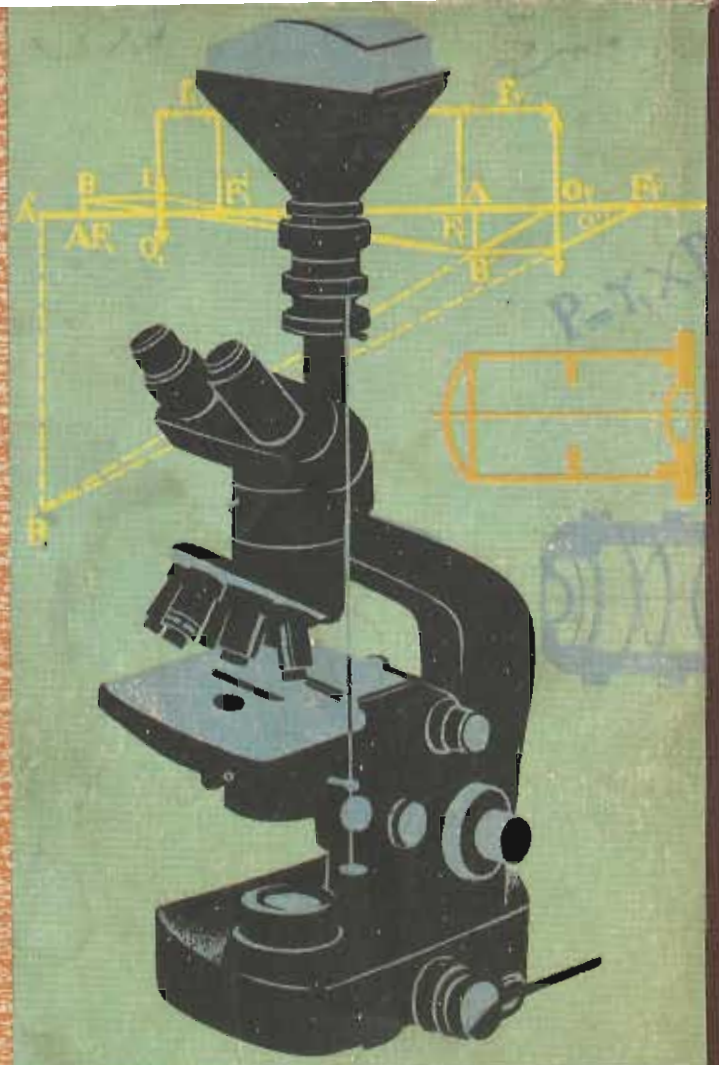


فیزیک

برای سال پنجم طبیعی و ریاضی

توانا بود هر که دانا بود
وزارت آموزش و پرورش

شرکت سهامی طبع و نشر کتابهای درسی ایران

بها در تمام کشور ۲۸ ریال

توانا بود هرکه دانا بود

وزارت آموزش و پرورش

فیزیک

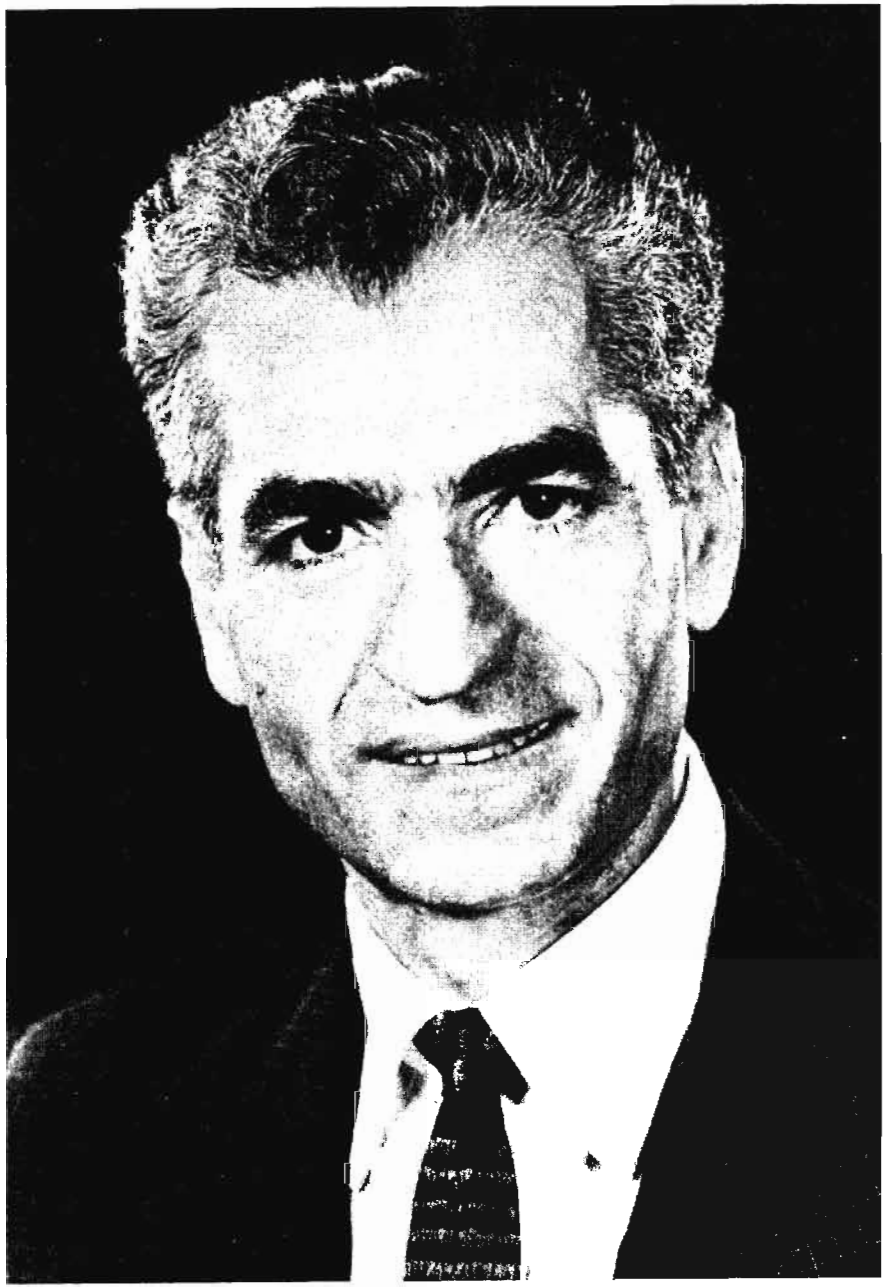
برای سال پنجم طبیعی و ریاضی

حق چاپ محفوظ

چاپ و توزیع از :

شرکت سهامی طبع و نشر کتابهای درسی ایران

۱۳۴۸



این کتاب که به وسیلهٔ آقایان : عبدالحمید اردلان - دکترجعفرامین - پرویز رهبر - دکتر ابراهیم صفری نگارش یافته ، بر طبق مادهٔ ۳ قانون کتابهای درسی و اساسنامهٔ سازمان کتابهای درسی ایران برای تدریس در دبیرستانها برگزیده شده است .

چاپ از : تهرانمصور

کتاب یکی از ارکان اصلی آموزش و پرورش در اجتماع کنونی بشری است. هر دانش پژوه که خواهان حل مشکل یا درك حقیقتی باشد، از مصاحبت کتاب و توسّل بدین وسیلهٔ مطمئن و مشاور مؤتمن ناگزیر است.

دانش‌آموزان با استعانت از کتاب می‌توانند به جهان بیکران علم دسترسی یابند و سرمایهٔ لازم برای رفاه حال خویش و تعالی جامعهٔ خود کسب کنند.

وزارت آموزش و پرورش مساعی خویش را بکار می‌برد تا برای استفادهٔ دانش‌آموزان کتابهایی عرضه کند که با پیشرفتهای علمی و فنّی جهان مترقّی امروز هماهنگ و بر اساس جدیدترین اصول آموزش و پرورش تنظیم شده باشد.

نباید از نظر دورداشت که با وسعت دامنهٔ علوم در جهان امروز، هر اندازه کتب درسی جامع و کامل تهیّه شده باشد کافی برای تجهیز علمی جوانان نیست و دانش‌آموزان گرامی نباید مطالعات خود را به این کتب محدود سازند، بلکه باید با راهنمایی معلّمان خویش در ساعات فراغت به مطالعهٔ کتاب در کنار دروس خود بپردازند و اوقات عزیز خویش را برایگان از کف ندهند.

بر محقّقان و مؤلّفان کشور فرض است که در راه تهیّهٔ اینگونه کتابها بکوشند. بخصوص در این عصر مترقّی که به ارادهٔ شاهنشاه آریا مهر و در سایهٔ انقلاب ششم بهمن ماه **۱۳۴۱** و با اجرای طرح سپاه دانش، اهالی نقاط دورافتادهٔ مملکت نیز از نعمت سواد برخوردار گردیده و هر روز بر عدهٔ افراد کتابخوان کشور افزوده می‌شود فرصت را غنیمت شمرند و به تألیف کتابهایی مفید در رشته‌های مختلف علوم و فنون و ادب بپردازند و از این راه به پیشرفت فرهنگ و علوم و رشد اقتصادی کشور خدمتی ارزنده بنمایند.

وزیر آموزش و پرورش ــ دکتر فرخ‌رو پارسای

فهرست مندرجات

عنوان	صفحه
بخش اول ـ نور هندسی	
فصل اول ـ انتشار نور	۲
فصل دوم ـ انعکاس نور	۲۷
۱ ـ آینه‌های تخت و قوانین انعکاس	۳۰
۲ ـ آینه‌های کروی	۴۳
فصل سوم ـ شکست نور	۶۶
دیوپتر تخت ـ تیغهٔ متوازی‌السطوح	۸۳
منشور	۸۹
تجزیهٔ نور	۹۸
فصل چهارم ـ عدسیها	۱۱۴
همگرایی عدسیها	۱۳۱
فصل پنجم ـ چشم	۱۴۱
چشم و معایب آن	۱۴۱
فصل ششم ـ دستگاههای نوری	۱۵۴
ذره‌بین	۱۵۴
میکروسکوپ	۱۶۱
دوربینها	۱۶۹
پروژکتور و سینما	۱۷۷
بخش دوم ـ الکتریسیته و مغناطیس	
فصل اول ـ الکتریسیتهٔ ساکن	۱۸۶
تولید الکتریسیتهٔ ساکن	۱۸۸
توزیع الکتریسیته برسطح اجسام	۲۰۳
الکتریسیتهٔ جوی	۲۰۶
فصل دوم ـ الکتریسیتهٔ جاری	۲۰۸
مقدار الکتریسیته	۲۱۰

عنوان	صفحه
فصل سوم ـ آثار شیمیایی جریان الکتریسیته	۲۱۴
الکترولیز	۲۱۴
قوانین کیفی الکترولیز	۲۱۵
قوانین کمی الکترولیز ـ قوانین فاراده	۲۲۱
فصل چهارم ـ مولدهای شیمیایی پیلها	۲۲۷
	۲۲۷
فصل پنجم ـ مقاومت الکتریکی	۲۴۱
فصل ششم ـ آثار گرمایی جریان	۲۴۹
قانون ژول	۲۴۹
معادل مکانیکی کالری	۲۵۲
موارد استعمال اثر گرمایی جریان	۲۵۴
پدیدهٔ ترموالکتریك	۲۶۲
فصل هفتم ـ اختلاف سطح الکتریکی و قوانین اهم	۲۶۵
اختلاف سطح الکتریکی	۲۶۵
قوانین اهم	۲۶۷
فصل هشتم ـ مدارهای انشعابی	۲۸۵
قوانین کیرشوف	۲۹۰
بهم بستن پیلها	۲۹۳
فصل نهم ـ اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی	۲۹۸
فصل دهم ـ مغناطیس	۳۰۶

عنوان	صفحه
خواص عمومی آهنربا	۳۰۶
فرضیهٔ آهنربایی	۳۱۵
میدان مغناطیسی	۳۱۷
میدان مغناطیسی زمین	۳۲۱
زاویه‌های انحراف و میل ـ جهاتیابی	۳۲۳
فصل یازدهم ـ آثار مغناطیسی جریان	۳۲۸
میدان مغناطیسی جریان	۳۳۰
اثر میدان مغناطیسی برجریان برق	۳۳۶
فصل دوازدهم ـ آهنربای الکتریکی یا الکترواهان	۳۴۲
قابلیت نفوذ مغناطیسی	۳۴۲
فصل سیزدهم ـ اسبابهای اندازه‌گیری	۳۴۸
گالوانومتر	۳۴۸
آمپرسنج	۳۵۲
ولت‌سنج	۳۵۳
اهم‌سنج	۳۵۳
وات‌سنج	۳۵۴
کنتور برق	۳۵۵
ضمیمه	۳۵۷
مسائل متفرقه	۳۵۹

بخش اول

نور هندسی

لطفاً این غلط چاپی را تصحیح فرمایید :

صفحه	سطر	غلط	صحیح
۲۱۶	ماقبل آخر	$\frac{0}{2}\times 0$	$+0$

بنام خدا

فصل اول

انتشار نور

نور و روشنایی از قدیم یکی از اسرار طبیعت برای بشر بوده و در ادوار گذشته نظریات مختلفی در بارهٔ نور و ماهیت آن ذکر شده است. نور چیست؟... این سؤال همواره فکر بشرمخصوصاً دانشمندان را به‌خود معطوف داشته است.

