC علامت ورودی می‌بندد.

$\equiv$  مسیر سیگنال را باز و ورودی تقویت کننده عمودی را به زمین وصل می‌کند و خطی حاصل می‌شود که از آن به عنوان مبنا در اندازه‌گیریهای DC استفاده می‌شود.  
DC: هر دو مؤلفه AC و DC علامت ورودی را عبور می‌دهند.

۱۷ - محل اتصال راه‌انداز خارجی است. پیش از وصل ولتاژ راه‌انداز، ابتدا باید اهرم منبع را در وضعیت خارجی قرار داد.

۱۸ - اهرم پنج وضعیتی است. منبع راه‌اندازی پایه زمانی را به ترتیب زیر انجام می‌دهد.  
داخلی - در این وضعیت در حالت نمایش  $CH_p$  پایه زمانی توسط علامت کانال ۲ به راه می‌افتد و در سایر حالت‌های نمایش ( $CH_1$ ، متناوب، مقطع و مجموع) علامت کانال ۱ این امر را انجام می‌دهد.  
 $CH_1$  - در تمام حالت‌های نمایش، علامت کانال ۱ پایه زمانی را راه می‌اندازد.  
 $CH_p$  - در تمام حالت‌های نمایش، علامت کانال ۲ پایه زمانی را راه می‌اندازد.  
تغذیه - راه‌اندازی پایه زمانی برعهده ولتاژ خط تغذیه است.  
خارجی - علامتی که به محل اتصال راه‌انداز خارجی وصل می‌شود، دستگاه جاروب پایه زمانی را کنترل می‌کند.

۱۹ - اهرمی چهاروضعیتی است.

عادی: در این وضعیت، تمامی شکل موجها به جز علائم مرکب تصویری را می‌توان مشاهده کرد.

(+)، دستگاه جاروب پایه زمانی در شیب مثبت شکل موج به راه می‌افتد.

(-)، دستگاه جاروب پایه زمانی در شیب منفی شکل موج به راه می‌افتد.

تصویر - در این وضعیت، تپهای تطبیق علائم مرکب تصویری عهده‌دار راه‌اندازی پایه زمانی هستند. در محدوده‌های بین ۵/۵ تا ۵/۱ میلی ثانیه بر قسمت، تپهای عمودی و در محدوده‌های بین ۵۰ تا ۵/۵ میکروثانیه بر قسمت تپهای افقی به‌طور خودکار انتخاب می‌شوند.

(+) راه‌اندازی روی تپهای روبه افزایش (شیب مثبت)

(-) راه‌اندازی روی تپهای روبه کاهش (شیب منفی)

۲۰ - برای کنترل نقطه‌ای از شکل موج که راه‌اندازی در آن اتفاق می‌افتد: علامت (-) نماینده منفیترین نقطه و علامت (+) نماینده مثبتترین نقطه برای راه‌اندازی است. وقتی این پیچ به بیرون کشیده می‌شود راه‌اندازی پایه زمانی به‌طور خودکار صورت می‌گیرد. در این حالت، حتی در غیاب علامت ورودی نیز دستگاه جاروب پایه زمانی عمل می‌کند.

۲۱- برای حرکت دادن تصویر به چپ و راست صفحه (در حالت نمایش  $X - Y$  هر دو موج را حرکت می‌دهد) چنانچه این پیچ به بیرون کشیده شود تصویر را ده برابر بزرگتر می‌کند.

۲۲- کلیدی است برای انتخاب پایه زمانی. وقتی پیچ تنظیم دقیق (۲۳) در انتهای جهت ساعتگرد باشد، با این کلید می‌توان در ۱۹ مرحله هر یک از پایه‌های کالیبره زمانی از ۰/۵ میکروثانیه تا ۰/۵ ثانیه بر قسمت را انتخاب کرد. وقتی کلید در مقابل نشانه  $X - Y$  قرار گیرد دستگاه داخلی پایه زمانی را از کار می‌اندازد تا علامت وارد به کانال انحراف محور افقی را کنترل کند. در این حالت، علامت کانال ۱ انحراف عمودی (محور  $Y$ ) و علامت کانال ۲ انحراف افقی (محور  $X$ ) را ایجاد می‌کند.

۲۳- برای تنظیم دقیق پایه زمانی است. وقتی تا انتهای جهت ساعتگرد پیچانده شود پایه زمانی کالیبره می‌شود.

۲۴- موج کالیبره  $VP - P / \sqrt{L} \text{ KHz}$  - ۰/۱ این موج که به شکل موج مربعی است دارای ولتاژ ۰/۱ ولت نوک به نوک و بسامد ۱ kHz است. از این موج برای تنظیم کردن اعداد صحیح ولتاژ و زمان اسیلوسکوپ استفاده می‌کنند.

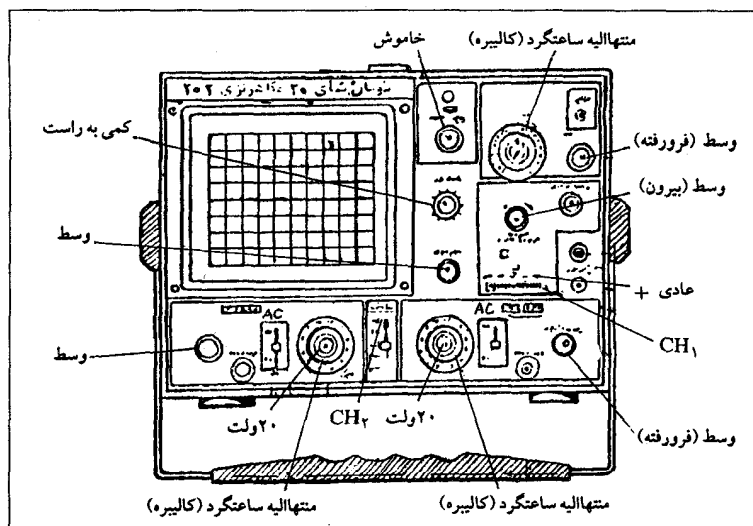
۲۵- برای تنظیم زاویه خط روشن مبنا نسبت به محور افقی صفحه مدرج به‌کار می‌رود.

۲۶- محل اتصال دستگاه به زمین است.

روش آزمایش: قبل از آنکه شروع به کار کنید، کلیدها و پیچهای مربوط را به صورتی که در شکل ۷ - ۲۴ مشاهده می‌شود میزان و دستگاه را روشن کنید. محور افقی روی صفحه اسیلوسکوپ پدیدار می‌شود. در غیر این صورت، پیچهای تغییر مکان عمودی و افقی را تنظیم کنید. میزان روشنایی را با پیچ شدت نور کنترل کنید، چنانچه محور افقی واضح نباشد از پیچ تنظیم کانونی استفاده کنید. ولتاژهای مورد نظر را به ورودیهای ۹ و ۸ وصل کنید. سپس کلید ولت بر قسمت (۱۱) را در جهت ساعتگرد بچرخانید تا شکل موج به خوبی بر صفحه ظاهر شود. اهرمهای نمایش شماره ۱۳ و منبع ۱۸ را در وضعیت مناسب قرار دهید.

هرگاه علامت ورودی بیش از ۵ میلی‌ولت است ولی شکل موج بر صفحه ظاهر نمی‌شود می‌توان اسیلوسکوپ را به وسیله موج کالیبره ۱ کیلوهرتز (۲۴) امتحان کرد. چون مقدار نوک به نوک ولتاژ کالیبره ۰/۱ ولت است، در وضعیت ۲۰ میلی‌ولت بر قسمت شکل موج آن ۵ قسمت عمودی را اشغال خواهد کرد. با فشار دادن پیچ سطح راه‌اندازی (۲۰) عملکرد خودکار پایه زمانی متوقف می‌شود. وقتی این پیچ تقریباً در وسط محدوده خود قرار داشته باشد موج دیده می‌شود و فاز همزمانی را نیز در این حالت می‌توان تنظیم کرد. با چرخاندن پیچ مزبور به‌هریک از دو سمت، شکل موج ناپدید خواهد شد.

برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های مستقیم، اهرم « $AC / \equiv / DC$ » را در وضعیت DC قرار دهید. در این حالت، چنانچه مؤلفه مستقیم حاوی پتانسیل مثبت باشد شکل موج به سمت بالا حرکت می‌کند و در صورتی که پتانسیل منفی داشته باشد پایین می‌آید. نقطه مبانی پتانسیل صفر را می‌توان در وضعیت  $\equiv$  بررسی کرد.



شکل ۲۴-۷

۱- اندازه‌گیری ولتاژ-موقعی که موج سینوسی وارد اسیلوسکوپ شده است و کلید ولت بر قسمت در وضعیت مناسبی قرار دارد یکی از نقاط مینیم موج را بر یکی از خطوط افقی صفحه مدرج مماس کنید. فاصله قائم این نقطه ماکسیمم موج را بر حسب تعداد درجات به دست آورید و سپس تعداد درجات را در ضربی که کلید ولت بر قسمت نشان می‌دهد ضرب کنید. ولتاژ نوک به نوک به دست می‌آید. آزمایش را برای ولتاژهای دیگر تکرار و جدول زیر را پر کنید.

ترتیب	ضریب کلید ولت بر قسمت	تعداد درجات روی محور Y ها	ولتاژ نوک به نوک

اگر مقدار ولتاژ نوک به نوک به دست آمده را بر  $2\sqrt{2}$  تقسیم کنید ولتاژ مؤثر حاصل می‌شود. حال ولتاژ مستقیم دلخواهی را به ورودی اسیلوسکوپ بدهید و خط افقی نورانی را بر خط افقی صفحه منطبق کنید. سپس ورودی اسیلوسکوپ را در حالت DC قرار دهید. فاصله قائم خط مورد نظر را تا خط افقی وسط که همان ولتاژ مستقیم است بر حسب تعداد درجات تعیین کنید

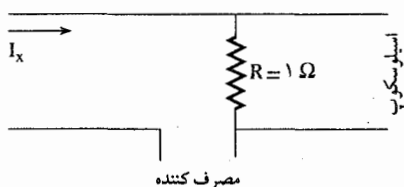
$$\text{تعداد درجات} \times \text{درجه ولت بر قسمت} = \text{ولتاژ}$$

۲- اندازه‌گیری بسامد-یک موج سینوسی را به ورودی اسیلوسکوپ بدهید. کلید زمان بر قسمت را در حالتی قرار دهید تا روی صفحه بیش از ۳ سیکل ظاهر نشود. حال یکی از نقاط مینیم موج را روی یکی از خطوط قائم صفحه قرار دهید. فاصله افقی این نقطه تا نقطه مینیم بعدی را برحسب تعداد درجات تعیین کنید. تعداد درجات را در ضربی که کلید زمان بر قسمت نشان می‌دهد ضرب کنید تا زمان تناوب موج یا یک دوره به دست آید. عکس زمان به دست آمده بسامد موج خواهد بود. این عمل را برای دو موج دیگر تکرار و جدول زیر را پر کنید.

ترتیب	ضریب کلید زمان بر قسمت	تعداد درجات روی محور X	دوره	بسامد

### ۳- اندازه‌گیری شدت جریان - شدت جریان

را نمی‌توان مستقیماً اندازه گرفت، ولی برای اندازه‌گیری جریان لحظه‌ای یا مشاهده شکل جریان از یک مقاومت خطی کم اهم استفاده می‌شود. مقدار مقاومت باید دقیق باشد. اندازه آن را طوری انتخاب می‌کنند که بر جریان اصلی مدار تأثیر چندانی نگذارد. با قراردادن مقاومت کم



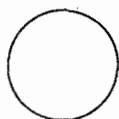
شکل ۷-۲۵

به صورت متوالی در مدار مورد نظر، ولتاژ دوسر آن را توسط اسیلوسکوپ اندازه‌گیری کنید. از تقسیم دامنه این ولتاژ بر اندازه مقاومت مقدار جریان ماکسیم به دست می‌آید. برای سهولت محاسبه معمولاً مقاومت را برابر واحد (یک اهم) می‌گیرند (شکل ۷-۲۵).

منحنیهای لیسازو-اگر دو نیرو در امتدادهای عمود برهم به جسمی وارد شوند و هرکدام از آنها یک حرکت نوسانی به جسم بدهند، جسم تحت اثر این دو نیرو، مسیری را طی می‌کند که شکل آن مسیرها را شکلهای لیسازو گویند.

موقعی که پرتو الکترونی از میان صفحه‌های خازنی عبور می‌کند تحت اثر میدان الکتریکی دارای حرکت نوسانی خواهد بود و روی صفحه اسیلوسکوپ یک خط مشاهده می‌شود. اکنون اگر به دو خازن، دو ولتاژ نوسانی متصل شود، الکترونها در دو سطح عمود برهم نوسان خواهند داشت. در حالتی که نسبت بسامد دو ولتاژ متغیر دو عدد درست باشد یکی از اشکال لیسازو روی صفحه اسیلوسکوپ تشکیل می‌شود (شکل ۷-۲۶).

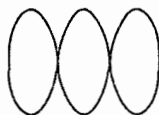
در صورتی که دوره یکی از ولتاژهای متناوب معلوم باشد به کمک شکلهای لیسازو می‌توان بسامد مجهول ولتاژ دیگر را به دست آورد. برای این کار لیسازوی حاصل را در مستطیلی قرار می‌دهند



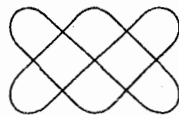
$$\frac{N_1}{N_r} = \frac{2}{2}$$



$$\frac{N_1}{N_r} = \frac{4}{2}$$



$$\frac{N_1}{N_r} = \frac{6}{2}$$



$$\frac{N_1}{N_r} = \frac{6}{4}$$

شکل ۷-۲۶

و بسامد معلومی به صفحه‌های منحرف کننده افقی مربوط می‌کنند و بسامد مجهول را از رابطه

$$f_r = \frac{n_1}{n_r} f_1$$

به دست می‌آورند.  $f_1$  بسامد معلوم،  $f_r$  بسامد مجهول مربوط به صفحه‌های منحرف کننده قائم است.

$n_r$  تعداد نقاط تماس در امتداد لبه افقی مستطیل و  $n_1$  تعداد نقاط تماس در امتداد لبه قائم مستطیل

است. در شکل بالا  $\frac{n_r}{n_1} = \frac{4}{2} = \frac{2}{1}$  است.

## آزمایش ۷۰ قوانین الکترومغناطیس

### مقدمه

در اطراف سیم حامل جریان، میدان مغناطیسی به وجود می آید که از لحاظ کیفیت همانند میدان حاصل از مغناطیس دائمی است.

آثار مغناطیسی جریان الکتریکی برای اولین بار در سال ۱۸۲۰ توسط ارستد کشف شد و در سال ۱۸۳۱ با آزمایشهایی که توسط فارادی انجام گرفت، معلوم شد که به کمک میدان مغناطیسی می توان میدان الکتریکی ایجاد کرد. نتیجه این آزمایشها، نوزادی است به نام الکترومغناطیس که روز به روز رشد و تکامل یافته و باعث ترقیات شگرف در دانش و تکنولوژی شده است.

موقعی که یک بار مثبت نقطه ای با سرعت  $v$  از محلی پرتاب می شود در صورتی که نیروی منحرف کننده  $F$  بر آن اثر کند گویند در آن محل القای مغناطیسی  $B$  وجود دارد و مقدار آن از رابطه زیر به دست می آید

$$F = qvB \sin \theta \quad \text{یا} \quad \mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

که در آن  $\theta$  زاویه بین  $\mathbf{v}$  و  $\mathbf{B}$  است.

میدان مغناطیسی را با خطوطی فرضی به نام خطوط القا نشان می دهند به طوری که در هر نقطه امتداد  $\mathbf{B}$  مماس بر خطوط القاست و مقدار مطلق بردار  $\mathbf{B}$  در هر نقطه متناسب است با تعداد خطوط القایی که از واحد سطح عمود بر امتداد این خطوط عبور می کنند. تعداد کل خطوط القا که از یک سطح دلخواه عبور می کند شارمغناطیسی نامیده می شود و بنا به تعریف شار مغناطیسی از رابطه  $\varphi_B = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$  به دست می آید. اگر  $\mathbf{B}$  یکنواخت باشد شار مغناطیسی یا به عبارت دیگر تعداد خطوط القایی که از سطح  $S$  می گذرد برابر است با  $\varphi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$  که  $\alpha$  زاویه بین خطوط عمود بر سطح با امتداد  $\mathbf{B}$  است.

مطابق قانون فارادی، تغییرات شار  $\varphi$  جریان القایی به وجود می آورد. تغییر شار می تواند توسط یک مغناطیس دائمی یا به کمک یک مدار بسته حامل جریان به وجود آید.

نیروی محرکه القایی که به  $e$  نشان داده می شود، در یک مدار با تغییرات شار مغناطیسی متناسب

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} \quad \text{است}$$

مطابق قانون لنز، جهت جریان القایی طوری است که همواره به وسیله آثار الکترومغناطیسی که ایجاد می کند با عامل به وجود آورنده جریان مخالفت می کند. در حقیقت جهت جریان القایی طوری است که با شار مغناطیسی که به وجود می آورد، تغییرات شار مغناطیسی تولید کننده خودش را خنثا می کند. علامت منفی در رابطه بالا مشخص کننده این مخالفت است. برای به وجود آوردن جریان القایی باید  $\varphi$  یا یکی از عوامل  $B$ ،  $S$  و  $\alpha$  را تغییر داد.

علاوه بر بردار القای  $B$ ، که نیروی میدان مغناطیسی بر بار متحرک را مشخص می کند، بردار دیگری به نام بردار شدت میدان مغناطیسی به کار می رود که به صورت زیر تعریف می شود



$$B = \mu \cdot H \quad \text{یا} \quad H = \frac{B}{\mu} \quad \text{نسبت تراوایی مغناطیسی}$$

اگر از سیملوله‌ای بدون هسته آهنی، جریانی عبور کند، در فضای اطراف آن خطوط القا ظاهر می‌شوند. خطوطی که از سطح تمام حلقه‌های سیملوله عبور می‌کنند با یکدیگر موازی‌اند و شار مغناطیسی  $\varphi$  را تشکیل می‌دهند.

شدت میدان در داخل حلقه‌ها متناسب است با شدت جریانی که آن‌را به وجود آورده است. از طرفی شار مغناطیسی با شدت میدان متناسب است، لذا می‌توان نوشت

$$\varphi = LI$$

از این رابطه مفهوم استاتیکی  $L$  به دست می‌آید که از نظر مقدار با شار جریانی به شدت یک آمپر که از مدار می‌گذرد برابر است.

اگر  $I_1$  جریانی که از سیملوله می‌گذرد، تغییر کند و پس از زمان  $\Delta t$  به مقدار  $I_2$  برسد خواهیم داشت

$$\varphi_1 = LI_1 \quad \text{و} \quad \varphi_2 = LI_2$$

در سیملوله بر اثر تغییر شار مغناطیسی  $\varphi_1 - \varphi_2$  نیروی محرکه خودالقایی به وجود می‌آید

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} = -L \frac{I_2 - I_1}{\Delta t}$$

$$e = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

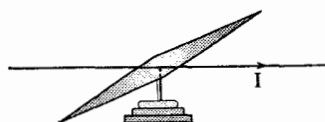
از این رابطه مفهوم دینامیکی  $L$  به دست می‌آید که از نظر مقدار، برابر نیروی محرکه خودالقایی تولید شده در مداری است که شدت جریان آن در مدت یک ثانیه یک آمپر تغییر کند.  $L$  را ضریب خودالقایی گویند و واحد آن هنری است. در عمل جریان خودالقایی عموماً در موقع قطع و وصل جریان در مدارهای الکتریکی به وجود می‌آید.

هدف آزمایش: بررسی آزمایشهای ارستد و قوانین فارادی و لنز در مورد جریانهای القایی و خودالقایی

وسایل آزمایش: سیم مستقیم - سیملوله با دوره‌های مختلف - هسته آهنی - عقربه مغناطیسی - آمپرسنج - ولتسنج.