تا اواخر قرن شانزدهم علمای فیزیك اطلاعاتی در بارهٔ انعکاس و انکسار نور گردآوری کرده بودند. درآن زمان از خواص عدسیها برای ساختن عینك و دوربین و میکروسکوپ استفاده می‌کردند. حتی روشهایی نیز برای تعیین سرعت نور پیدا کرده بودند و با اینکه این روشها چندان دقیق و نتایج آن قابل اعتماد نبود، نشان می‌دهد که دانشمندان در این رشته از علم فیزیك به چه پیشرفتهایی نایل آمده بودند.

در بارهٔ چگونگی انتشار نور نظریات مختلفی اظهار شده است‌که هرکدام کمابیش بعضی از مشکلات ومسائل مربوط به‌نور را حل می‌کند. در اینجا قبل از آنکه به‌ذکر این نظریات بپردازیم مختصری در بارهٔ منابع نورانی خواهیم گفت.

منابع نورانی ـ هرجسمی که نور تابش‌کند منبع نورانی نامیده می‌شود.

جسم منیرـ اگر منبع نورانی خودش نور مرئی تابش کند آن را **منیر** گویند، مانند خورشید، چراغ روشن، ستارگان، . . .

نور مرئی نوری است‌که سلولهای عصبی چشم به آن حساس است؛ به عبارت دیگر نور مرئی نوری است که بر روی سلولهای عصبی چشم اثر می‌کند که نتیجهٔ آن همان بینایی است.

اگر قطعه آهنی را در کوره گرم کنیم مشاهده خواهیم کرد که چون دمای آن به حدود $500^{\circ}C$ رسید، سرخ می‌شود (نور سرخ تابش می‌کند). در واقع، قطعهٔ آهن، مقداری از انرژی حرارتی را، که از کوره گرفته است، به انرژی تابشی مرئی تبدیل می‌کند. چنین تابشی را تابش حرارتی می‌نامند. امروز می‌دانیم‌که اجسام در هر دمایی‌که باشند انرژی تابش می‌کنند. این که همهٔ اجسام منیر نیستند ازآن جهت است که تابش‌آنها از نور مرئی نیست. هرچه دمای جسمی را بالاتر بریم تابش آن به نور مرئی نزدیکتر می‌شود تا اینکه در حدود 500° سرخ می‌شود و اگر دما را بازهم بالاتر بریم، رنگ تابش آن رفته رفته به‌زرد وسفید می‌گراید. از روی رنگ نور تابش یافته می‌توان دمای جسم را اندازه گرفت. دانشمندان با بکار بردن این روش دمای قسمت خارجی خورشید را 6000° تعیین کرده‌اند (دمای قسمت داخلی آن چند میلیون درجه است). دمای سیم ملتهب چراغهای الکتریکی در حدود 2500° است.

جسم مستنیرـ اگر منبع نورانی خودش نور مرئی تابش نکند بلکه از منابع نورکسب روشنایی‌کند، آن را مستنیرگویند، مانند ماه،

سیارات ، سنگها ، ... اینگونه اجسام تا درمقابل منبع نور قرار نگیرند دیده نمی‌شوند زیرا **لازم است که نقاط مختلف جسم در برابر منبع نور روشن شوند و از آن نقاط نور کافی به‌چشم برسد تا بتوان آن جسم را دید.** چنانکه هنگام شب فقط اجسامی دیده می‌شوند که در مقابل نور باشند . ماه کرهٔ سرد شده‌ای است که از خود نور مرئی ندارد و از خورشید کسب نور می‌کند و به نظر روشن می‌رسد .

نقطهٔ نورانی ـ تصور نقطهٔ نورانی درفیزیك اهمیت بسیار دارد . عملاً تهیهٔ یك نقطهٔ نورانی غیرممکن‌است؛ اما اگر ابعاد منبع نورکوچك باشد ، یا منبع نور به فاصلهٔ بسیار زیادی از چشم قرارگیرد ، بطوری که چشم آن را به‌صورت یك نقطه تشخیص دهد، می‌توان آن منبع‌را یك‌نقطهٔ نورانی نامید . برای آنکه یك نقطهٔ نورانی داشته باشیم می‌توان یك منبع نور قوی را درپشت پرده‌ای قرار داد و براین پرده سوراخ کوچکی تعبیه کرد. نوری‌که از آن سوراخ به بیرون می‌تابد بنظر می‌رسدکه ازیك نقطه تابش می‌شود .

نظریات مختلف در بارهٔ انتشار نور ـ بکار بردن ساعتهای آفتابی و استفاده از نصف‌النهار برای تعیین ظهر وسایر ساعتهای روزنشان می‌دهد که در زمانهای بسیار قدیم مردم متوجه شده بودند که **نور ، دریك محیط یکنواخت ، به خط مستقیم سیر می‌کند .**

مشاهدهٔ باریکه‌ای از نور خورشید که از سوراخهای‌کوچك وارد اتاق می‌شود این فکر را تقویت می‌کند. بااستفاده از همین خاصیت است که می‌توان با چشم ، مستقیم بودن جاده یا خطی را تحقیق‌کرد .

تشکیل سایه و نیمسایه ، خسوف وکسوف ، اهلهٔ قمر را می‌توان با فرض سیر مستقیم نور توجیه کرد .

دکارت دانشمند وفیلسوف بزرگ فرانسوی درحدود ۱۶۳۵میلادی قوانین نور را براساس سیر مستقیم نور پیدا کرد ، و بسیاری از مسائلی را حل کرد که امروز در دوربینها و میکروسکوپ و دستگاه عکاسی مورد استفاده قرار می‌گیرند . با این وصف هیچ جوابی به اینکه ماهیت نور چیست ، داده نشده بود .

با پیشرفت علم و اختراع وسایل دقیق اندازه‌گیری ، رفته رفته دانشمندان به‌پدیده‌هایی برخوردندکه با نظریهٔ قبل، یعنی اینکه سیر نور مستقیم است ، نمی‌توانست توجیه شود و علت و چگونگی آنها معلوم گردد. مثلاً اگر جسم‌کدری را درمقابل یك منبع نور نگاه داریم ، سایهٔ جسم در پشت آن بر روی پرده‌ای تشکیل می‌شود ، لیکن اگر در مقابل یك منبع پر نور شکاف باریکی قرار دهیم وجسم کدر را تار مویی اختیار کنیم ، برخلاف انتظار، سایه‌ای ازمو برروی پرده مشاهده نمی‌شود، بلکه به‌جای یك خط تاریك، خطوط موازی تاریك و روشنی موازی تار مو بر روی پرده تشکیل می‌شود . یا اگر درمقابل منبع نور صفحه‌ای قرار دهیم که دو شکاف بسیار باریك در آن باشد ، انتظار می‌رود که اشعهٔ نور پس از عبور از شکافها دو خط روشن بر روی پرده بیندازد ، لیکن در عمل برروی پرده خطوط تاریك و روشن تشکیل می‌شود (شکل ۱) .

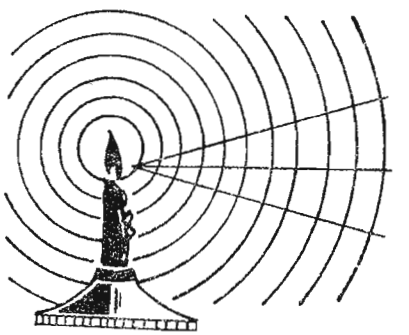
شکل ۱

همه متوجه شده‌اید هنگامی که قطره‌ای نفت بر روی آب ریخته

می‌شود برسطح آب طیفی رنگین پدید می‌آید . همین طیف در حبابهای کف صابون نیز بنظر می‌رسد . علت پیدایش نوارهای تاریك و روشن یا طیف رنگین روی‌آب و نظایرآن بردانشمندان مجهول بود و نظریهٔ سیر مستقیم نور نمی‌توانست آن را جواب گوید . از این‌رو دانشمندان برای بیان علت وچگونگی این پدیده‌ها به‌نظریه‌های دیگری احتیاج داشتند.

نیوتن دانشمند عالیقدر انگلیسی (۱۶۴۳-۱۷۲۷) طرفدار این نظریه بود که **نور سیلی است از ذرات بسیار کوچك** که ازمنبع نور باسرعت زیاد مانند گلوله‌هایی به اطراف پرتاب می‌شود . این دانشمند با نبوغ خارق‌العادهٔ خود توانست با این نظریه بسیاری ازمسائل ومشکلات زمان خود را در بارهٔ نور تشریح کند . لیکن این نظریه در مراحل اولیه با اشکالاتی مواجه شد و نظریهٔ دیگری جانشین آن گردید .

درسال ۱۶۷۸ **هویگنس**[1] دانشمند هلندی ، رساله‌ای انتشار داد که درآن نظریهٔ جدیدی را به نام **نظریهٔ موجی نور** مطرح می‌کرد .

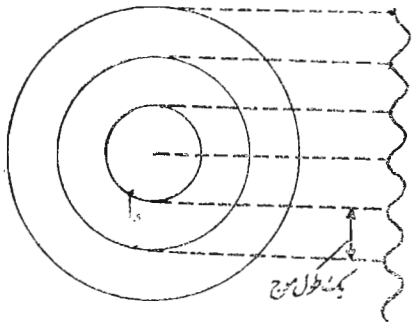

شکل ۲

نظریهٔ موجی نور بر این پایه استوار است‌که **نور نیز مانند صوت به‌صورت امواج کروی از منبع نور به اطراف پخش می‌شود** (شکل۲).

برای فهم حرکت موجی و طول موج ، نخست امواج آب را مطالعه می‌کنیم . فرض کنیم‌که بر یك نقطه ازسطح آب یك ضربه وارد آوریم . ازاین نقطه موجی به‌شکل

۱ - Huyghens

دایره تشکیل می‌شودکه رفته‌رفته شعاع آن بزرگ شده وپس‌از طی مسافت زیادی از میان می‌رود (شکل ۳) .



شکل ۳

اکنون فرض کنیم که دوضربهٔ متوالی به‌فاصلهٔ مثلاً نیم ثانیه برآب واردآوریم. بر اثر هر ضربه ، یك موج دایره‌ای تشکیل می‌شود و چون‌دایرهٔ اول مثلاً یك متر بازشد (شعاع یك‌متر)، دایرهٔ دوم تولید می‌شود و دنبال آن می‌رود . لیکن بین دو دایره همیشه فاصلهٔ ثابت یك متر باقی می‌ماند . به‌همین ترتیب اگر ضربه‌های یکنواختی پی‌درپی برآب واردکنیم، دوایرمتحدالمرکزی تولید می‌شود که به‌فواصل مساوی دنبال یکدیگرحرکت می‌کنند و بر روی آب برجستگیها و فرو-رفتگیهایی تولید می‌نمایند که درشکل ۳ نمایش داده شده است . بنا به تعریف، فاصلهٔ دو دایره (دوموج) یادوبرجستگی را **طول موج** می‌نامند.

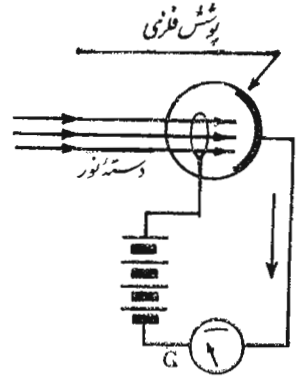
نظریهٔ موجی بودن نور چنان محکم و مستدل **بیان شده** بود که امروز هم مورد قبول دانشمندان است و بسیاری از مسائل مربوط به نور باآن حل و تعبیر می‌شود ، لیکن در آن زمان ایرادهایی بر این نظریه گرفته می‌شد ، مثلاً اینکه برای انتقال امواج محیط مادی لازم است ، چنانکه امواج صوتی درخلأ منتقل نمی‌شوند و برای انتقال‌آن وجود هوا یا گاز یا جسم دیگری لازم است .

دانشمندان آن زمان تصور می‌کردند که انتقال امواج نوری هم ،

که ازخورشید به زمین می‌رسد ، محتاج به یك محیط مادی است. ازاین رو یك محیط واسطهٔ فرضی به نام **اِتِر** تصور کردند که فضای خالی بین منبع نور و اشیای اطراف را پرکرده و امواج نور به‌وسیلهٔ آن ازنقطه‌ای به نقطهٔ دیگر انتقال می‌یابد .

لیکن این اشکال بعدها از میان رفت و معلوم شد که برای انتقال امواج نور واسطه‌ای لازم نیست و این امواج می‌توانند از خلأ هم عبور کنند . در نتیجه فرضیهٔ وجود اِتِر هم کنار گذاشته شد .