آزمایش الف) سیم مستقیمی را که از آن جریان الکتریسته می‌گذرد روی عقربه مغناطیسی قرار دهید (شکل ۷-۲۷). جهت انحراف عقربه را یادداشت و جهت جریان را عوض کنید. در انحراف عقربه چه تغییری حاصل می‌شود؟

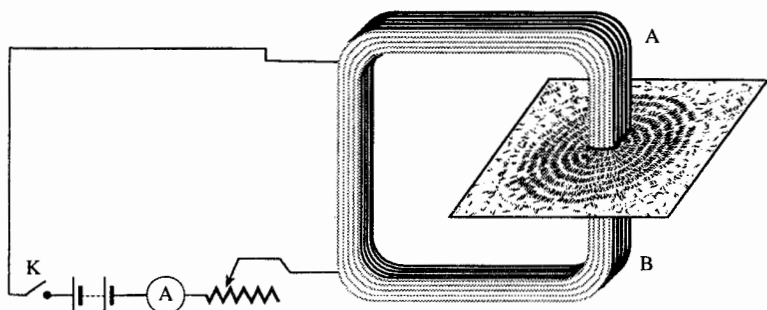
برای تعیین جهت انحراف عقربه می‌توان از دستور آدمک برای استفاده کرد. مطابق این دستور اگر آدمک روی سیم طوری



شکل ۷-۲۷

خوابیده باشد که جریان از طرف پا وارد و از طرف سر خارج شود و به عقربه نگاه کند، قطب شمال عقربه به سمت دست چپ او منحرف می‌شود.

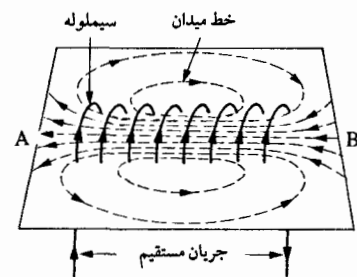
آزمایش (ب) ضلع AB سیم‌پیچ مستطیل شکل از وسط صفحه مقوایی گذشته است. دو سر سیم‌پیچ را به منبع تغذیه وصل کنید و جریانی از آن عبور دهید و روی صفحه مقوایی با نمک‌پاش مقداری براده آهن بریزید و با انگشت به آرامی ضربهای به مقوا بزنید. براده‌ها در صفهای منظم حلقوی به صورت دایره‌های هم‌مرکزی که مرکز آن محل عبور سیم از مقواست قرار می‌گیرند (شکل ۷-۲۸).



شکل ۷-۲۸

عقربه مغناطیسی را روی صفحه مقوایی قرار دهید و جهت میدان را پیدا کنید. آیا موقعی که جای عقربه را عوض می‌کنید در جهت انحراف آن تغییری حاصل می‌شود؟ جهت انحراف عقربه چه ارتباطی با خطوط میدان دایره‌ای شکل دارد؟ جهت جریان را تغییر دهید، آیا در جهت انحراف عقربه تغییری حاصل می‌شود؟

برای تعیین جهت خطوط میدان می‌توان از دستور زیر استفاده کرد  
اگر انگشت شست دست راست در جهت جریان قرار گیرد سایر انگشتان به طور نیمه باز جهت میدان را نشان می‌دهند.



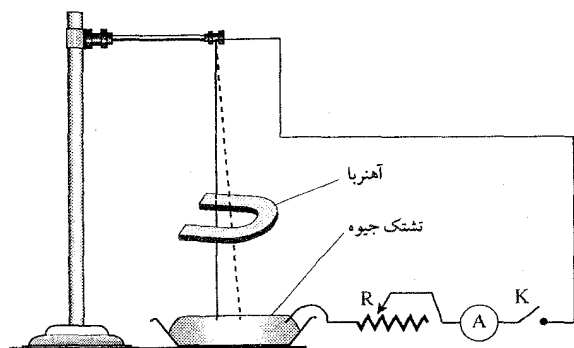
شکل ۷-۲۹

آزمایش (پ) سیمهای سیم‌لوله طوری از صفحه مقوایی عبور کرده است که نصف حلقه‌ها به صورت نیم دایره‌هایی در بالا و نیمه دیگر در پایین مقوا قرار گرفته‌اند (شکل ۷-۲۹). از سیم‌لوله جریانی عبور دهید و با نمک‌پاش روی صفحه براده آهن بریزید و به آرامی ضربه بزنید. نقش مغناطیسی حاصل را مشاهده و شکل آن را رسم کنید.

آزمایش (ت) داخل سیم‌لوله هسته آهنی قرار دهید و جریانی از سیم‌لوله بگذرانید. با نزدیک کردن یکی از قطبهای آهن‌ربا به سیم‌لوله قطبهای آن را مشخص کنید. جهت جریان را عوض کنید. چه

تغییری در قطبها به وجود می‌آید. اگر هسته را خارج کنید آیا باز هم در طرفین سیملوله، قطبها ظاهر می‌شوند؟ اگر دست راست را طوری روی سیملوله قرار دهید که انگشتان در جهت جریان قرار گیرند انگشت شست قطب مثبت را نشان خواهد داد.

آزمایش (ث) سیمی را از گیره‌ای به طور قائم آویزان کنید به طوری که قسمت پایین آن در تشتک جیوه آزادانه حرکت کند، (شکل ۷ - ۳۰). یک سر جریان برق را به قسمت بالای سیم و طرف دیگر آن را به تشتک جیوه مربوط کنید. آهنربای نعلی شکلی را طوری به سیم نزدیک کنید که سیم در میدان حاصل از آهنربا قرار گیرد. جهت انحراف سیم را مشاهده و جهت جریان را عوض کنید، در جهت انحراف سیم چه تغییری حاصل می‌شود؟



شکل ۷-۳۰

اگر سه انگشت دست چپ (نشانه، میانی و شست) به طور عمود بر یکدیگر قرار گیرند به طوری که انگشت نشانه جهت میدان و انگشت میانی جهت جریان را نشان دهد، انگشت شست در جهت حرکت یعنی در جهت نیرو خواهد بود.

آزمایش (ج) دو سر سیم‌پیچی را به یک میکروآمپرسنج وصل کنید. چون در مدار مولد جریان الکتریسته وجود ندارد، عقربه میکروآمپرسنج روی صفر قرار می‌گیرد. حال اگر آهنربایی را به سیم‌پیچ نزدیک کنید آیا عقربه تغییر می‌کند؟ چرا؟

میزان و جهت انحراف عقربه را در هر یک از حالت‌های زیر یادداشت کنید  
الف) قطب شمال آهنربا به سیم‌پیچ نزدیک می‌شود.

ب) قطب شمال آهنربا از سیم‌پیچ دور می‌شود.

پ) قطب جنوب آهنربا به سیم‌پیچ نزدیک می‌شود.

ت) قطب جنوب آهنربا از سیم‌پیچ دور می‌شود.

ث) سرعت نزدیک شدن یا دور شدن آهنربا به سیم‌پیچ کم‌تر یا بیشتر می‌شود.

تعداد دورهای سیم‌پیچ را تغییر دهید و مقدار جریان را در حالت‌های مختلف مقایسه کنید.

آزمایش چ) در داخل سیملوله‌ای هسته آهنی قرار دهید و آهنربایی را به آن نزدیک کنید. هنگام ایجاد جریان القایی با توجه به جهت جریان، قطبهای سیملوله مشخص می‌شود.

هنگامی که قطب شمال آهنربا به سمت راست سیملوله نزدیک می‌شود در آن سمت چه نوع قطبی به وجود می‌آید؟ اگر قطب شمال را دور کنیم چه قطبی در سیملوله به وجود می‌آید؟ موقعی که قطب جنوب آهنربا را به سمت راست سیملوله نزدیک می‌کنیم در آن سمت چه قطبی به وجود می‌آید و هنگام دور شدن نوع قطب چیست؟

پاسخ پرسشهای بالا را یادداشت کنید و نتیجه‌ای را که از آنها می‌گیرید بنویسید.

# آزمایش ۷۱ = ترانسفورماتور

## مقدمه

ترانسفورماتور (مبدل) دستگاهی که برای تغییر ولتاژ به کار می‌رود و در حقیقت انرژی الکتریکی را با فشار الکتریکی معینی دریافت می‌کند و با فشار کمتر یا بیشتر تحویل می‌دهد. ترانسفورماتور تشکیل شده است از یک هسته آهنی که دو سیم پیچ با دوره‌های مختلف روی آن پیچیده شده‌اند. سیم‌پیچی که انرژی را دریافت می‌دارد اولیه و دیگری که انرژی را تحویل می‌دهد ثانویه نام دارد. ممکن است هسته به صورت قاب مستطیل شکلی باشد و اولیه در یک طرف آن و ثانویه در طرف دیگر آن پیچیده شود. سیم‌پیچ اولیه و ثانویه را به ترتیب با  $p$  و  $s$  و تعداد دوره‌های آنها را با  $n_p$  و  $n_s$  نشان می‌دهند. هنگامی که جریان متناوبی به دو سر اولیه وصل شود یک شار مغناطیسی متناوب در هسته آهنی به وجود می‌آید و این شار مغناطیسی متغیر سیم‌پیچ اولیه را قطع می‌کند و نیروی محرکه القایی در آن به وجود می‌آید که در هر لحظه با نیروی محرکه اعمال شده معادل است، بنابراین

$$e_p = -Kn_p \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$$

تغییرات شار مغناطیسی، سیم‌پیچ ثانویه را قطع می‌کند و در نتیجه یک نیروی محرکه القایی در دو سر سیم‌پیچ ثانویه ایجاد می‌کند

$$e_s = -Kn_s \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$$

از تقسیم دو رابطه بالا به یکدیگر خواهیم داشت

$$\frac{e_p}{e_s} = \frac{n_p}{n_s}$$

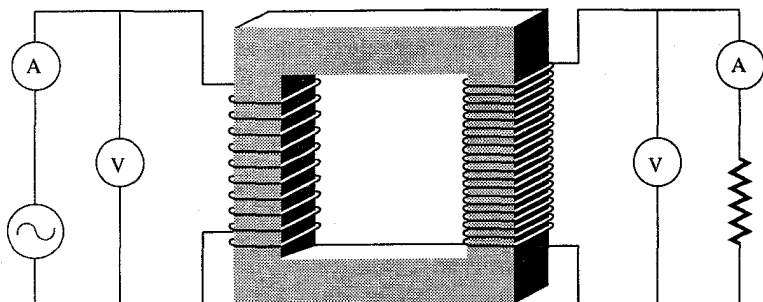
چون ولتاژ با نیروی محرکه متناسب است رابطه فوق به صورت زیر درمی‌آید

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{n_s}{n_p}$$

در صورتی که تعداد سیم‌پیچ‌های ثانویه کمتر از اولیه باشد ولتاژ کاهش می‌یابد و ترانسفورماتور را کاهنده گویند. موقعی که سیم‌پیچ‌های ثانویه بیشتر از اولیه باشد ولتاژ افزایش می‌یابد و ترانسفورماتور افزایشنده است.

هدف آزمایش: آشنایی با ساختمان، طرز کار و کاربرد ترانسفورماتور

وسایل آزمایش: هسته آهنی شامل ورقه‌های نعلی شکل و ورقه‌های کوتاه - سیم‌پیچ با دوره‌های مختلف - ولتسنج - آمپرسنج - کلید قطع و وصل - منبع تغذیه - سیم‌های رابط.



شکل ۷-۳۱

آزمایش الف) دو سیم‌پیچ را در مجاورت یکدیگر قرار دهید. دوسر سیم‌پیچ اولی را به جریان متناوب و دوسر سیم‌پیچ دومی را به گالوانومتری وصل کنید. آیا جریانی در سیم‌پیچ دوم به وجود می‌آید؟ چرا؟ سیم‌پیچها را به یکدیگر دور و نزدیک کنید. در هر حالت چه اتفاقی می‌افتد؟ چرا؟

آزمایش ب) مداری مطابق شکل ۷-۳۱ تشکیل دهید و دوسر سیم‌پیچ اولیه را به جریان متناوب و دوسر سیم‌پیچ ثانویه را به یک مقاومت وصل کنید و توسط ولتسنج و آمپرسنج، اختلاف پتانسیل و شدت جریان اولیه و ثانویه را اندازه‌گیری کنید. با پر کردن جدول زیر رابطه بین اختلاف پتانسیلها و شدتها را به دست آورید.

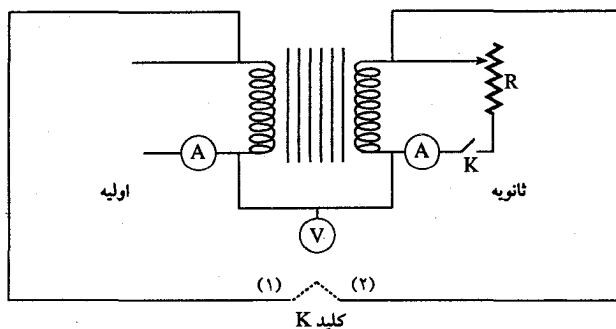
نسبت دور سیم‌پیچها	$V_s$	$V_p$	$I_s$	$I_p$
$n_1 = n_2$				
$n_1 > n_2$				
$n_1 < n_2$				

آزمایش پ) دو سر ثانویه را به دو قطعه میله زغالی وصل کنید و در سر راه رئوستایی قرار دهید. تنظیم رئوستا و دور و نزدیک کردن زغالها، قوس الکتریکی به وجود می‌آید، نور آن را مشاهده کنید.

آزمایش ت) مدار ثانویه را به حلقه فرو رفته مخصوص وصل کنید و داخل آن مقداری قلع بریزید. پس از مدت کوتاهی قلع ذوب می‌شود. این حالت را کوره القایی گویند.

آزمایش ث) مدار اولیه را به جریان متناوبی متصل کنید و سیم‌پیچ ثانویه را به طور عمود بر آن قرار دهید. آیا جریانی از مدار ثانویه عبور می‌کند؟ چرا؟

آزمایش ج) مداری مطابق شکل ۷-۳۲ تشکیل دهید. کلید K را در وضعیت (۱) قرار دهید و ولتاژ



شکل ۷-۳۲

اولیه را یادداشت کنید. کلید را در وضعیت (۲) قرار دهید و ولتاژ ثانویه را بخوانید. توسط رئوستای R مقدار بار ثانویه را تغییر دهید و هر بار ولتاژهای اولیه و ثانویه را یادداشت کنید. مقدار افت ولتاژ را در هر حالت پیدا کنید.

## آزمایش ۷۲ \_\_\_\_\_ مطالعه سلف در جریان متناوب و اندازه گیری مقاومت ظاهری

### مقدمه

دو سر سیمی به مقاومت  $R$  را به ولتاژ  $V$  مربوط می کنیم. پس از مدت کوتاهی شدت جریان برابر  $I$  می شود که مقدار آن مطابق قانون اهم از رابطه  $I = \frac{V}{R}$  به دست می آید. حال اگر این سیم را به صورت سیم پیچی درآوریم، موقع وصل جریان، مدتی طول می کشد تا شدت جریان به مقدار ثابت و ماکسیمم خود برسد. زیرا موقعی که جریان از صفر به یک مقداری می رسد، شار مغناطیسی در مدار تغییر می یابد و این تغییر شار باعث نیروی محرکه خودالقایی می شود و بنابر قانون لنز با عامل به وجود آورنده خود مخالفت و از رسیدن جریان به مقدار ماکسیمم جلوگیری می کند. در نتیجه در لحظه های اول علاوه بر مقاومت اهمی مدار، مقاومت دیگری نیز ظاهر می شود.

در صورتی که سیم پیچ به یک جریان متناوب مربوط شود، چون جهت جریان لحظه به لحظه تغییر می یابد بر اثر آن شار مغناطیسی تغییر می کند و همواره نیروی محرکه خودالقایی در مدار به وجود می آید و در مدار مقاومتی ایجاد می شود که این مقاومت را مقاومت ظاهری سیم پیچ گویند و مقدارش  $X_L = 2\pi fL$  است. در این رابطه  $f$  بسامد جریان متناوب و  $L$  ضریب خودالقایی سیم پیچ است که با تعداد دور سیم پیچ و سطح آنها متناسب است و به جنس ماده ای که در داخل سیم پیچ قرار دارد بستگی دارد.

مقدار  $\frac{dI}{dt}$  را از رابطه  $I = I_m \sin \omega t$  محاسبه می کنیم و در رابطه  $E = L \frac{dI}{dt}$  قرار می دهیم

$$E = LI_m \omega \cos \omega t = LI_m \omega \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

چون  $E = E_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$  است، بنابر این  $E_m = LI_m \omega$  یا  $\frac{E_m}{I_m} = L\omega$  نسبت نیروی محرکه به شدت جریان برابر مقاومت القایی سیم پیچ است. پس

$$X_L = L\omega$$

به طوری که ملاحظه می شود بین اختلاف پتانسیل و شدت جریان اختلاف فاز ایجاد می شود و جریان از ولتاژ عقب می افتد (شکل ۷-۳۳).

اگر مقادیر مقاومت اهمی و مقاومت القایی را با بردار نمایش دهیم مقاومت در مقابل جریان، برابند این دو بردار است که آن را با  $Z_L$  نمایش می دهند و مقاومت ظاهری کل سلف می گویند

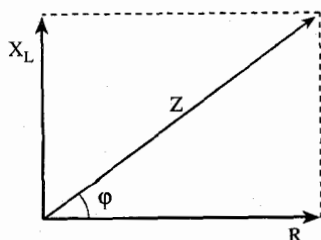
$$Z_L = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$X_L = \sqrt{Z_L^2 - R^2}$$

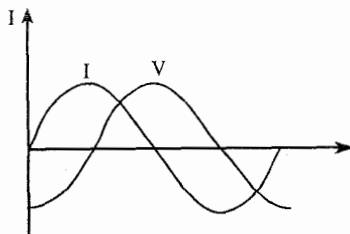
$$X_L = L\omega, \quad L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2\pi f}$$

با توجه به شکل ۷-۳۴ مقدار اختلاف فاز از رابطه  $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$  یا  $\tan \varphi = \frac{X_L}{R}$  به دست می آید.





شکل ۳۴-۷

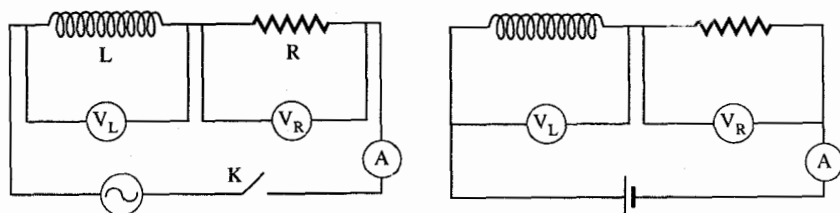


شکل ۳۳-۷

هدف آزمایش: مشاهده اثر سلف در جریانهای متناوب و اندازه‌گیریهای مربوط.

وسایل آزمایش: دو عدد سیم‌پیچ با دوره‌های مختلف - منبع تغذیه مستقیم و متناوب - مقاومت  $15\Omega$  - ولتسنج - آمپرسنج - کلید قطع و وصل - سیمهای رابط.

آزمایش الف) مطابق شکل ۷-۳۵ یک سیم‌پیچ  $15^\circ$  دور و مقاومت  $15$  اهمی را به طور متوالی به هم ببندید و دو سر آنها را یک بار به جریان مستقیم و بار دیگر به جریان متناوبی وصل کنید و در هر راه آمپرسنجی قرار دهید تا جریانی را که از آنها عبور می‌کند نشان دهد. اختلاف پتانسیل دو سر سلف و دو سر مقاومت و دو سر منبع تغذیه را اندازه بگیرید و جدول زیر را پر کنید.



شکل ۳۵-۷

I	$V_R$	$V_L$	$V_z$	$\varphi$	R	L	Z

تذکره - برای اندازه‌گیری  $\cos \varphi$  از مجموع مقاومت خارجی و مقاومت اهمی سلف استفاده کنید.