نظریهٔ موجی نور به وسیلهٔ دانشمندان دیگری از قبیل **یانگ**[1] و **فرنل**[2] تحقیق وتأیید شد تا اینکه پدیده‌های دیگری کشف شدکه بسیار مبهم و شگفت‌انگیز می‌نمودند . یکی‌از این پدیده‌ها ، که اساس سینمای ناطق و تلویزیون و نورسنج عکاسی و بسیاری دیگر از وسایل دقیق علمی امروز برآن استوار شده ، این است که هرگاه اشعهٔ نوربه‌پاره‌ای ازفلزات‌مانند فلزات قلیایی بتابد ، از این فلزات الکترونهایی به بیرون پرتاب می‌شود که می‌توانند منشأ جریان برق ضعیفی بشوند(شکل۴). این‌پدیده به‌نام‌پدیدهٔ **فوتوالکتریك** موسوم است .



شکل ۴

این پدیده با فرض موجی نور قابل توجیه نیست . تحقیقات بسیار

۱ - Young ۲ - Fresnel

وسیع و پردامنه‌ای در این زمینه بعمل آمد و سرانجام دانشمندان از آن جمله **اَینْشتَین** ، بر این عقیده شدندکه **نور به‌صورت ذرات ریزی از منبع روشنایی به اطراف منتشر می‌شود** . این ذرات را **فوتون**[1] نام نهادند. هر ذره مقداری انرژی همراه خود دارد وهمین انرژی ذرات است که در پدیدهٔ فوتوالکتریك تبدیل به‌انرژی الکتریکی می‌شود .

از بیان مطالب فوق معلوم می‌شود که چگونه در علوم نظریه‌های مختلف پدید آمده و تکامل می‌یابند و چگونه دانشمندان برای تعبیر و تفسیرپدیده‌های طبیعی مجبور به بیان یك نظریه و تحقیق در بارهٔ نتایج آن می‌شوند .

امروز دانشمندان بدین نتیجهٔ شگفت‌انگیز رسیده‌اند که فرضیه‌های موجی بودن و ذره‌ای بودن نور، گرچه ظاهراً ناسازگارند، در واقع مکمل ولازم و ملزوم یکدیگرند . برخی از خواص نور یا هرذرهٔ دیگر مانند الکترون را می‌توان با خاصیت موجی بودن و برخی دیگر را با خاصیت ذره‌ای بودن تشریح کرد .

آنچه امسال در این برنامه مورد مطالعه قرار خواهیم داد شامل آن قسمت از قضایا و مسائل نور است که با فرض سیر مستقیم نور حل و تشریح می‌شود . به‌همین علت این مبحث نور را **نور هندسی** می‌نامند.

شعاع نورانی ـ دسته اشعهٔ نورانی ـ هر مسیر مستقیمی را که نور طی می‌کند ، **شعاع نورانی** می‌گویند .

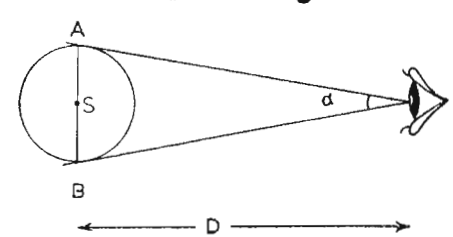
شعاع نورانی را به وسیلهٔ یك خط نشان می‌دهند که بر آن خط یك یا چند پیکان به‌منظور نشان دادن سوی انتشار نور رسم شده است .

۱ - Photon

هرچه شیء را از چشم دورتر کنیم قطر ظاهری آن کوچکتر می‌شود . وقتی که قطر ظاهری شیء از حد معینی کمتر شد چشم دیگر نمی‌تواند آن شیء را بطور وضوح تشخیص دهد . مثلاً اگر شمع روشنی را به فاصلهٔ ۱۰۰ متری از چشم قرار دهیم ، چشم آن را به صورت یك نقطهٔ نورانی تشخیص می‌دهد .

تجربه نشان داده است که بطور متوسط هر گاه قطر ظاهری یك جسم کمتر از یك دقیقه ($\frac{۳}{۱۰۰۰۰}$ رادیان) باشد ، چشم سالم نمی‌تواند جزئیات آن جسم را تشخیص دهد و آن جسم را به صورت یك نقطه می‌بیند . بنابراین نقطهٔ نورانی از نظرچشم عبارت از منبع نورانیی است که قطر ظاهری آن در حدود یك دقیقه باشد .

مثال ـ فاصلهٔ زمین تا خورشید تقریباً $۱۵۰\times۱۰^{۶}\text{km}$ است . قطر خورشید تقریباً برابر است با $۱/۴\times۱۰^{۶}\text{km}$. قطر ظاهری خورشید که از زمین دیده می‌شود چقدر است ؟



شکل ۹

حل ـ چون زاویهٔ α (شکل ۹) کوچك است :

$$\alpha=\frac{AB}{D}$$

$$\alpha=\frac{۱/۴\times۱۰^{۶}}{۱۵۰\times۱۰^{۶}}=\frac{۱۴}{۱۵۰۰}$$

قطر ظاهری خورشید برحسب رادیان : $\alpha\neq۰/۰۱\text{rd}$

$$\alpha=۰/۰۱\times\frac{۳۶۰}{۲\pi}\times۶۰$$

قطر ظاهری خورشید برحسب دقیقه : $\alpha\neq۳۲'$

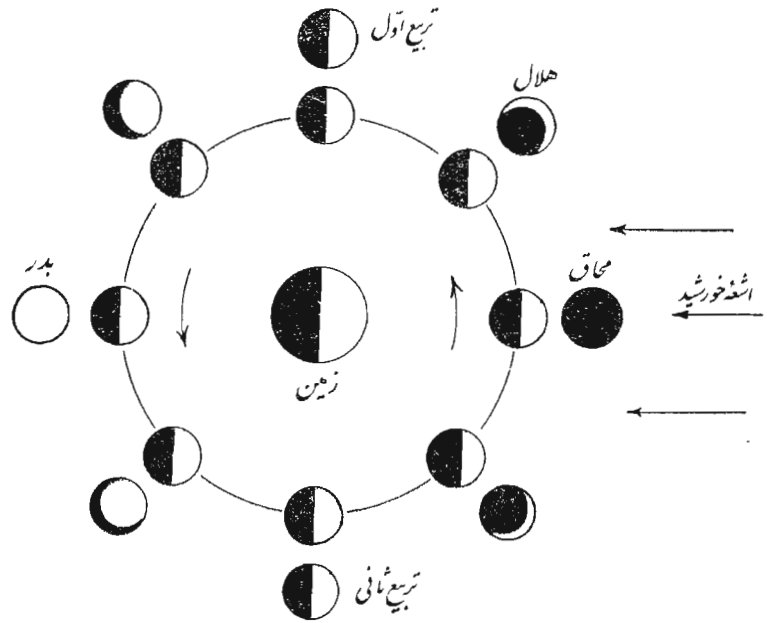
تبصرهٔ ۳ ـ درآزمایشهایی‌که با نورخورشید (یایکی ازستارگان دور دست) انجام می‌گیرد معمولاً باریکه‌ای از اشعه مورد استفاده است. این باریکه را عملاً می‌توان یك دسته اشعهٔ متوازی دانست .

اجسام‌کدر ، شفاف ، و نیم‌شفاف ـ اجسامی مانند چوب و سنگ و صفحات فلزی که نور اصلاً از آنها عبور نمی‌کند **اجسام کدر** نام دارند . برعکس اجسام دیگری مانند شیشه وهوا ، که نوربخوبی ازآنها عبور می‌کند و می‌توان ازپشت آنها اشیا را دید و تشخیص داد ، **اجسام شفاف** نام یافته‌اند . بین این دو دسته ، اجسامی یافت می‌شود مانند شیشهٔ مات یا کاغذ آلوده به‌روغن که نور از آنها کمابیش عبور می‌کند لیکن نمی‌توان از ورای آنها اجسام را بخوبی تشخیص داد وگاهی فقط پیرامون جسم را می‌توان مشاهده کرد . اینگونه اجسام را **نیم‌شفاف** می‌نامند .

باید دانست که اگر از اجسام کدر صفحات بسیار نازك تهیه شود ، نور از آنها عبور می‌کند و تقریباً نیم‌شفاف می‌شوند . مثلاً اگر از پشت ورقه‌های بسیار نازك طلا به‌خورشید نگاه کنیم ، قرص خورشید به‌رنگ بنفش دیده می‌شود .

سایه و نیمسایه ـ تشکیل سایه ونیمسایه یکی ازمشاهداتی است که با فرض سیر مستقیم نور تشریح می‌شود . در شکلهای زیر سیر مستقیم اشعهٔ نور علت تشکیل سایه و نیمسایه را آشکار می‌کند ، زیرا لبهٔ سایه و

می‌دانیم که وضع خورشید و ماه همواره نسبت به زمین یکسان نمی‌ماند و به‌علت حرکت ماه به‌دور زمین و حرکت زمین به‌دور خورشید این وضع نسبی هر لحظه تغییر می‌کند. نتیجه این است که در حرکت ظاهری شبانه‌روزی، که خورشید وماه به‌دور زمین می‌کنند، بنظر می‌رسد که ماه از خورشید اندکی کندتر حرکت می‌کند، بطوری‌که هر روز تقریباً یك ساعت، و در ۲۹ روز و نیم یك روز عقب می‌افتد. اکنون فرض کنیم



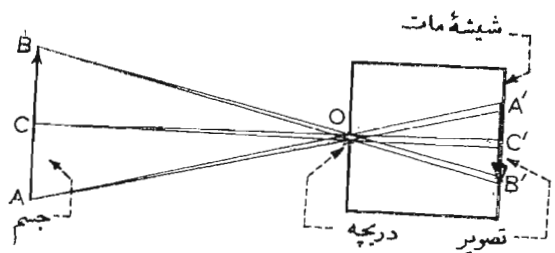
شکل ۱۴ ـ اهلهٔ قمر

که ماه درافق تقریباً بین زمین وخورشید باشد. قسمت تاریك آن متوجه زمین خواهد بود وچیزی از آن از زمین دیده نمی‌شود (محاق، شکل ۱۴). پس از یك روز، هنگامی که خورشید به افق مغرب می‌رسد ماه هنوز به افق نرسیده است. آن وقت، گرچه همواره نیمی از ماه روشن است، **فقط**

باریکه‌ای از این نیمهٔ روشن ماه در زمین مرئی است (هلال). در روزهای بعد، که رفته رفته عقب‌افتادگی ماه بیشتر می‌شود، قسمت بزرگتری از نیمکرهٔ روشن آن دیده می‌شود، وپس از یك هفته، هنگام غروب خورشید، ماه تقریباً در نصف‌النهار محل است و شش ساعت از خورشید عقب مانده است. در این وضع نیمی از آن برای زمین مرئی است (تربیع). تقریبا پس از یك هفتهٔ دیگر، هنگامی که زمین در فاصلهٔ بین خورشید و ماه قرار می‌گیرد، نیمهٔ روشن ماه مقابل زمین واقع می‌شود و تمام قرص ماه روشن بنظر می‌رسد (بدر). از این پس سطح روشن ماه درجهت عکس کم می‌شود تا در محاق فرو رود.

معمولاً در روزهای اول و آخر ماه، قسمت تاریك ماه نیمه روشن دیده می‌شود واین به‌سبب نوری است که از زمین به ماه منعکس می‌شود.

اتاق تاریك (دستگاه عکاسی ساده) ـ جعبه‌ای مقوایی تهیه کنید که یك دیوارهٔ آن یك ورقهٔ کاغذ نیم‌شفاف یا شیشهٔ مات باشد، دروسط دیوارهٔ مقابل این ورقه یك سوراخ ریز به قطر حدود یك میلیمتر ایجاد کنید.



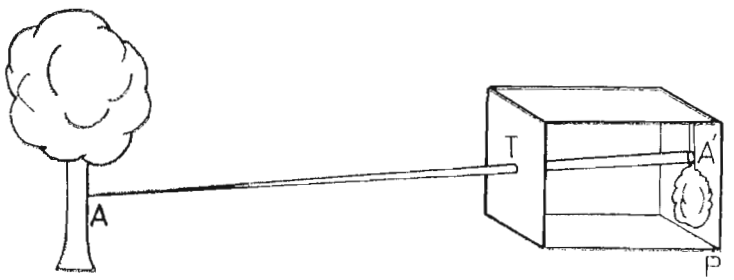
شکل ۱۵

اگر جسم روشنی را مقابل سوراخ بگذارید، **عکس** آن بطور معکوس (تصویر معکوس) بر روی شیشهٔ مات مشاهده می‌شود (شکل ۱۵). می‌توان

به جای این صفحه یك شیشه یا فیلم عکاسی گذاشته و عکسبرداری کرد . هرچه سوراخ ریزتر باشد ، عکس واضح‌تر است .

این آزمایش نیز نشان می‌دهد که نور بطور مستقیم از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر می‌رود .