آزمایش ب) دو سلف و یک آمپرسنج و کلید قطع و وصل را به طور متوالی به یکدیگر متصل و دو سر آنها را به منبع تغذیه وصل کنید. یک بار با جریان مستقیم و با استفاده از ولتسنج مقاومت کل



# آزمایش ۷۳ خازنها

## مقدمه

هرگاه دو جسم رسانا، توسط عایقی از یکدیگر جدا شده باشند تشکیل خازن می‌دهند. دو صفحه فلزی نزدیک به هم، دو رشته سیم فاز و نول، سیم و زمین، دو کره رسانا را می‌توان خازن محسوب کرد. دو صفحه رسانا را جوشن و ماده عایق بین آنها را دی الکتریک گویند. متداولترین دی الکتریکها، هوا، شیشه، میکا، روغن و کاغذ آغشته به روغن هستند. اگر دو قطب خازنی را به پیل وصل کنیم برای مدتی کوتاه جریانی از آن عبور می‌کند و جوشنها دارای بار الکتریکی می‌شوند تا موقعی که اختلاف سطح دو سر خازن با اختلاف پتانسیل دو سر پیل مساوی شود. در آن صورت جریان به صفر می‌رسد. در این مدت مقداری بار الکتریکی روی هر یک از جوشنها جمع می‌شوند که مساوی اند ولی علامتهای مختلف دارند. اگر مولد از مدار خارج شود، بارهای ذخیره شده، جریانی در خلاف جهت جریان اولیه به وجود می‌آورند، بنابراین

خازن می‌تواند مقداری الکتریسته را در خود ذخیره کند و در موقع لزوم آن را پس بدهد. مقدار بار الکتریکی ذخیره شده با اختلاف سطح دو سر خازن متناسب است

$$q = C.V$$

که در این رابطه  $C$  را ظرفیت خازن گویند. ظرفیت خازن برحسب فاراد محاسبه می‌شود و آن ظرفیت خازنی است که اگر دو سر آن را به اختلاف سطح یک ولت وصل کنیم یک کولن الکتریسته در آن جمع شود.

چون فاراد بسیار بزرگ است واحدهای کوچکتر از آن را به کار می‌برند که عبارتند از

$$mF = 10^{-3} F \quad \text{میلی فاراد}$$

$$\mu F = 10^{-6} F \quad \text{میکرو فاراد}$$

$$nF = 10^{-9} F \quad \text{نانو فاراد}$$

$$pF = 10^{-12} F \quad \text{پیکو فاراد}$$

خازنها در الکترونیک موارد استعمال فراوانی دارند و بسته به نقشی که در مدارهای مختلف ایفا می‌کنند انواع و اشکال مختلفی پیدا می‌کنند که عبارتند از

● خازن کاغذی، در این نوع خازن، نوار کاغذی آغشته به پارافین را بین دو نوار فلزی بسیار نازک معمولاً از آلومینیم یا قلع، قرار می‌دهند و سپس روی نوار کاغذی دیگری که آن هم آغشته به پارافین است می‌گذارند و می‌پیچند تا به شکل استوانه درآید.

● خازن میکایی، صفحه‌های نازک فلزی و ورقه‌های میکا را یک در میان روی هم قرار می‌دهند به طوری که صفحه‌های فلزی یکی بیشتر از صفحه‌های میکا باشد.

● خازن شیمیایی، در مدارهایی که ظرفیت زیاد در حجم کم لازم است از خازن شیمیایی استفاده

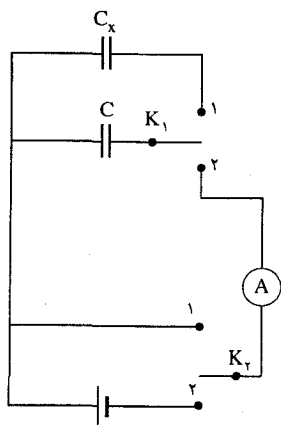
می‌شود. ساختمان آن مانند خازن کاغذی است، با این تفاوت که کاغذ دی‌الکتریک آغشته به ماده شیمیایی مخصوصی است. این خازنها دارای دو قطب مثبت و منفی مجزا هستند و در مدارهایی که جهت جریان عوض نمی‌شود به کار می‌روند و باید موقع اتصال به ولتاژ، قطبها رعایت شوند چون اگر آنها را به طور معکوس ببندیم اتصال کوتاه می‌شود و دی‌الکتریک از بین می‌رود. خازنهای شیمیایی، به نام خازنهای الکتrolیتی معروفند و علامت قطبها روی بدنه خازن حک می‌شود.

● خازن سرامیکی، در این خازنها، از یک لایه نازک سرامیک به عنوان عایق بین جوشنها استفاده می‌شود. ظرفیت این نوع خازنها، به طور نسبتاً سریعی با دما تغییر می‌کند.

● خازن متغیر، در این نوع خازنها، با چرخاندن صفحه‌های متحرک، بین صفحه‌های ثابت، سطح مؤثر صفحه‌های خازن تغییر می‌یابد و در نتیجه ظرفیت خازن تغییر پیدا می‌کند. از این رو می‌توان به طور دلخواه ظرفیت آن را از صفر تا مقدار ماکسیمم تغییر داد. این خازنها به خاطر سهولت کاربرد و استحکامی که دارند دارای موارد استعمال بسیاری هستند.

هدف آزمایش: به دست آوردن ظرفیت خازن به روشهای مختلف.

وسایل آزمایش: خازن با ظرفیتهای مختلف - آمتر - منبع تغذیه AC و DC - مولد سیگنال - کلید قطع و وصل - مقاومت معلوم - رئوستا - سیمهای رابط.

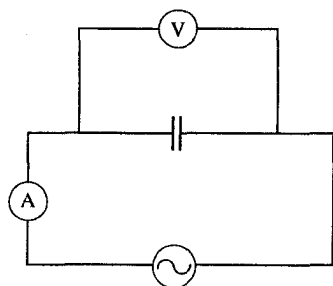


شکل ۷-۳۶

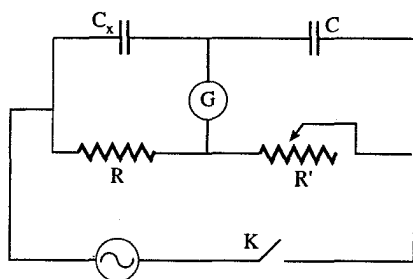
آزمایش الف) مداری مطابق شکل ۷-۳۶ تشکیل دهید و کلیدهای  $K_1$  و  $K_2$  را در وضعیت (۲) بگذارید. موقعی که جریان آمپرسنج صفر می‌شود خازن پر شده است. اتصالیهای دو سر آمپرسنج را عوض کنید و کلید  $K_2$  را در وضعیت (۱) قرار دهید و میزان حداکثر انحراف عقربه را یادداشت کنید ( $\theta_1$ ). کلید  $K_2$  را در وضعیت (۲) قرار دهید تا خازن C پر شود. بعد از آنکه خازن C کاملاً پر شد کلید  $K_1$  را در وضعیت (۱) قرار دهید تا مقداری از بار خازن C روی خازن بدون بار  $C_x$  تخلیه شود. حال اتصالیهای دو سر آمپرسنج را عوض کنید و کلید  $K_1$  را در وضعیت (۲) و  $K_2$  را در وضعیت (۱) قرار دهید تا باقیمانده بار آن از طریق آمپرسنج تخلیه شود. میزان حداکثر انحراف آمپرسنج

را در این حالت یادداشت کنید ( $\theta_2$ ) و سپس ظرفیت خازن مجهول را از رابطه  $C_x = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_2}$  به دست آورید. این روش را روش تقسیم بار گویند.

تذکره: قبل از تکرار هر آزمایش مطمئن شوید که خازن به طور کامل تخلیه شده است.



شکل ۳۸-۷



شکل ۳۷-۷

آزمایش ب) مدار را مطابق شکل ۳۷-۷ تشکیل دهید و با تغییر مقدار مقاومت متغیر  $R'$  عقربه گالوانومتر را به صفر برگردانید. در این صورت ظرفیت خازن از رابطه زیر به دست می‌آید

$$C_x = \frac{R'}{R} \cdot C$$

این روش را تعیین ظرفیت با استفاده از پل وستسن یا پل تارگویند.

آزمایش پ) مداری مطابق شکل ۳۸-۷ تشکیل دهید و با تغییر بسامد مقادیر  $V$  و  $I$  را بخوانید و پس از محاسبه  $X_c$  و  $C$  جدول مربوطه را پر کنید

$f$	$V$	$I$	$X_c = \frac{V}{I}$	$C_{\mu f} = \frac{1 \times 10^6}{2\pi f X_c}$

این روش را روش ولت - آمپر گویند.

## پرسشها

- ۱ - فرمولهای مربوط به محاسبه ظرفیت خازن را در سه روش بالا اثبات کنید.
- ۲ - در جریان مستقیم چرا جریان در لحظه اتصال حداکثر و بعد صفر می‌شود؟
- ۳ - در موقع اتصال یک خازن باردار به یک خازن بی‌بار، حرکت بارهای الکتریکی تا چه مدتی ادامه خواهند داشت؟

## آزمایش ۷۴ پر و خالی شدن خازن و به هم بستن خازنها

### مقدمه

خازن پس از پر شدن، جریان مستقیم را سد می‌کند یعنی هنگامی که در مدار جریان مستقیم قرار می‌گیرد مانند مقاومتی است که در لحظه وصل مدار، چون صفحه‌های خازن خالی از بار الکتریکی است برابر صفر است و به تدریج که بار الکتریکی در خازن جمع می‌شود، خازن برای باقیمانده گنجایش بارپذیری خود، جریان کمتری دریافت می‌دارد. در حقیقت مقاومت خازن در برابر عبور جریان افزایش می‌یابد. ادامه پر شدن خازن سبب کاهش بیشتر جریان و در نتیجه افزایش مقاومت می‌شود. موقعی که خازن کاملاً پر و صفحه‌های آن از بار الکتریکی اشباع شد، انتقال بار ادامه نمی‌یابد و جریان به صفر می‌رسد و خازن مانند یک مقاومت بی‌نهایت بزرگ عمل می‌کند.

سرعت دریافت بار الکتریکی و مدت زمانی که پر شدن خازن طول می‌کشد با دو عامل متناسب است. یکی مقدار ظرفیت خازن که هر چه بیشتر باشد، زمان لازم برای پر شدن خازن، بیشتر خواهد بود و دیگری مقدار کل مقاومتی است که در سر راه عبور جریان قرار دارد و هر چه بیشتر باشد مقدار جریان کمتر و بار انتقال یافته نیز کمتر خواهد بود. در نتیجه مدت زمان لازم برای پر شدن خازن طولانیتر می‌شود. در مورد تخلیه خازن نیز، زمان تخلیه با دو عامل  $C$  و  $R$  متناسب است. حاصل ضرب  $C$  مقدار ظرفیت و  $R$  مقاومت سر راه را ثابت زمانی خازن گویند و با حرف  $\tau$  نمایش می‌دهند

$$\tau = RC$$

هدف آزمایش: بررسی پر شدن و تخلیه خازنها و قوانین به هم بستن متوالی و موازی آنها.

وسایل آزمایش: خازن با ظرفیتهای مختلف - آمتر - زمانسنج - منبع تغذیه AC و DC - سیم رابط - کلید قطع و وصل.

به هم بستن خازنها به‌طور متوالی - به‌طوری که در شکل ۷-۳۹ مشاهده می‌شود، چند خازن به‌طور متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند و دوسر آنها به اختلاف سطح  $V$  وصل است. مقدار باری که وارد هر یک از صفحه‌های خازنها می‌شود با هم مساوی و برابر  $q$  است. ولتاژ هر یک از خازنها برابر است با

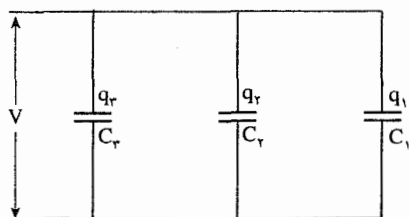
$$V_1 = \frac{q}{C_1} \quad \text{و} \quad V_2 = \frac{q}{C_2} \quad \text{و} \quad V_3 = \frac{q}{C_3}$$

چون ولتاژ کل، مساوی مجموع ولتاژهای خازنهای متصل به هم است پس

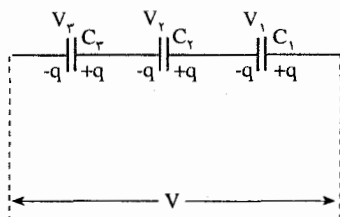
$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

با توجه به اینکه ظرفیت خازن معادل از رابطه  $V = \frac{q}{C}$  به دست می‌آید می‌توان نوشت

$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$$



شکل ۴۰-۷



شکل ۳۹-۷

و به این ترتیب برای ظرفیت معادل خواهیم داشت

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_r} + \frac{1}{C_r}$$

بنابر این ظرفیت معادل در یک مدار متوالی کمتر از کوچکترین ظرفیت موجود در مدار است.

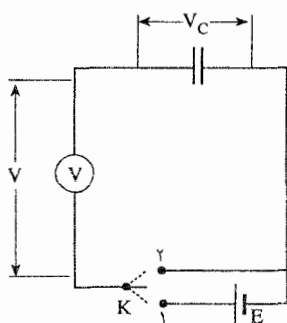
به هم بستن خازن‌ها به‌طور موازی - در شکل ۴۰ - ۷ خازن‌ها به‌طور موازی به یکدیگر بسته شده‌اند، و دو سر آنها به اختلاف سطح  $V$  متصل است. ولتاژ دو سر هر یک از خازن‌ها با هم برابرند. لذا برای هر کدام می‌توان نوشت  $q_1 = C_1 V$  و  $q_r = C_r V$  و  $q_r = C_r V$ . مقدار کل بار الکتریکی این دستگاه برابر است با

$$q = q_1 + q_r + q_r$$

یا

$$q = C_1 V + C_r V + C_r V$$

خازن معادل باید دارای بار الکتریکی و ولتاژی برابر دستگاه داشته‌باشد. بنابر این ظرفیت آن برابر است با  $C = \frac{q}{V}$  و در نتیجه  $C = C_1 + C_r + C_r$ . ظرفیت معادل در یک مدار موازی برابر است با مجموع ظرفیتهای تک‌تک خازن‌ها.

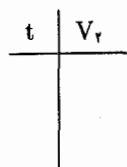


شکل ۴۱-۷

آزمایش الف) با استفاده از یک خازن الکترولیتی مداری مطابق شکل ۴۱ - ۷ تشکیل دهید. کلید  $K$  را در وضعیت (۱) بگذارید و ۲۰ ثانیه به ۲۰ ثانیه درجات ولتسنج را بخوانید و مقدار آنها را در جدول زیر یادداشت کنید. پس از پر کردن جدول، منحنی تغییرات ولتاژ را بر حسب زمان موقع پر شدن خازن رسم کنید.

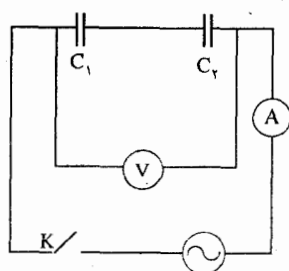
t	V	$V_C = E - V$

آزمایش ب) وقتی که خازن کاملاً پر شد کلید K را در وضعیت (۲) قرار دهید و با عوض کردن قطبهای ولتسنج آزمایش را تکرار کنید و هر ۲۰ ثانیه یک بار ولتاژ را بخوانید و در جدول ثبت کنید. منحنی نمایش تغییرات ولتاژ را بر حسب زمان موقع تخلیه خازن رسم کنید.



آزمایش پ) با استفاده از دو خازن که ظرفیت آنها معلوم است مداری مطابق شکل ۷-۴۲ تشکیل دهید. ظرفیت معادل را با استفاده از روش ولت-آمپر به دست آورید. یک بار هم ظرفیت معادل را از رابطه  $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$  محاسبه کنید. مقادیر به دست آمده برای ظرفیت معادل را با یکدیگر مقایسه و درصد خطا را از رابطه زیر پیدا کنید

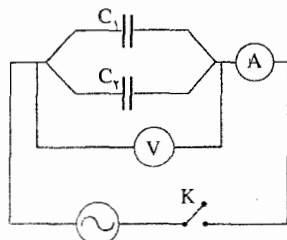
$$\%E = \frac{C - C'}{C}$$



شکل ۷-۴۲

خطا	C از راه محاسبه	C' از راه آزمایش

آزمایش ت) دو خازن با ظرفیت معلوم را به طور موازی به یکدیگر وصل کنید و مطابق شکل ۷-۴۳ مدار را تشکیل دهید. ظرفیت معادل را با استفاده از روش ولت-آمپر اندازه گیری کنید و آن را با مقداری که از راه محاسبه به وسیله فرمول  $C = C_1 + C_2$  به دست می آید مقایسه و مقدار درصد خطا را پیدا کنید.



شکل ۷-۴۳

خطا	C از راه محاسبه	C' اندازه گیری



# آزمایش ۷۵ بررسی مدارهای R-L-C

## مقدمه

موقعی که خازن در مسیر جریان متناوب قرار می‌گیرد در یک نیم‌دوره پر می‌شود و در نیم‌دوره بعدی با عوض شدن جهت جریان خالی می‌شود و در نتیجه خازن به‌طور متناوب پر و خالی شده و از مدار همواره جریان عبور می‌کند. باید دانست که جریان همزمان با ولتاژ به مقادیر ماکسیمم و مینیمم خود نمی‌رسد و بین این دو کمیت اختلاف فازی وجود دارد. حال اگر جریان متناوبی به معادله  $V = V_m \sin \omega t$  از خازن عبور کند چون  $I = \frac{dq}{dt}$  می‌توان نوشت

$$I = \frac{d(CV)}{dt} = \frac{d}{dt}(CV_m \sin \omega t)$$

یا

$$I = C\omega V_m \cos \omega t$$

مقدار  $C\omega V_m$  را با  $I_m$  نشان می‌دهیم، بنابراین  $I = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ . از مقایسه معادلات ولتاژ و جریان نتیجه می‌شود که در یک مدار شامل خازن جریان جلوتر از ولتاژ است و با آن اختلاف فازی برابر  $\frac{\pi}{2}$  دارد. رابطه  $I_m = C\omega V_m$  را می‌توان به صورت  $\frac{V_m}{I_m} = \frac{1}{C\omega}$  نوشت که با توجه به قانون اهم مقدار مقاومت خازن  $X_C = \frac{1}{C\omega}$  است که به آن مقاومت خازن در جریان متناوب یا راکتانس خازنی گویند. اگر مداری شامل مقاومت و خازن را در نظر بگیریم، در مقاومت، جریان و ولتاژ همفاز هستند، در صورتی که در خازن، این دو با یکدیگر به اندازه  $\frac{\pi}{2}$  اختلاف فاز دارند، یعنی ولتاژ دو سر مقاومت و دو سر خازن با یکدیگر به اندازه  $\frac{\pi}{2}$  اختلاف فاز دارند. ولتاژ کل مدار با توجه به شکل ۷-۴۴ از رابطه برداری زیر به دست می‌آید

$$V_Z = V_R + V_C$$

که در آن  $V_Z$  ولتاژ کل،  $V_R$  ولتاژ مقاومت و  $V_C$  ولتاژ خازن است.

$$V_Z = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} \quad \text{بنابر این}$$

چون در یک مدار متوالی، شدت جریان مقداری است ثابت بنابراین به جای ولتاژها، می‌توان مقاومتها را قرار داد، پس

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

یا

$$Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2 \omega^2}}$$

Z را مقاومت ظاهری کل مدار یا امپدانس گویند.

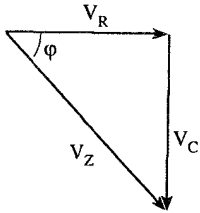
از شکل ۷-۴۴ مقدار زاویه  $\varphi$ ، اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان، نیز

به دست می‌آید

$$\tan \varphi = \frac{V_c}{V_R} = \frac{IX_c}{IR} = \frac{X_c}{R}$$

$$\tan \varphi = \frac{1}{RC\omega} \quad \text{در نتیجه}$$

$$\cos \varphi = \frac{V_R}{V_Z} = \frac{IR}{IZ} = \frac{R}{Z} \quad \text{همچنین}$$



شکل ۷-۴۴

اگر مدار شامل سلف باشد، اختلاف پتانسیل دو سر آن از رابطه  $V = L \frac{di}{dt}$  به دست می‌آید. موقعی که

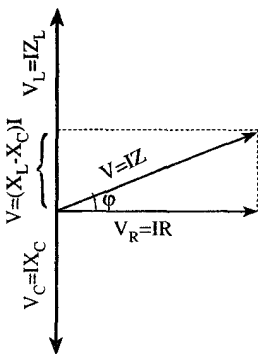
جریان متناوبی به معادله  $V = V_m \sin \omega t$  از آن می‌گذرد خواهیم داشت  $V_m \sin \omega t = L \frac{di}{dt}$  یا

$$I = \frac{1}{L} \frac{V_m}{\omega} \cos \omega t = \frac{V_m}{L\omega} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

مقدار  $\frac{V_m}{L\omega}$  را با  $I_m$  نشان می‌دهیم در نتیجه  $I = I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$ . ملاحظه می‌شود که در

سلف، ولتاژ نسبت به شدت جریان جلوتر است و به اندازه یک چهارم دوره زودتر از شدت به ماکسیمم یا صفر می‌رسد، ولی در خازن، ولتاژ نسبت به شدت عقبتر است و به اندازه ربع دوره دیرتر از شدت ماکسیمم یا صفر می‌شود.