مثال ـ در یك اتاق تاریك فاصلهٔ دریچه تا شیشهٔ مات برابر است با ۱۵cm . در ۹متری این اتاق و درمقابل دریچه درختی است به‌ارتفاع ۴متر .



شکل ۱۶

طول تصویر این درخت بر روی شیشهٔ مات چقدر است ؟

حل ـ جسم وتصویرش متشابهند (شکلهای ۱۵و۱۶) . می‌توان نوشت :

$$\frac{\text{فاصلهٔ دریچه تا شیشهٔ مات}}{\text{فاصلهٔ دریچه تا جسم}} = \frac{\text{طول تصویر}}{\text{طول جسم}}$$

$$\text{طول تصویر} = ۴۰۰ \times \frac{۱۵}{۹۰۰} = ۶/۷\text{cm}$$

یعنی طول‌تصویراین درخت برروی شیشهٔ مات برابر۶/۷سانتیمتراست.

شدت نور و روشنایی ـ یکی‌ازمطالب مهمی‌که دربارهٔ چراغها و منابع مختلف نورکه برای روشن‌کردن منازل وساختمانها بکار می‌روند باید بررسی شود، شدت نور هرمنبع نور است. این قسمت ازفیزیك امروز رشتهٔ مخصوصی ازعلم فیزیك را تشکیل می‌دهد . درقدیم مهمترین منبع

نور، خورشید بوده ومردم کمتر از منابع مصنوعی نور استفاده می‌کردند. مهمترین وسیلهٔ روشنایی مصنوعی‌آن ایام شمع بوده است .

موقعی‌که دانشمندان مطالعهٔ شدت نور را از راه علمی‌آغازکردند، هنوز شمع یکی از وسایل اصلی روشنایی بشمار می‌آمد و به همین سبب شدت شمع معینی را واحد سنجش اختیارکردند[1] وشدت نورمنابع مختلف راباآن سنجیدند. لیکن امروز واحد ثابت‌تری اختیارکرده‌اند. این‌واحد **شدت نوری است‌که ازیك سانتیمترمربع پلاتین در دمای‌گداز بطورعمود بتابد.** این شدت ۶۰ برابر شدت نور یك شمع است .

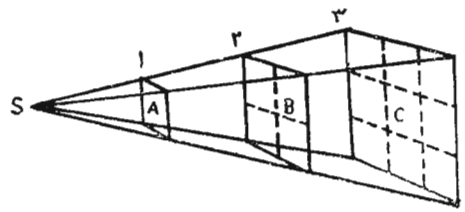
روشنایی دریك نقطه ـ یك منبع نور را درنظر بگیریم . از این منبع در هر ثانیه مقداری انرژی نوری تابش و در فضا منتشر و پخش می‌شود . آشکار است که این انرژی ، هرچه ازمنبع نور دورتر شود ، در فضای بیشتری پخش می‌شود وبه‌زبان ساده ، رقیق‌ترمی‌شود . در اصطلاح علمی‌گوییم که روشنایی‌کمتر می‌شود . بنا به‌تعریف ، **روشنایی در یك نقطه** متناسب با مقداری انرژی نور است که در واحد زمان بر واحد سطح عمود برمسیر نور درآن نقطه می‌تابد[2] . اگرجسمی را در این نقطه بگذاریم روشن می‌شود ، و آشکار است که هرچه روشنایی در این نقطه بیشتر باشد جسم روشن‌تردیده می‌شود. باید متوجه‌بودکه شدت نور یك منبع و روشنایی‌که این منبع دریك نقطه ایجاد می‌کند، دوچیزمتفاوت هستند

۱ـ شمعی که شدت آن را واحد اختیار کرده‌اند شمعی است به قطر ۲ سانتیمترکه در هر ساعت ۷/۷۷۶گرم موم بسوزاند .

۲ـ اطلاعات بیشتری دربارهٔ شدت نور در ضمیمهٔ آخر کتاب تهیه شده است .

ونباید این دو را باهم اشتباه‌کرد . شدت نور یك منبع فقط بستگی به‌خود منبع دارد در حالی که روشنایی در یك نقطه بستگی به وضع این نقطه نیز دارد. مثلاً اگرشدت منبع ثابت باشد هرچه ازآن دورشویم روشنایی کمتر می‌شود. اکنون ببینیم روشنایی دریك نقطه چه بستگی باشدت نور منبع و وضع این نقطه دارد .

آزمایش ـ درمقابل نقطهٔ نورانی S ، صفحه‌ای ازمقوا بگذارید (صفحهٔ A) و فاصلهٔ آن را از نقطهٔ S تعیین کنید . سپس صفحهٔ مقوایی دیگری مانند صفحهٔ B را درپشت صفحهٔ A و به موازات‌آن چنان قرار دهیدکه فاصله‌اش ازنقطهٔ نورانی S دو برابر فاصلهٔ صفحهٔ A از آن نقطه



شکل ۱۷

باشد . ابعاد صفحهٔ B را چنان اختیار کنید که به‌اندازهٔ ابعاد سایهٔ A دراین مکان باشد (شکل ۱۷). حال اگر ورقهٔ A را برداشته به جای آن دریچه‌ای به همان ابعاد قرار دهیم ، همان نوری که به ورقهٔ A می‌تابید این بار به‌ورقهٔ B تابیده آن را روشن می‌کند ، وچون نور به‌خط راست منتشرمی‌شود وسطح ورقهٔ B چهار برابرسطح ورقهٔ A است (چون فاصله دوبرابر است) ، مقدار نور یا انرژی نوری که بریك دسیمترمربع صفحهٔ A می‌تابید اکنون برچهاردسیمترمربع درصفحهٔ B پخش‌می‌شود. درنتیجه روشنایی درنقطهٔ B به اندازهٔ $\frac{۱}{۴}$ روشنایی در نقطهٔ A است .

به همین طریق اگر صفحهٔ B را برداشته و در C ، به فاصلهٔ سه برابر فاصلهٔ A تا S ، قرار دهیم ، سطح روشن ۹ برابر ومقدار روشنایی $\frac{۱}{۹}$ روشنایی A خواهد شد .

آشکار است که هرگاه محل صفحهٔ A ثابت بماند لیکن شدت نور منبع دو یا سه یا چند برابر شود ، روشنایی در نقطهٔ A نیز به‌همان نسبت زیاد می‌شود. از این‌رو نتیجه می‌گیریم‌که : **روشنایی در هر نقطه متناسب است با شدت نور منبع نور و عکس مجذور فاصلهٔ آن نقطه از منبع نور .**

هرگاه شدت نور را با I و فاصلهٔ نقطه را تا منبع نور با d نشان دهیم ، خواهیم داشت:

$$E = K\frac{I}{d^۲}$$

E عبارت از مقدار روشنایی در نقطهٔ مفروض است و واحد آن را طوری اختیار کرده‌اند که $K = ۱$ شود . واحد روشنایی **لوکس**[۱] نامیده می‌شود و آن **روشنایی یك شمع در فاصلهٔ یك متر است .**

علامت اختصاری شمع cd و علامت اختصاری لوکس lx است .

مثال ـ شدت نور یك چراغ ۲۰۰ شمع است وجسمی به‌فاصلهٔ ۵ متری آن قرار دارد . روشنایی درآنجا چقدر است ؟

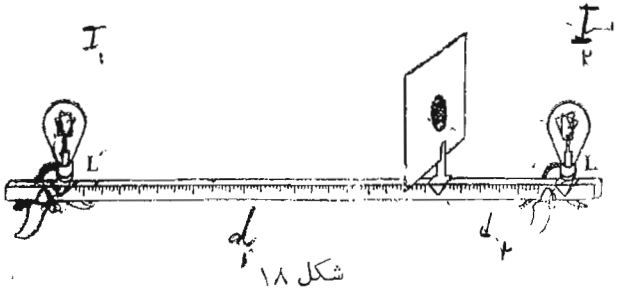
$$E = \frac{I}{d^۲} = \frac{۲۰۰}{۲۵} = ۸\,lx$$

طرز اندازه‌گرفتن شدت نور یك منبع (نورسنجی یا فوتومتری)

برای اندازه گرفتن شدت نور یك چراغ ، باید آن را با چراغ دیگری‌که شدتش معلوم است مقایسه‌کرد. ساده‌ترین روش آن است‌که بر

۱ - Lux

روی یك ورقهٔ کاغذ یا مقوای نازك، یك قطره روغن یا پارافین می‌گذارند تا لکهٔ نیم شفافی بدست آید ، سپس این ورقه را مطابق شکل ۱۸ روی یك خط‌کش مدرج بین دو چراغ L و L′ گذاشته و آن را آنقدرجابجا



شکل ۱۸

می‌کنند تا لکهٔ روغن از نظر ناپدید شود . آن وقت روشنایی هردوچراغ بر صفحهٔ کاغذ یکسان است و از رابطهٔ زیر که تساوی روشنایی چراغها را بر روی کاغذ نشان می‌دهد ، شدت L نسبت به L′ بدست می‌آید :

$$E = \frac{\text{شدت چراغ } L'}{\text{مجذور فاصله}} = \frac{\text{شدت چراغ } L}{\text{مجذور فاصله}}$$

وقتی‌که یك ورقهٔ لکه‌دار را بین یك چراغ و چشم خود قرار دهید، لکهٔ روغن روشن‌تر از بقیهٔ کاغذ دیده می‌شود، زیرا ازآن لکه نوربیشتری خارج می‌شود ، درصورتی که اگر ورقه را در مقابل یك چراغ ، طوری نگاه دارید که نور پس از انعکاس به چشم برسد ، لکه تارتر از اطراف بنظر می‌رسد زیرا تمام نور را منعکس نمی‌کند . اما اگر صفحه را مانند آزمایش بالا میان دو چراغ L و L′ جایی نگه دارید که روشنایی دو چراغ در آنجا یکسان باشد ، هر مقدار از نور چراغ L که از لکه به آن طرف می‌گذرد درست همانقدر از نور چراغ L′ به این طرف آمده به نور منعکس شده اضافه می‌شود ، در نتیجه نوری که از لکه به چشم

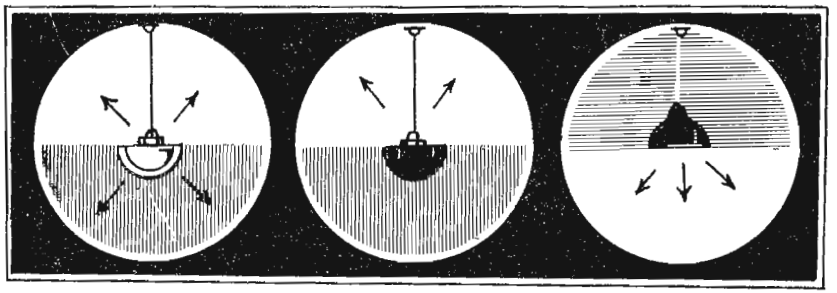
می‌تابد درست برابر با نوری می‌شودکه از جاهای دیگر کاغذ منعکس شده است . این است‌که لکه ناپدید می‌شود .

مثال ـ هرگاه چراغ L شدتش ۲۰ شمع و فاصله‌اش از ورقهٔ کاغذ ۲۵ سانتیمتر و فاصلهٔ چراغ L′ از ورقه (هنگام ناپدید شدن لکه) ۱۰ سانتیمتر باشد ، خواهیم داشت :

$$\frac{۲۰}{۲۵} = \frac{I'}{۱۰۰}$$

$$I' = ۸۰ \text{ شمع}$$

روشنایی مناسب ـ مطالعاتی‌که در روشن‌کردن منازل وتهیهٔ نور مناسب برای‌کارهای مختلف بعمل‌آمده ، نشان داده است‌که بهترین روش از لحاظ راحتی و بهداشت چشم، روشنایی غیرمستقیم یا پخش شده است. نباید تصور کرد که مثلاً برای خواندن یا انجام کارهای دقیق ، هرچه روشنایی زیادتر باشد بهتراست . شك نیست‌که برای‌کارهای دقیق ومداوم روشنایی کافی لازم است ، لیکن تنها روشنایی زیاد راحتی کار چشم را تأمین نمی‌کند بلکه اولاً باید روشنایی در قسمتهای مختلف جسم مورد کار ، یکنواخت باشد ثانیاً بین روشنایی درسطح این جسم و اطراف آن، اختلاف نباید خیلی زیاد باشد(شکل ۱۹) . نور مستقیم‌گرچه با صرفه‌تر است ، عموماً به‌سبب تابش بر روی سطوح صاف و صیقلی ایجاد انعکاس منظم می‌کند.و این انعکاس‌که معمولاً آن را برق می‌گوییم، چشم‌را خسته می‌کند . برای جلوگیری از این‌کیفیت حتی‌المقدور از نور غیرمستقیم یا نیمه مستقیم استفاده می‌کنند (شکل ۱۹). برای این منظور، یا چراغها را طوری درکنار دیوارمخفی می‌کنندکه نورآنها پس از برخورد به‌دیوارها



شکل ۱۹

و سقف اتاق پخش شده ، همه‌جا را یکنواخت روشن‌کند ، یا اینکه دور چراغ را با حبابهای مات و نیم‌شفاف می‌پوشانند تا از تابش نورمستقیم به قسمت پایین اتاق جلوگیری شود .

پرسش و مسئله

۱ـ درختی به‌طول ۶ متردر ۳۰۰ متری ناظری واقع است. این درخت تحت چه قطرظاهری مشاهده می‌شود؟ قطرظاهری آن‌را برحسب رادیان ودقیقه تعیین کنید . جواب : ۰/۰۲rd

۲ـ می‌خواهیم از درخت مسئلهٔ بالا ، به‌کمك اتاق تاریك عکسبرداری کنیم . عمق اتاق تاریك (فاصلهٔ دریچه تا شیشهٔ مات) چقدر باشد تا طول تصویر ۵mm شود ؟ جواب : ۲۵cm

۳ـ دریك اتاق تاریك فاصلهٔ دریچه تا شیشهٔ مات برابراست با ۱۲cm . در ۱۵۰ متری دریچهٔ این اتاق و درمقابل آن برجی است به ارتفاع ۳۰ متر. طول تصویر این برج بر روی شیشهٔ مات چقدر است ؟ جواب : ۲/۴cm

۴ـ فاصلهٔ زمین تا ماه برابر است با ۳۸۲۰۰۰km . فاصلهٔ دو نقطه از سطح ماه را پیدا کنید که چشم می‌تواند آن دو نقطه را از هم تمیز دهد . حداقل قطرظاهری دو نقطه‌ای‌که چشم می‌تواند آنها را از هم تمیز دهد برابر است با ۰/۰۰۰۳ رادیان . جواب : ۱۱۵km

۵ـ اتاق تاریکی است به عمق ۱۰cm که دارای دریچه‌ای مدور است به قطر ۱mm . نقطه‌ای نورانی به فاصلهٔ D متراز دریچه روی محوری واقع شده است‌که عمود برسطح شیشهٔ مات است . قطر لکهٔ نورانیی‌که برشیشهٔ مات تشکیل می‌شود چقدر است ؟ نشان دهید که قطر این لکه نمی‌تواند کمتر از ۱mm شود .

۶ـ سطح قرصی به قطر ۵cm بر اشعهٔ خورشید عمود است . در پشت قرص و در ۶۰ سانتیمتری از آن پرده‌ای به موازات سطح قرص آویزان می‌کنیم . به‌فرض‌آنکه قطرظاهری خورشیدکه از زمین دیده می‌شود ۳۲ دقیقه باشد مطلوب است :

۱ ـ قطر دایرهٔ سایه ؛

۲ ـ قطر دایرهٔ نیمسایه . جواب : ۴/۴cm ، ۵/۶cm

۷ـ هرگاه شدت نور یك منبع دوبرابر و درعین حال فاصلهٔ صفحه نیز از آن دو برابر شود ، آیا روشنایی بر روی این صفحه تغییر می‌کند ؟

۸ـ آیاکارکردن برروی یك میز صاف و براق برای چشم راحت‌تراست یا بر روی میزی‌که سطح آن از پارچهٔ تیره‌ای پوشیده شده باشد ؟

۹ـ مقدار روشنایی را که از یك چراغ بریك کتاب می‌تابد ، هنگامی که کتاب در فواصل ۱ و ۲ و ۳ متری چراغ قرار دارد ، مقایسه کنید .

۱۰ـ مقدار روشنایی بر سطح یك کتاب که در فاصلهٔ ۲ متری از یك چراغ قرار دارد، مساوی ۴۰ لوکس است . اگراین‌کتاب را به‌فاصلهٔ ۵متری از چراغ ببریم روشنایی بر سطح آن چقدر می‌شود ؟

۱۱ـ شدت نورچراغی ۱۰۰ شمع است . روشنایی‌آن درفاصلهٔ ۲متری چقدر است ؟

۱۲ـ فاصلهٔ زمین وزهره ازخورشید بترتیب $۱۰^۶ \times ۱۵۰$ و $۱۰^۶ \times ۱۰۷$ کیلومتر است . نسبت روشنایی برسطح این دو سیاره را بدست‌آورید .

۱۳ـ برای قرائت راحت یك کتاب ، ۴۰ لوکس روشنایی لازم است . اگر چراغ در ۴ متری سطح کتاب باشد ، شدت نور چراغ را تعیین‌کنید .

۱۴ـ صفحه‌ای در ۲ متری یك منبع نور به شدت ۵۰ شمع قرار دارد. هرگاه این صفحه با امتداد اشعه ، زاویهٔ ۶۰° بسازد ، روشن شدگی بر سطح آن چقدراست (روشن شدگی متناسب است با کسینوس زاویهٔ بین امتداد شعاع و عمود برصفحه و با روشنایی درآن نقطه) ؟

۱۵ـ برای تعیین شدت نور چراغ **A** آن را به‌فاصلهٔ ۶۰ سانتیمتر از کاغذی که بطور قائم قرار دارد و در روی آن یك لکهٔ چربی می‌باشد می‌نهیم . در طرف دیگر کاغذ لامپ روشن **B** را که شدت نور آن ۴۵ شمع است جابجا می‌کنیم . مشاهده می‌شود که هنگامی‌که این چراغ به‌فاصلهٔ ۲۵ سانتیمتری از کاغذ می‌رسد لکهٔ چربی محو می‌شود . شدت نور چراغ **A** را تعیین کنید .

جواب : ۲۵۹/۲cd

۱۶ـ چراغی به شدت نور ۶۵ شمع را به‌فاصلهٔ ۳۲ سانتیمتر ازچوبی که بطور قائم در یك صفحهٔ افقی نصب شده است قرار می‌دهند . چراغی دیگر که شدت نور آن مجهول است در همان صفحهٔ افقی می‌تواند جابجا شود . مشاهده می‌شود که هنگامی که این چراغ به فاصلهٔ ۴۸ سانتیمتری می‌رسد ، سایه‌های حاصل از دوچراغ بردوی صفحه تقریباً دارای یك روشنایی می‌باشند. شدت نور چراغ فوق را تعیین‌کنید .

جواب : ۱۳۵cd

فصل دوم

انعکاس نور

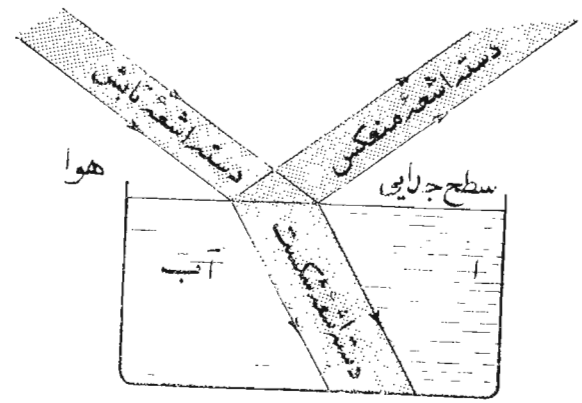
تاکنون دانستیم که نور در یك محیط یکنواخت به خط مستقیم سیر می‌کند . اکنون می‌خواهیم بدانیم که اگر یك دسته اشعهٔ نوری به سطح جدایی دو محیط مختلف برخورد کند چه اتفاقی خواهد افتاد .

آزمایش ـ طشتکی بلوری را انتخاب وآن را پر ازآب می‌کنیم. به‌آب این طشتك مقدارکمی فلوئورسئین می‌افزاییم . افزودن فلوئورسئین به‌آب به‌منظور آن است که بتوانیم مسیر نور را با چشم مشاهده کنیم . درحقیقت ذرات این ماده درآب همان عملی را انجام می‌دهند که گرد و غبار موجود در هوا ، به‌هنگام تابیدن نور به‌داخل اتاق، انجام می‌دهند. در صورتی که فلوئورسئین موجود نباشد می‌توان طشتك را از آب صابون پر کرد .

سپس یك دسته اشعهٔ متوازی را بطور مایل به سطح آب می‌تابانیم. این دسته اشعه را **اشعهٔ تابش** می‌نامند . مشاهده می‌کنیم که ، در سطح جدایی دومحیط (هوا ـ آب) ، اشعهٔ تابش به دو دسته اشعهٔ متوازی دیگر تجزیه می‌شود (شکل ۲۰) :

یك دسته اشعه در امتداد معینی به‌همان محیط اول (هوا) باز

می‌گردد . این پدیده را در فیزیك **انعکاس** و اشعهٔ بازگشته را **اشعهٔ منعکس** می‌نامند .



شکل ۲۰

دستهٔ دیگر در امتداد معینی وارد آب می‌شود . این پدیده را **شکست** می‌نامند .

بدیهی است که هرگاه یك دسته اشعهٔ نوری به سطح جدایی دو محیط برسد پدیده‌های انعکاس وشکست با هم ودریك زمان اتفاق می‌افتد. توزیع نور در دسته اشعهٔ منعکس و دسته اشعهٔ شکست بستگی به عوامل متعددی دارد :

الف ـ طبیعت دومحیط مجاور ـ فلزات تقریباً تمام نور را در هوا برمی‌گردانند . می‌گوییم که قدرت انعکاس فلزات زیاد است .

ب ـ زاویه‌ای‌که دسته اشعهٔ تابش با سطح جدایی دومحیط می‌سازد ـ برای موادی مانند آب ، شیشه و غیره که مجاور با هوا هستند قدرت انعکاس بسیار کم است و به مقیاس وسیعی بستگی دارد به زاویه‌ای که تحت آن نور به سطح جدایی می‌تابد . اگر نوربطور مماس برسطح بتابد

تقریباً تمام آن منعکس می‌شود و اگر بطور عمود بر سطح بتابد تقریباً تمام آن شکست پیدا می‌کند .

پخش نور ـ بطوری که خواهیم دید سطوح صیقلی ، یك دسته اشعهٔ نوری معین را فقط در یك امتداد معین منعکس می‌کند در صورتی که سطوح ناصاف و صیقلی نشده آن را در امتدادهای مختلف می‌فرستد . مثلاً یك صفحه کاغذ روزنامه، گرچه به نظر صاف می‌رسد ، ناهمواریهای بسیار کوچکی دارد که باعث می‌شود نور در همهٔ امتدادها انعکاس یابد (شکل ۲۱) . این طریقهٔ انعکاسهای نامنظم نور را پخش نور می‌نامند .

شکل ۲۱

باید دانست که رؤیت اجسام بر اثر همین نور پخش شده است که بطور یکنواخت از آن اشیا به چشم می‌رسد . کاغذهای بسیار صیقلی از همین جهت برای خواندن مناسب نیستند ، چه برقی که بر اثر انعکاس منظم نور در اینگونه کاغذها پدید می‌آید چشم را خسته و ناراحت می‌کند .

نورمستقیم و نور غیرمستقیم ـ نباید تصور کرد که جسم باید کاملاً در مقابل اشعهٔ نور قرارگیرد تا دیده شود . نوری که از منابع نور انتشار می‌یابد ممکن است بطور مستقیم یا غیرمستقیم اشیا را روشن کند. مثلاً اگر جسمی را در آفتاب بگذاریم روشن می‌شود . در اینجا جسم بطور مستقیم از منبع نورکسب روشنایی نموده است ، لیکن هنگام روز،

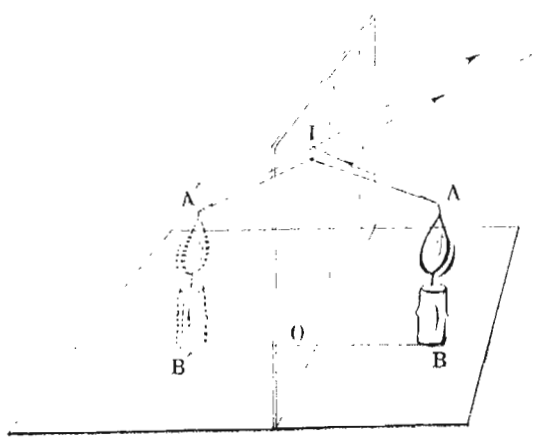
گرچه نورخورشید مستقیماً به داخل اتاق نمی‌تابد، همه جای اتاق روشن است ، **این روشنایی یکنواخت که بطور غیرمستقیم** همه‌جا را روشن می‌کند از انعکاسات مختلف نور بر روی در و دیوار و مولکولهای هوا و ذرات گرد وغبار معلق درآن بوجود می‌آید . شك نیست‌که شدت این نورکمتر از نور مستقیم است .

۱ ـ آینه‌های تخت و توابین انعکاس

تعریف ـ هرسطح صیقلی و مسطح را آینهٔ تخت می‌گویند. آینهٔ تخت نور را منعکس می‌کند .

سطح‌آزاد مایعاتی‌که به حال تعادل هستند ، سطح صیقلی فلزات ، تیغهٔ شیشه‌ای و غیره تشکیل آینهٔ تخت می‌دهند .