در حالت کلی یعنی موقعی که یک مقاومت، خازن و سلف به طور متوالی قرار می‌گیرند نمودار برداری ولتاژ مطابق شکل ۷-۴۵ است. با توجه به مساوی بودن شدت جریان برای همه آنها می‌توان نوشت



شکل ۷-۴۵

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

یا

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$$

زاویه اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ از رابطه زیر به دست می‌آید

$$\tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$$

اگر  $L\omega = \frac{1}{C\omega}$  باشد مقدار R کل مقاومت اهمی با Z یعنی امپدانس مدار برابر و شدت جریان ماکسیمم می‌شود زیرا مقاومت ظاهری کمترین مقدار خود را دارد. این حالت را تشدید گویند. اگر

به جای  $\omega$  مقدارش  $2\pi f$  را قرار دهیم داشت،  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  یا  $T = 2\pi\sqrt{LC}$

هدف آزمایش : مشاهده و اندازه‌گیری اثر سلف و خازن در جریانهای متناوب .

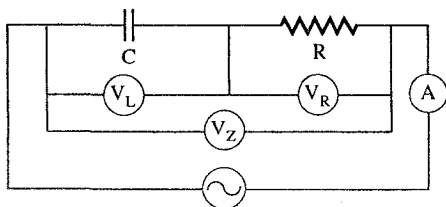
وسایل آزمایش : سیم‌پیچ با دوره‌های مختلف - خازن - مقاومت - منبع تغذیه - آمتر - کلید قطع و وصل - مولد سیگنال - سیم رابط - اسیلوسکوپ .

آزمایش الف) مداری مطابق شکل ۷-۴۶ تشکیل دهید و اختلاف پتانسیل دو سر منبع تغذیه و سلف و مقاومت را اندازه بگیرید . آمپرسنجی که به طور متوالی به این سه وسیله بسته شده است شدت جریان در مدار را نشان می‌دهد . مقادیر اندازه‌گیری شده را در جدول بنویسید و مقادیر زیر را محاسبه کنید .

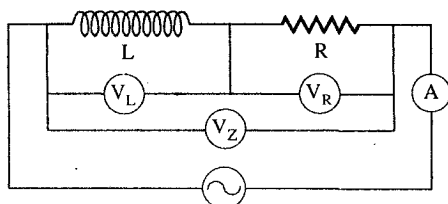
مقادیر اندازه‌گیری شده				مقادیر محاسبه شده			
$I$	$V_Z$	$V_L$	$V_R$	$\varphi$	$R$	$L$	مقاومت ظاهری
شدت جریان	دو سر مدار	دو سر سلف	دو سر مقاومت	اختلاف فاز	مقاومت اهمی سلف	ضریب خودالقایی	

آزمایش ب) مطابق شکل ۷-۴۷ منبع تغذیه و خازن و مقاومت و آمپرسنج را به طور متوالی به یکدیگر وصل کنید . شدت جریان در مدار و اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت و دو سر خازن و دو سر منبع تغذیه را بخوانید و در جدول درج کنید . مقادیر زیر را محاسبه کنید .

مقادیر اندازه‌گیری شده				مقادیر محاسبه شده		
$V_Z$	$V_R$	$V_C$	$I$	$\varphi$	$C$	$Z$



شکل ۷-۴۷



شکل ۷-۴۶

آزمایش پ) مداری شامل منبع تغذیه و آمپرسنج و سلف و خازن و مقاومت تشکیل دهید و با آمپرسنج شدت جریان در مدار را اندازه‌گیری کنید و به وسیله ولتسنج اختلاف پتانسیلهای دو سر مقاومت، دو صفحه خازن دو سر سلف و دو سر مدار را اندازه بگیرید. جدول زیر را پر و مقادیر خواسته شده را محاسبه کنید.

I	$V_R$	$V_L$	$V_C$	$V_Z$	L	C	Z	$\varphi$

آزمایش ت) دو سر مدار آزمایش بالا را به مولد سیگنال وصل کنید. بسامد دستگاه را آن قدر تغییر دهید تا  $V_L = V_C$  شود. بسامدی که دستگاه نشان می‌دهد یادداشت کنید و آن را با مقداری که از رابطه زیر به دست می‌آید مقایسه کنید

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

آزمایش ث) ولتسنجها را از مدار خارج کنید، کانال یک اسیلوسکوپ کالیبره شده را به دو سر خازن و کانال دو آن را به دو سر مولد سیگنال وصل کنید. پس از تشکیل منحنی لیسازو، مقدار اختلاف فاز را به دست آورید.

## پیوست

### مشخص کردن مقاومتها به وسیله رنگهای مختلف

مقاومت‌های الکتریکی که در مدارها به کار می‌روند به اشکال مختلفی ساخته می‌شوند. یکی از انواع مقاومتها، استوانه عایقی از جنس سرامیک یا چینی است که قشری از زغال روی آن را پوشانده است. مقدار مقاومت متناسب با ضخامت قشر زغال است که در حدود  $0.001$  تا  $10$  میکرون است. همچنین با ایجاد شیار مارپیچی روی قشر زغالی، مقدار مقاومت را بیشتر می‌کنند. دو طرف مقاومت به سیمهای مسی قلع اندود مربوطند و لایه‌ای از لاک روی مقاومت را پوشانده است. معمولاً مقدار مقاومت و حداکثر خطای ممکن آن را به وسیله رنگهای مختلفی نشان می‌دهند. مقدار مقاومت برحسب اهم است و به وسیله ۴ نوار رنگی مشخص می‌شود که به صورت یک عدد دو رقمی و مقداری صفر که در سمت راست آن است و همچنین میزان خطای مربوط تعیین می‌شود.

در مقاومت‌هایی که با نوارهای رنگی مشخص شده‌اند مجموعه این علائم دارای فواصل مساوی از دو سر مقاومت نیستند و به وضوح به یکی از دو سر آن نزدیکترند. برای تعیین مقدار مقاومت آن را باید طوری گرفت که مجموعه حلقه‌های رنگی در سمت چپ قرار گیرند.

حلقه‌های رنگی استاندارد شده و هر رنگی نماینده عددی به شرح زیر است:

رنگ نوار	عدد	رنگ نوار	عدد
سیاه	۰	سبز	۵
قهوه‌ای	۱	آبی	۶
قرمز	۲	بنفش	۷
نارنجی	۳	خاکستری	۸
زرد	۴	سفید	۹

در حلقه چهارم رنگ نقره‌ای نشان دهنده  $10\%$  و رنگ طلایی نشان دهنده  $5\%$  خطای ممکن است. اولین نوار رنگی از سمت چپ رقم اول مقاومت و دومین نوار رقم دوم و سومین نوار تعداد صفرهای جلوی این دو رقم است. نوار چهارم میزان خطاست که به صورت  $\pm\%$  نوشته می‌شود.

مثال: در مقاومتی که رنگهای آن به ترتیب قهوه‌ای، سبز، قرمز و طلایی‌اند مقدار مقاومت برابر است با

$$R = 1500 \pm 0.5\Omega$$

یا

$$R = 1500 \pm 75\Omega$$

یعنی حداقل مقاومت  $R = 1425\Omega$  و حداکثر آن  $R = 1575\Omega$  است، زیرا از سمت چپ اولین رنگ قهوه‌ای نماینده (۱) و دومین رنگ سبز نماینده (۵) و سومین رنگ قرمز نماینده دو عدد صفر است. در نتیجه مقدار مقاومت  $1500$  و چهارمین خط طلایی با میزان خطای  $0.5\%$  یعنی  $\frac{1500 \times 0.5}{100} = 7.5$  است.

تذکره- اگر مقاومتی دو رقمی باشد نوار سوم آن رنگ سیاه است که نشان می‌دهد هیچ صفری جلوی آن دو رقم گذاشته نمی‌شود.

برای تعیین مقاومت‌های کمتر از  $10^6$  اهم حلقه سوم طلایی است و ارقام اول و دوم را می‌خوانیم و در  $10^6$  ضرب می‌کنیم، مقدار مقاومت به دست می‌آید.

در مقاومت‌های کمتر از یک اهم، حلقه سوم نقره‌ای است. ارقام اول و دوم را می‌خوانیم و در  $10^3$  ضرب می‌کنیم، مقدار مقاومت به دست می‌آید.