آزمایش اساسی انعکاس ـ دو شمع مشابه اختیار کرده یکی را روشن کنید و در مقابل شیشهٔ قائمی قرار دهید (شکل ۲۲) . شمع دیگر راپشت‌شیشه بگذارید. حال اگر از جلو به شیشه نگاه‌کنید، شمع خاموش و نیز تصویر شمع‌روشن‌را می‌بینید. درحالی که به این دو نگاه می‌کنید، شمع خاموش را آنقدر جابجا کنید تا با تصویر شمع روشن کاملاً در یك‌جا دیده شود . در این



شکل ۲۲

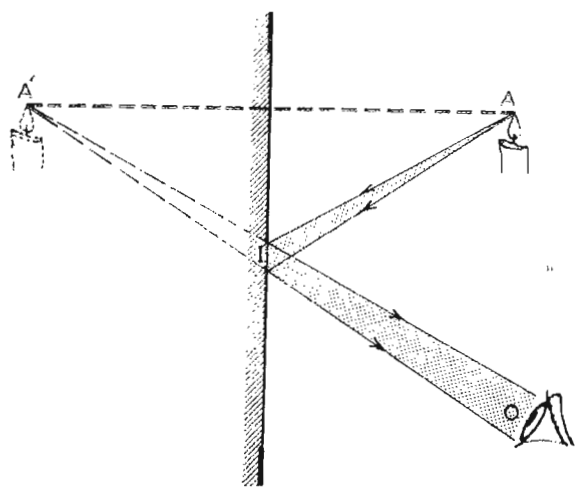
وضع بنظر می‌رسدکه شمع خاموش نیز روشن است. بایك خط‌کش مدرج فاصلهٔ هریك ازشمعها را تا تیغهٔ شیشه‌ای اندازه بگیرید. مشاهده می‌کنید که این دو فاصله با هم برابرند :

$$B'O = BO$$

و خط BB' برپایهٔ تیغهٔ شیشه‌ای عمود است . بنابراین :

شمع و تصویرآن نسبت به‌سطح انعکاس قرینه‌اند .

علت مشاهدهٔ این تصویر آن است که از شمع ، اشعهٔ نور به هرسو می‌تابد . قسمتی از این اشعه به سطح شیشه برخورد می‌کند و منعکس می‌شود . ازآن میان یك دسته نور مانند **AIO** (شکل۲۳) پس از انعکاس به چشم می‌رسد و چشم ، که همواره جسم را در محل تلاقی اشعه‌ای که



شکل ۲۳

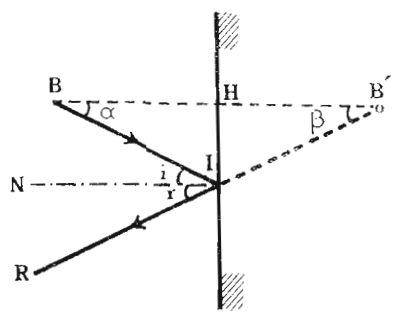
به‌آن تابیده می‌بیند، **تصور می‌کندکه نور مستقیماً از A' قرینهٔ A ، سرچشمه گرفته است** . از همین لحاظ می‌گویند A' تصویر مجازی نقطهٔ **A** است .

این تصویر کاملاً قرینهٔ جسم است ، زیرا تصویر هر نقطهٔ آن قرینهٔ یك نقطه از جسم است .

از آزمایش فوق قوانین انعکاس نتیجه می‌شود :

قوانین انعکاس ـ فرض کنیم که از نقطهٔ نورانی B شعاع BI بر آینه بتابد . این شعاع طوری منعکس می‌شود که امتداد آن از B′ قرینهٔ B بگذرد (شکل ۲۴) . شعاع BI را **شعاع تابش** و شعاع IR را **شعاع انعکاس** (یا **منعکس**) می‌نامیم . از نقطهٔ I محل برخورد شعاع تابش با سطح آینه ، عمود IN را بر آینه رسم می‌کنیم . زاویهٔ $\widehat{BIN}=i$ را **زاویهٔ تابش** و زاویهٔ $\widehat{RIN}=r$ را **زاویهٔ انعکاس** می‌نامند. صفحهٔ شعاع تابش و خط عمود بر آینه در نقطهٔ تابش را **صفحهٔ تابش** نامند و نیز صفحهٔ شعاع انعکاس و خط عمود در نقطهٔ انعکاس را **صفحهٔ انعکاس** نامند .

در شکل ۲۴ پیداست که چون خطوط BB′ و IN به سطح آینه عمودند با یکدیگر موازیند. بنابراین عمود IN در صفحهٔ BB′R واقع است و قانون اول انعکاس چنین بیان می‌شود :



شکل ۲۴

قانون اول انعکاس : شعاع تابش و شعاع انعکاس و خطی که در نقطهٔ تابش بر سطح آینه عمود است هرسه در یك صفحه واقعند .

پس صفحهٔ تابش بر صفحهٔ انعکاس منطبق است .

ضمناً از همان شکل نتیجه می‌شود که چون B′ قرینهٔ B است

mehrmash Rohi
Mehrmash ۳۳ Rohi mehrmash

(B′H=BH) ، مثلث IBB′ متساوی‌الساقین است و زوایای α و β با هم مساویند .

از طرف دیگر $i=\alpha$ و $r=\beta$ ، پس :

$$\boxed{r=i}$$

قانون دوم انعکاس : زاویهٔ تابش با زاویهٔ انعکاس مساوی است .

یادآوری ـ اگر یك شعاع نور عمود بر آینه بتابد (i=۰) ، بر روی خود منعکس می‌شود (r=۰) .

اصل بازگشت نور ـ هرگاه نور در امتداد RI به آینه بتابد (شکل ۲۴) در امتداد IB منعکس می‌شود ؛ زیرا IB ، شعاع انعکاس ، باید در صفحهٔ تابش RIN باشد و با IN زاویه‌ای برابر r بسازد . این اصل که به اصل بازگشت نور موسوم است کلی است و برطبق عبارت زیر بیان می‌شود :

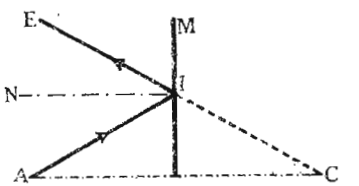
هرگاه یك دسته اشعه در امتداد SI به یك دستگاه نوری (آینه ، عدسی ، منشور ، میکروسکوپ ،.....) بتابد و در امتداد I′S′

شکل ۲۵

از آن دستگاه خارج شود (شکل ۲۵) ، تجربه نشان می‌دهد که اگر نور در امتداد S′I′ به آن دستگاه بتابد در امتداد IS از آن خارج می‌شود .

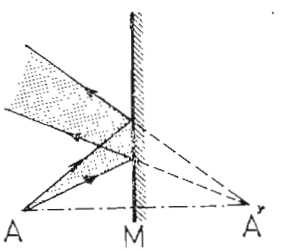
طریقهٔ رسم شعاع انعکاس در آینهٔ تخت ـ شعاع AI به آینه‌ای می‌تابد (شکل ۲۶) . برای رسم شعاع انعکاس ، نقطهٔ C قرینهٔ A را نسبت

به‌آینه بدست می‌آوریم و راز آن به نقطهٔ I وصل کرده امتداد می‌دهیم . IE امتداد شعاع انعکاس است .



شکل ۲۶

تصاویر مجازی و حقیقی – هرگاه یك‌دسته اشعهٔ واگرا از نقطهٔ نورانی **A** به آینه‌ای تخت بتابد پس از برخورد به آینه منعکس می‌شود و بازهم تشکیل یك دسته اشعهٔ واگرا می‌دهد (شکل۲۷). امتداد شعاعهای دسته اشعهٔ اخیر یکدیگر را در نقطه‌ای مانند **A′** قطع می‌کنند. ناظری که به آینه نگاه می‌کند نقطه‌ای نورانی در **A′** می‌بیند . اما در واقع **A′** وجود خارجی ندارد .

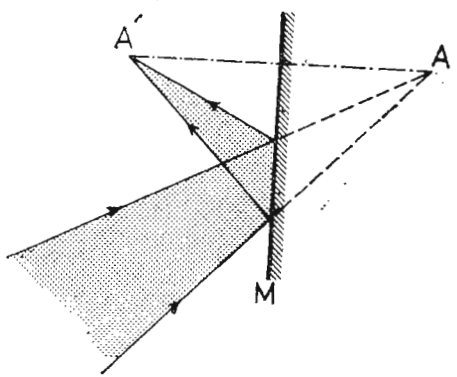


شکل ۲۷

به همین دلیل **A′** را **تصویر مجازی** نقطهٔ **A** می‌گوییم . آشکار است که اگر پرده‌ای را در **A′** قرار دهیم لکهٔ نورانی برآن تشکیل نمی‌شود .

اما اگر یك دسته اشعهٔ همگرا ، که رأس آن **A** است ، به آینه‌ای تخت بتابد ، پس از برخورد به آینه منعکس می‌شود و باز هم تشکیل یك دسته اشعهٔ همگرا می‌دهد که رأس آن **A′** قرینهٔ **A** است (شکل ۲۸) . واضح است که آینه بایستی درمسیر دسته اشعه چنان قرارگیرد که اشعه قبل از آنکه در نقطهٔ **A** جمع شوند به‌آینه برخورد کنند ؛ زیرا در غیر این صورت دسته اشعه‌ای که به‌آینه می‌تابد یك دسته اشعهٔ واگرا خواهد بود (چرا ؟) .

نقطهٔ **A′** واقعاً وجود دارد و اگر پرده‌ای را در **A′** قرار دهیم لکه‌ای نورانی برآن تشکیل می‌شود. به‌همین دلیل **A′** را **تصویر حقیقی** نقطهٔ **A** می‌گوییم .



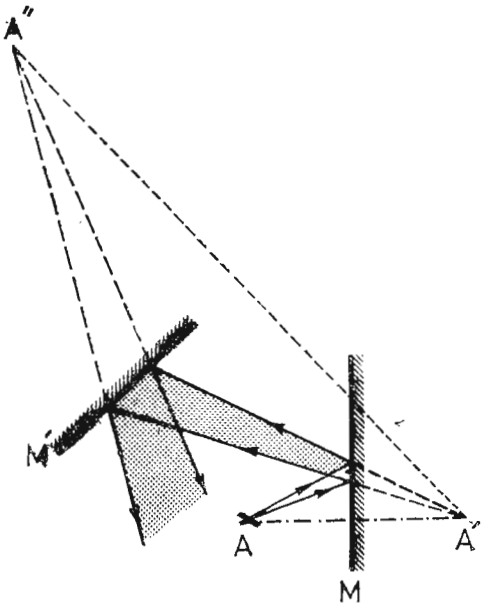
شکل ۲۸

تصاویر حقیقی ومجازی را به‌کمك تمام دستگاههای نوری می‌توان بدست آورد . مثلاً تصویری‌که یك ذره‌بین از خورشید می‌دهد تصویری است حقیقی و آن را می‌توان بر روی یك صفحهٔ کاغذ انداخت ؛ اما وقتی‌که ذره‌بین را به‌منظور خواندن نوشته‌های یك‌کتاب بکار می‌بریم ذره‌بین ازآن نوشته‌ها تصویری می‌دهدکه مجازی است .

تا اینجا دانستیم که دسته اشعه‌ای که تصویر مجازی را درست کردند دسته **اشعه‌ای** واگرا بودند و بر عکس دسته اشعه‌ای که تصویر حقیقی را درست کردند دسته اشعه‌ای همگرا بودند. این مطلب در تمام دستگاههای نوری مورد قبول است. یعنی **هرگاه دسته اشعه‌ای‌که تصویررا تشکیل می‌دهد واگرا باشد ، تصویرمجازی است و برعکس اگرهمگرا باشد، تصویر حقیقی است .**

شیء حقیقی – از نقطهٔ نورانی **A** یك دسته اشعهٔ واگرا به آینهٔ **M** می‌تابانیم (شکل ۲۹) . نقطهٔ نورانی **A** را که در رأس چنین اشعه‌ای قرار دارد شیء حقیقی می‌گوییم . چنانکه دیدیم این دستهٔ اشعه ، پس از برخورد به‌آینه ، منعکس می‌شود و بازهم تشکیل یك دسته اشعهٔ واگرا

می‌دهدکه رأس آن نقطهٔ A' است، وبطوری که گفتیم A' تصویر مجازی نقطهٔ A است .

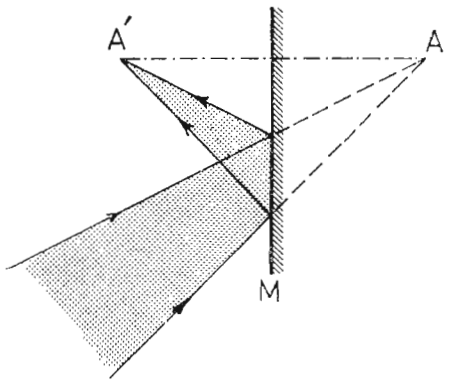


شکل ۲۹

اکنون در مسیر دسته اشعهٔ واگرایی که رأس آن A' است آینهٔ دیگری مانند M' قرار می‌دهیم . این‌دسته اشعه پس از برخورد به‌آینهٔ M' منعکس می‌شود و باز هم تشکیل یك دسته اشعهٔ واگرا می‌دهد که رأس آن A'' است. A'' تصویر مجازی A' است . یعنی A' ، با آنکه وجودخارجی ندارد، همان عملی را انجام می‌دهد که یك شیء واقعی انجام می‌دهد . به همین دلیل می‌گوییم که A' برای آینهٔ M' **شیء حقیقی** محسوب می‌شود ؛ زیرا بنظر می‌رسد که از A' یك دسته اشعهٔ واگرا به‌آینهٔ M' تابیده است .

بطورکلی **هرگاه یك دسته اشعهٔ واگرا ، که رأس آن نقطه‌ای است مانند A (یا A')، به‌یك دستگاه نوری بتابد، این نقطه ، اگرچه وجودخارجی نداشته باشد ، برای آن دستگاه نوری شیء حقیقی محسوب می‌شود .**

شیء مجازی ـ هرگاه یك دسته اشعهٔ همگرا که رأس آن A است ، به‌آینه‌ای تخت بتابد ، بطوری‌که دیدیم ، پس از برخورد به‌آینه ، منعکس می‌شود و بازهم تشکیل یك دسته اشعهٔ همگرا می‌دهد که رأس

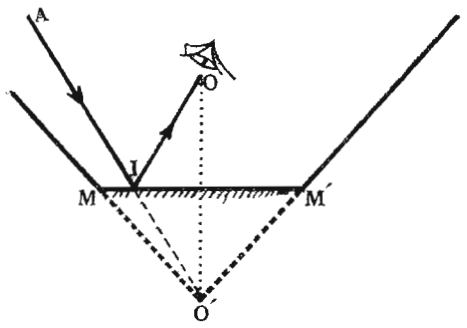


شکل ۳۰

آن A' قرینهٔ A است (شکل ۳۰) . بطوری که گفتیم A' را تصویر حقیقی نقطهٔ A می‌گوییم . اما در واقع نقطهٔ A وجودخارجی ندارد ، زیرا آینه در مسیر دسته‌اشعهٔ همگرا قرارگرفته و از تشکیل نقطهٔ A جلوگیری کرده است . به همین دلیل می‌گوییم که A برای آینهٔ M **شیء مجازی** محسوب می‌شود .

بطورکلی **هرگاه یك‌دسته اشعهٔ همگرا که رأس‌آن نقطه‌ای است مانند A به یك دستگاه نوری بتابد این نقطه برای آن دستگاه نوری شیء مجازی محسوب می‌شود .**

میدان آینه ـ قسمتی از فضای جلو آینه را که برای ناظر O قابل رؤیت است ، میدان آینه برای ناظر O می‌نامند .



شکل ۳۱

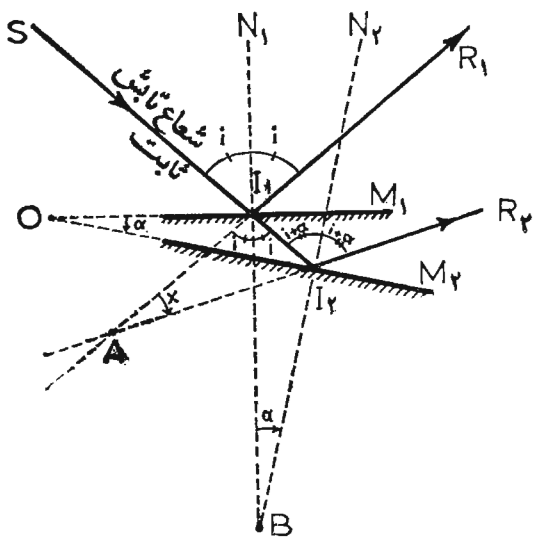
برای یافتن میدان آینه برای ناظر O ، از نقطهٔ O'، قرینهٔ O ، به لبه‌های آینه وصل می‌کنیم . هرم ناقصی که این خطوط درجلو آینه تشکیل می‌دهد میدان آینه برای ناظر O خواهد بود (شکل ۳۱) ، زیرا بطوری‌که از شکل پیداست ، ازهر نقطه‌ای مانند A

که درون این فضاست شعاعی مانند AIO وجود دارد که از آن نقطه به چشم می‌رسد. هر چه ناظر O به آینه نزدیکتر شود، میدان آینه برایش بزرگتر است.

دوران آینه ـ تاکنون وضع تصویر شیء و امتداد شعاع انعکاس را در آینهٔ تخت ثابت مطالعه کردیم. اکنون می‌خواهیم بدانیم که اگر آینه حول محورمعینی دوران‌کند وضع تصویر و امتداد شعاع انعکاس چه تغییری خواهد کرد.

دوران آینه ممکن است حول محوری باشد که در صفحهٔ آینه واقع است و نیز ممکن است حول محوری باشد که در صفحهٔ آینه واقع نیست. دراینجا فقط حالتی را بررسی می‌کنیم که آینه حول محوری که در صفحهٔ آینه است دوران می‌کند. دراین حالت دومسئلهٔ مهم مطرح می‌شود:

۱ ـ دوران شعاع انعکاس وقتی که شعاع تابش و صفحهٔ تابش ثابت باقی می‌مانندـ فرض می‌کنیم که صفحهٔ کتاب، صفحهٔ تابش و آینه



شکل ۳۲

در وضع M_1 است؛ شعاع تابش SI_1 و شعاع انعکاس مربوط به‌آن I_1R_1 است (شکل ۳۲). برای اینکه صفحهٔ تابش، ضمن دوران آینه، ثابت باقی بماند باید آینه حول محوری عمود برصفحهٔ تابش دوران‌کند. فرض می‌کنیم که O **اثر** این محور (یعنی نقطهٔ تلاقی محور با صفحهٔ تابش) باشد. هرگاه آینه به‌اندازهٔ زاویهٔ α دوران‌کند در وضع M_2 قرار می‌گیرد. در این وضع نقطهٔ تابش I_2 و شعاع انعکاس I_2R_2 است. این شعاع به اندازهٔ زاویهٔ $\widehat{I_1AI_2}=x$، که منظور تعیین آن است، دوران‌کرده است.

زاویهٔ بین دو عمود، $\widehat{I_1BI_2}$، برابر با α است.

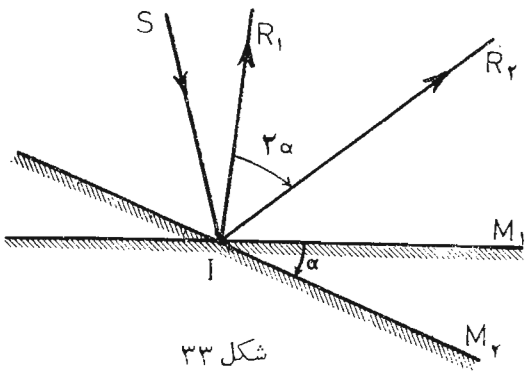
$\widehat{I_1I_2N_2}$، زاویهٔ خارجی مثلث I_1BI_2، برابر با $i+\alpha$ است.

$\widehat{N_2I_2R_2}$ نیز برابر با $i+\alpha$ است (انعکاس در I_2).

بنابراین $\widehat{SI_2R_2}$، زاویهٔ خارجی مثلث I_1AI_2 برابر با $2(i+\alpha)$ است.

در مثلث I_1AI_2 می‌توان نوشت:

$$x+2i=2(i+\alpha)$$
$$x=2\alpha$$



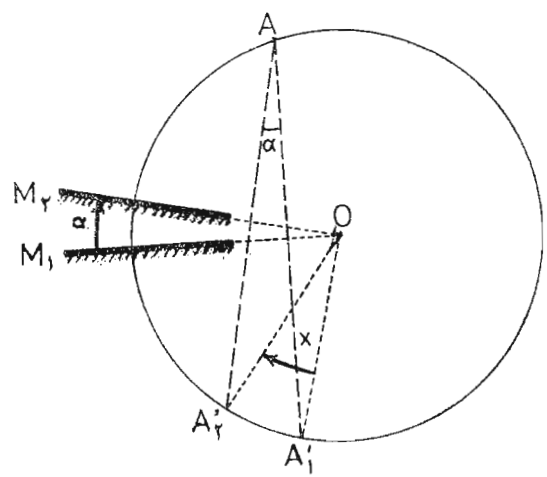
شکل ۳۳

یعنی: **هرگاه زاویهٔ تابش و صفحهٔ تابش ثابت باقی‌بمانند و آینه حول محوری که درصفحهٔ آینه واقع است به اندازهٔ زاویهٔ α دوران کند، شعاع انعکاس به اندازهٔ 2α در همان جهت دوران خواهد کرد.**

در حالت مخصوص هرگاه محور دوران از I نقطهٔ تابش بگذرد (شکل ۳۳) شعاع انعکاس حول این نقطه دوران خواهد کرد.

۲ ـ دوران تصویر یك نقطهٔ ثابت ـ فرض می‌کنیم که محور دوران آینه عمود بر صفحهٔ کتاب است و اثر آن بر این صفحه نقطهٔ O است (شکل ۳۴) . وقتی‌که آینه در وضع M_1 است تصویر نقطهٔ A نقطهٔ A'_1 است ، دایره‌ای به‌مرکز O و به‌شعاع OA رسم می‌کنیم . قرینه‌بودن A و A'_1 نشان می‌دهدکه $OA'_1 = OA$ ؛ یعنی A'_1 برمحیط دایرهٔ O واقع است .

وقتی‌که آینه به‌اندازهٔ α دوران کند و به‌وضع M_2 درآید تصویر جدید A'_2 است بطوری که $OA'_2 = OA$ ؛ یعنی A'_2 نیز بر محیط دایرهٔ O واقع است . بنا بر این تصویر به اندازهٔ زاویهٔ مرکزی



شکل ۳۴

$\widehat{A'_1OA'_2} = x$ دوران‌کرده‌است. چون AA'_1 و AA'_2 خطوطی هستند که بترتیب در اوضاع M_1 و M_2 برآینه عمودند $\widehat{A'_1AA'_2} = \alpha$ است. $\overset{\frown}{A'_1A'_2}$ **قوس** روبرو به زاویهٔ محاطی α است و به زاویهٔ مرکزی x

تعلق دارد بطوری‌که :

$$x = 2\alpha$$

بنابراین : **هرگاه یك آینهٔ تخت حول محوری‌که در صفحهٔ آینه است به‌اندازهٔ α دوران کند، تصویر یك نقطهٔ ثابت به‌اندازهٔ 2α حول همان محور و درهمان جهت دوران خواهد کرد .**

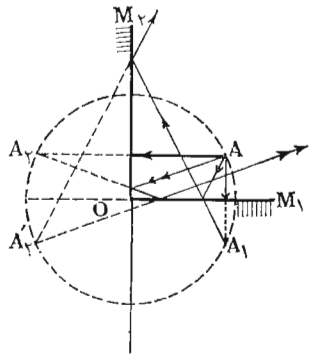
انتقال آینه ـ نقطهٔ O به فاصلهٔ a از آینهٔ M قرار دارد ، O'_1 تصویر آن نیز بدهمین فاصله است ، یعنی : $OO'_1 = 2a$. حال اگرآینه را بقدر l به موازات خودش طوری انتقال دهیم که از نقطهٔ O دور شود، فاصلهٔ نقطهٔ O از آینه $a+l$ و فاصلهٔ تصویر جدید O'_2 از آینه $a+l$ خواهد شد ، یعنی $OO'_2 = 2a+2l$. پس تغییر مکان تصویر مساوی خواهد شد با :

$$O'_1O'_2 = 2l$$

یعنی اگر آینه به‌اندازهٔ l انتقال یابد ، تصویر به اندازهٔ $2l$ منتقل می‌شود .

آینه‌های متقاطع ـ اگرجسم A بین دوآینهٔ متقاطع قرارگیرد ، اشعه ممکن است پس از انعکاس از یك آینه به‌آینهٔ دیگر برخورد کرده مجدداً منعکس شود و این انعکاسها پی درپی ادامه یابد تا وقتی که دیگر شعاعی به آینه‌ها برخورد نکند . نتیجهٔ این انعکاسهای متوالی این است که علاوه برآنکه هر یك از آینه‌ها یك تصویر از جسم می‌دهد ، ممکن است هر یك از این تصاویر برای آینهٔ دیگر به‌عنوان یك جسم محسوب شود و تصویر دیگری از آن بدست آید .