## جدولها

جدول ۱- چگالی بعضی از مواد

ماده	$\rho, 10^3 \text{ kg/m}^3$	ماده	$\rho, 10^3 \text{ kg/m}^3$
چوب پنبه	۰/۲۴	شیشه	۲/۵۰
چوب کاج	۰/۴۸	آلومینیم	۲/۷۰
بنزین	۰/۷۰	سنگ مرمر	۲/۷۰
چوب بلوط	۰/۸۰	روی	۷/۱۴
اتانول	۰/۸۰	آهن	۷/۸۰
یخ	۰/۹۰	برنج	۸/۵۰
پارافین	۰/۹۰	مس	۸/۹۰
آب	۱/۰۰	سرب	۱۱/۴۰
گرافیت	۲/۱۰	جیوه	۱۳/۶۰
بتن	۲/۲۰	طلا	۱۹/۳۰

جدول ۲- چگالی بعضی از گازها، در شرایط متعارف

گاز	چگالی $\text{kg/m}^3$	نسبت به چگالی هوا	نسبت به چگالی هیدروژن	جرم مولکولی نسبی
هوا	۱,۲۹۳	۱	۱۴,۵	۲۹ (میانگین)
دیوکسید کربن $\text{CO}_2$	۱,۹۷۷	۱,۵۳	۲۲	۴۴
هلیوم (He)	۰,۱۷۹	۰,۱۳۹	۲	۴
هیدروژن ( $\text{H}_2$ )	۰,۰۸۹۹	۰,۰۶۹۵	۱	۲
نیتروژن ( $\text{N}_2$ )	۱,۲۵	۰,۹۶۷	۱۴	۲۸
اکسیژن ( $\text{O}_2$ )	۱,۴۳	۱,۱۱	۱۶	۳۲

جدول ۳- ضریب دمایی انبساط طولی بعضی از مواد

ماده	$\alpha, 10^{-5} \text{K}^{-1}$
آلومینیم	۲,۴
برنج	۱,۸
مس	۱,۷
شیشه، معمولی (تقریباً)	۱,۰
کوارتز	۰,۰۷
انوار (آلیاژ آهن - نیکل)	۰,۰۹
آهن	۱,۲
سرب	۲,۹
چینی	۰,۳
سوپر انوار (آلیاژ آهن - نیکل آمیخته با کرم)	۰,۰۰۳
تنگستن	۰,۴
چوب، الیاف طولی	۰,۶
الیاف عرضی	۳,۰
روی	۳,۰

جدول ۴- ضریب دمایی انبساط حجمی بعضی از مایعات

مایع	$\beta, 10^{-3} \text{K}^{-1}$	مایع	$\beta, 10^{-3} \text{K}^{-1}$
الکل	۱,۱	نفت	۱,۰
اتر	۱,۷	جیوه	۰,۱۸

جدول ۵- کشش سطحی چند مایع

مایع	دما °C	کشش سطحی، N/m
الکل	۲۰	۰٫۰۲۲
اتر	۲۵	۰٫۰۱۷
طلا (گداخته)	۱۱۳۰	۱٫۱۰۲
هیدروژن مایع	-۲۵۳	۰٫۰۰۲۱
هلیوم مایع	-۲۶۹	۰٫۰۰۰۱۲
جیوه	۲۰	۰٫۴۷۰
آب خالص	۲۰	۰٫۰۷۲۵
محلول آب صابون	۲۰	۰٫۰۴۰

جدول ۶- بستگی کشش سطحی آب به دما

دما، °C	کشش سطحی، N/m	دما، °C	کشش سطحی، N/m
۰	۰٫۰۷۵۶	۵۰	۰٫۰۶۷۹
۲۰	۰٫۰۷۲۵	۱۰۰	۰٫۰۵۸۸

جدول ۷- ضریب شکست بعضی اجسام نسبت به هوا

مایع	جامد	n	جسم
دی سولفات کربن	۱٫۶۳۲	الماس	۲٫۴۱۷
الکل اتیلیک (اتانول)	۱٫۳۶۲	شیشه (فلینت سنگین)*	۱٫۸۰
گلیسرین	۱٫۴۷	شیشه (کراون سبک)*	۱٫۵۷
هلیوم مایع	۱٫۰۲۸	یخ	۱٫۳۱
هیدروژن مایع	۱٫۱۲	یاقوت	۱٫۷۶
آب	۱٫۳۳۳	قد	۱٫۵۶

\* کراون و فلینت از انواع شیشه نوری هستند.



جدول ۸- ضریبهای شکست مواد مختلف به صورت تابعی از طول موج

طول موج $\lambda$ بر حسب mm (رنگ)	ضریب شکست			آب
	شیشه کراون	دی سولفید کربن	شیشه فلینت	
۶۵۶,۳ (قرمز)	۱,۶۴۴۴	۱,۵۱۴۵	۱,۶۲۱۹	۱,۳۳۱۱
۵۸۹,۳ (زرد)	۱,۶۴۹۹	۱,۵۱۷۰	۱,۶۳۰۸	۱,۳۳۳۰
۴۸۱,۱ (آبی)	۱,۶۶۵۷	۱,۵۲۳۰	۱,۶۷۹۹	۱,۳۳۷۱
۴۰۴,۷ (بنفش)	۱,۶۸۵۲	۱,۵۳۱۸	۱,۶۹۹۰	۱,۳۴۲۸

جدول ۹- گرمای ویژه چند جسم

ماده	c, kJ/(kg.K)	ماده	c, kJ/(kg.K)
آلومینیم	۰,۸۸۰	سرب در $۲۵۹^{\circ}\text{C}$	۰,۰۳۲
هوا (انبساط آزاد)	۱,۰۱۰	در $۲۰^{\circ}\text{C}$	۰,۱۳۰
پنبه نسوز	۰,۲۱۰	در $۳۰۰^{\circ}\text{C}$	۰,۱۴۳
برنج	۰,۳۹۰	جیوه	۰,۱۲۶
آجر	۰,۸۴۰	چوب کاج	۲,۵۲۰
مس در $۱۶۳^{\circ}\text{C}$	۰,۲۸۰	شن	۰,۸۴۰
در $۲۰^{\circ}\text{C}$	۰,۳۸۰	گوگرد	۰,۷۱۰
شیشه	۰,۸۴۰	آب در $۲۰^{\circ}\text{C}$	۴,۱۸۰
یخ در $۰^{\circ}\text{C}$	۲,۱۰۰	در $۹۰^{\circ}\text{C}$	۴,۲۲۰
آهن	۰,۴۶۰		

جدول ۱۰- رسانندگی گرمایی چند ماده

ماده	$\lambda$ , W/(m.K)	ماده	$\lambda$ , W/(m.K)
هوا	۰,۰۲۵	هیدروژن	۰,۱۸
آلومینیم	۲۱۰	آهن	۶۰
برنج	۱۱۰	سرب	۳۴
آجر	۱,۲۵	آب	۰,۶۳
مس	۳۸۵	چوب، الیاف طولی	۰,۲۹
شیشه	۰,۸۵	الیاف عرضی	۰,۱۷

جدول ۱۱- نقطه ذوب چند ماده

نقطه ذوب °C	ماده	نقطه ذوب °C	ماده
۲۳۲	قلع	۱۰۸۴	مس
۳۳۷۰	تنگستن	۱۰۶۳	طلا
	آب	۱۵۳۵	آهن
۴۱۹	روی	۳۲۷	سرب
		-۳۹	جیوه

جدول ۱۲- گرمای نهان ذوب چند ماده

$L_f$ , kJ/kg	ماده	$L_f$ , kJ/kg	ماده
۲۳/۱	سرب	۲۱۴	مس
۱۱/۸	جیوه	۳۳۴	یخ
		۲۷۰	آهن

جدول ۱۳- نقطه جوش بعضی از مایعات در ۷۶۰ mmHg

نقطه جوش °C	مایع	نقطه جوش °C	مایع
۷۸	الکل	-۲۶۹	هلیوم مایع
۱۰۰	آب	-۲۵۳	هیدروژن مایع
۳۵۷	جیوه	-۱۸۳	اکسیژن مایع
۹۰۶	روی مذاب	-۱۹۶	ازت مایع
۲۸۸۰	آهن مذاب	-۳۴	کلر
		۳۵	اتر

جدول ۱۴- گرمای نهان تبخیر بعضی مایعات

$\lambda$ , kJ/kg	جسم	$\lambda$ , kJ/kg	جسم
۲۸۵	جیوه	۹۱۰	الکل (اتانول)
۳۰۲۰	قلع	۵۴۲۰	مس
۲۲۵۰	آب	۳۷۳	اتر
		۶۳۵۰	آهن

جدول ۱۵- مقاومت ویژه و کمتهای وابسته برای بعضی از اجسام در دمای °C

جسم	$\rho, \Omega.m$	$R, \Omega/m$	$\sigma = 1/\rho, S/m$
نقره (خالص شیمیایی)	$1,47 \times 10^{-8}$	$0,0187$	$6,8 \times 10^7$
مس (خالص شیمیایی)	$1,55 \times 10^{-8}$	$0,0197$	$4,45 \times 10^7$
مس (صنعتی)	$1,7 \times 10^{-8}$	$0,0216$	$5,9 \times 10^7$
آلومینیم	$2,5 \times 10^{-8}$	$0,0318$	$4,0 \times 10^7$
تنگستن	$5,3 \times 10^{-8}$	$0,0673$	$1,9 \times 10^7$
پلاتین	$9,8 \times 10^{-8}$	$0,125$	$1,0 \times 10^7$
آهن (خالص شیمیایی)	$9,60 \times 10^{-8}$	$0,122$	$1,04 \times 10^7$
آهن (صنعتی)	$12 \times 10^{-8}$	$0,153$	$8,3 \times 10^6$
سرب	$20 \times 10^{-8}$	$0,254$	$5,0 \times 10^6$
نیکلین (آلیاژ Cu-Ni-Mn)	$40 \times 10^{-8}$	$0,51$	$2,5 \times 10^6$
منگانی (آلیاژ Cu-Ni-Mn)	$43 \times 10^{-8}$	$0,55$	$2,3 \times 10^6$
کنستانتان (آلیاژ Cu-Ni)	$50 \times 10^{-8}$	$0,63$	$2,0 \times 10^6$
جیوه	$94,1 \times 10^{-8}$		$1,06 \times 10^6$
نیکرم (آلیاژ Ni-Cr)	$110 \times 10^{-8}$	$1,4$	$9,1 \times 10^5$
اسیدسولفوریک (محلول ۱۰٪)	$0,026$		۳۸
نمک معمولی (محلول ۱۰٪)	$0,083$		۱۲
سولفات مس (محلول ۱۰٪)	$0,0315$		$3,17$
چوب	$10^6$		$10^{-6}$
مرمر	$5 \times 10^7$		$2 \times 10^8$
کوارتز (مذاب)	$5 \times 10^{16}$		$2 \times 10^{-17}$

جدول ۱۶- مقدار میانگین ضریب دمایی مقاومت برای بعضی رساناها (در فاصله دمایی از ۰ تا °C ۱۰۰).

جسم	$\alpha_m, 10^{-2} K^{-1}$	جسم	$\alpha_m, 10^{-2} K^{-1}$
آهن	۶,۶	جیوه	۰,۸۸
تنگستن	۴,۸	نیکلین	۰,۳۰
مس	۴,۳	نیکرم	۰,۱۳
نقره	۴,۱	کنستانتان	۰,۰۴
پلاتین	۳,۹	منگانی	۰,۰۲