فرض کنیم که دو آینهٔ تخت M_1 و M_2 عمود بر یکدیگرند و نقطهٔ **A** در میان آنهاست. چنانکه در شکل۳۵مشاهده می‌شود، آینهٔ M_1 تصویر A_1 و آینهٔ M_2 تصویر A_2 را از نقطهٔ **A** می‌دهند. لیکن دسته اشعه‌ای که از آینهٔ M_2 منعکس شده است به‌آینهٔ M_1 تابیده و تصویر دیگری مانند A'_2 (قرینهٔ A_2 نسبت به M_1) می‌دهد، زیرا مثل این است‌که اشعه از نقطهٔ A_2 خارج شده و به M_1 می‌تابد (نقطهٔ A'_2 قرینهٔ A_1 نسبت به M_2 نیز می‌باشد. چرا؟) بنابراین در این حالت (دو آینهٔ عمود برهم) سه تصویر از نقطهٔ **A** تشکیل می‌شود.



شکل ۳۵

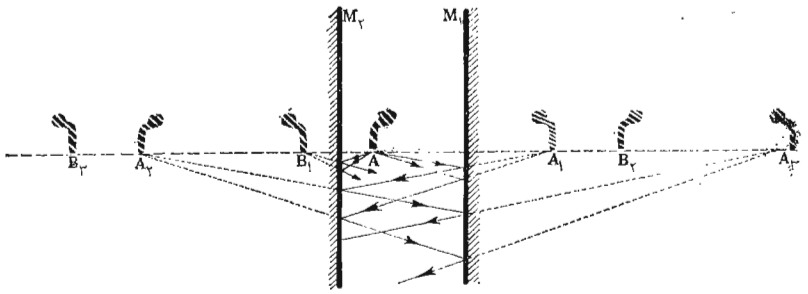
هرچه زاویهٔ بین دو آینه (α) کوچکتر باشد، عدهٔ تصاویر جسم زیادتر می‌شود. عدهٔ این تصاویر را می‌توان از این فرمول محاسبه کرد:

$$N = \frac{۳۶۰}{\alpha} - ۱$$

مثلاً اگر زاویهٔ دو آینه ۶۰° باشد عدهٔ تصاویر خواهد شد:

$$N = \frac{۳۶۰}{۶۰} - ۱ = ۵$$

اگردوآینه بایکدیگر موازی باشند ($\alpha = ۰$)، عدهٔ تصاویر بیشمار است، چنانکه اگر بین دوآینه‌که تقریباً باهم موازیند بایستید، عدهٔ زیادی تصویر از خود درآینه‌ها خواهید دید. شکل ۳۶ مسیر نور وعلت تشکیل تصاویر متعدد را نشان می‌دهد.

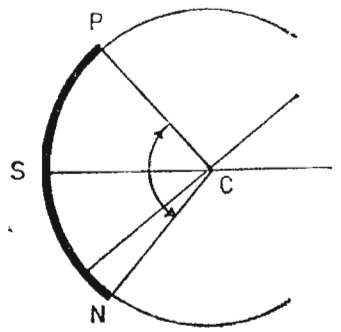


شکل ۳۶

۲- آینه‌های کروی

آینه‌های کروی آینه‌هایی است که سطح صیقلی و منعکس‌کنندهٔ آنها کروی است. اگر سطح داخلی کره سطح منعکس‌کننده باشد (طرف گود) آن را **آینهٔ مقعر** یا **کاو** و اگر سطح خارجی (طرف برجسته)آن منعکس‌کننده باشد آن را **آینهٔ محدب** یا **کوژ** می‌نامند. شکل ۳۷ مقطع یك آینهٔ کروی **NSP** را به توسط صفحهٔ کاغذ نشان می‌دهد.

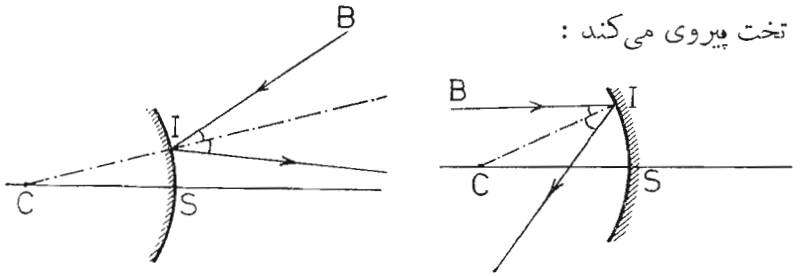
بنابر تعریف، نقطهٔ C، مرکز کره را، **مرکز آینه** و **R** شعاع کره را **شعاع آینه** می‌گویند. هر خطی را که ازمرکز (C) بگذرد **محور** آینه می‌نامند و بین آنها خط **CS** را که محور تقارن آینهٔ **NSP** است **محور اصلی** و نقطهٔ S محل تقاطع این محور را با آینه **رأس آینه** می‌نامند. زاویهٔ $\widehat{PCN}$ را **دهانهٔ آینه** می‌گویند.



شکل ۳۷

قوانین انعکاس درآینه‌های کروی ـ فرض می‌کنیم‌که از نقطهٔ

B شعاع **BI** بر سطح آینهٔ کروی بتابد . چون همیشه می‌توان هرقسمت بسیار کوچك از سطح کره را مسطح دانست مثل این است که شعاع **BI** در نقطهٔ **I** بریك آینهٔ تخت کوچك تابیده است (شکلهای ۳۸ و۳۹). بنابر این انعکاس درآینه‌های کروی از همان قوانین انعکاس در آینه‌های تخت پیروی می‌کند :



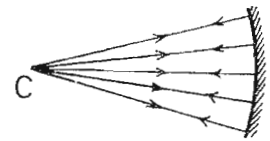
شکل ۳۸ـ انعکاس درآینهٔ مقعر

شکل ۳۹ـ انعکاس درآینهٔ محدب

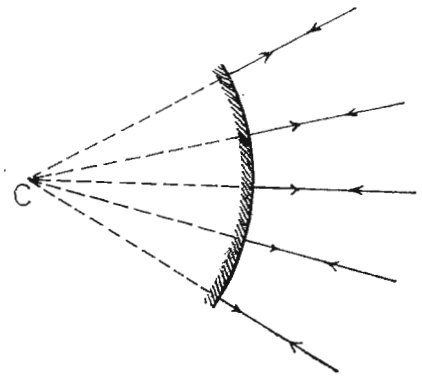
قانون اول انعکاس ـ شعاع تابش و شعاع انعکاس وخطی‌که در نقطهٔ تابش برسطح آینه عمود است هر سه در یك صفحه واقعند .

قانون دوم انعکاس ـ زاویهٔ تابش با زاویهٔ انعکاس مساوی است.

نتیجه ـ هر شعاعی که از مرکز آینه بگذرد ، پس از برخورد



شکل ۴۰



شکل ۴۱

به‌آینه ، بر روی خود منعکس می‌شود ، زیرا چنین شعاعی برآینه عمود است (شکلهای ۴۰ و ۴۱) .

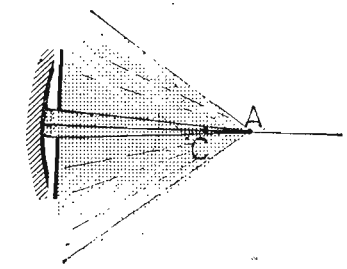
شرط تشکیل تصویر درآینه‌های کروی ـ آزمایش نشان می‌دهد که آینهٔ کروی هنگامی از یك شیء ، تصویر واضح می‌دهد که اشعه‌ای که ازآن شیء برآینه می‌تابد تقریباً عمود برسطح آینه باشد .

می‌دانیم که شعاع کره بر سطح کره عمود است ؛ بنا بر این **برای اینکه یك شیء در آینهٔ کروی تصویر واضح داشته باشد لازم است که امتداد اشعه‌ای که از هر نقطهٔ آن تابش می‌شود تقریباً از مرکز آینه بگذرد .**

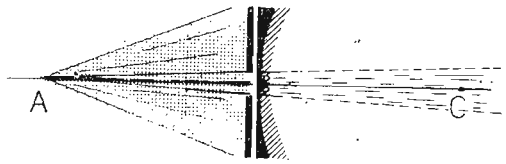
اکنون می‌خواهیم بدانیم‌که این شرط درچه مواردی موجود است :

۱ ـ حالتی را در نظر می‌گیریم که شیء **A** در مرکز آینه یا نزدیك به مرکزآینه واقع است. اشعه‌ای‌که از آن برآینه می‌تابد تقریباً عمود برسطح آینه است. بنابراین شیء **A** در این آینه تصویری خواهد داشت مانند **A′** . به عبارت دیگر دسته اشعهٔ مخروطی تابش که رأس آن **A** است پس از انعکاس تبدیل به دسته اشعهٔ مخروطی دیگر می‌شود که رأس آن **A′** است .

۲ ـ حالتی را در نظر می‌گیریم که شیء **A** در فاصله‌ای دور از مرکز اما نزدیك به‌محور اصلی واقع است. دسته اشعهٔ تابش ، مخروطی را تشکیل می‌دهد که معمولاً زاویهٔ رأس آن بزرگ است . امتداد بعضی از شعاعهای این دسته اشعه از نزدیك مرکز آینه می‌گذرد و تقریباً برآینه عمود است . برای‌آنکه تصویر واضحی از **A** تشکیل شودآینه باید فقط اشعه‌ای را دریافت کند که امتداد آنها از نزدیك مرکز می‌گذرد . شرط اینکه چنین حالتی اتفاق بیفتد آن است که دهانهٔ آینه کوچك باشد (شکلهای ۴۲ و ۴۳) .

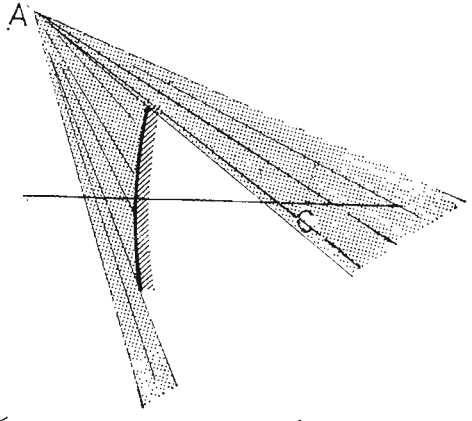


شکل ۴۲

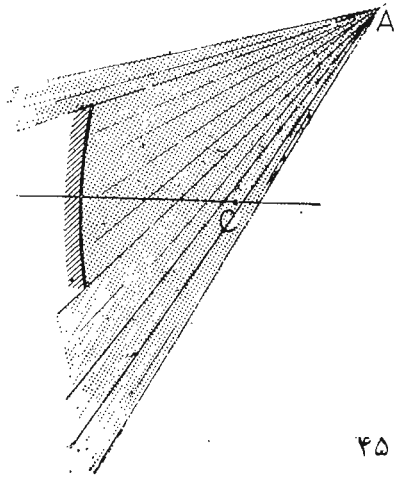


شکل ۴۳

۳ـ حالتی را درنظر می‌گیریم که شیء **A** دور از محور اصلی واقع است . در این صورت اگر زاویهٔ **AC** با محور اصلی بزرگ باشد اشعه‌ای که امتداد آنها از مرکز می‌گذرد به آینه برخورد نمی‌کند وامتداد اشعه‌ای که به‌آینه برخورد می‌کند از مرکز آینه دور است (شکلهای ۴۴ و ۴۵). درچنین حالتی شیء **A** تصویر واضح نخواهد داشت .



شکل ۴۴



شکل ۴۵

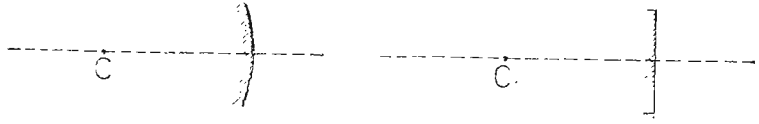
بنابراین هرگاه شیء **A** از محور اصلی دور باشد هنگامی دارای تصویر واضح خواهد بود که زاویهٔ بین محور فرعی که از **A** می‌گذرد و محور اصلی کوچك باشد .

تجربه و محاسبه نشان می‌دهد که با چنین شرایطی اگر شیء **AB**

بریکی از محورها عمود باشد تصویری خواهد داشت مانند **A′B′** عمود برهمان محور .

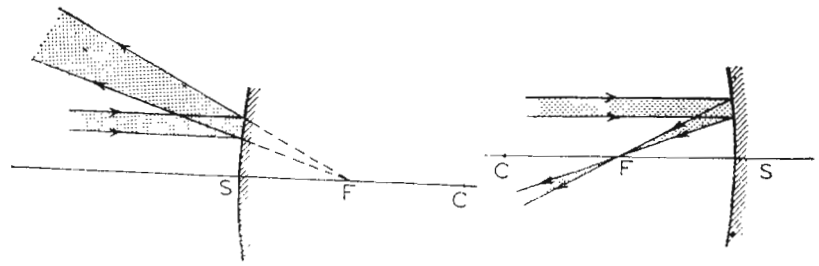
واضح است که هرگاه دهانهٔ آینه کوچك باشد اشعهٔ تابش به‌یکدیگر نزدیکند ، بنابراین نمی‌توان مسیر نور و چگونگی تشکیل تصویر را با مقیاس درست برصفحهٔ کاغذ نشان داد. به همین دلیل سطح منعکس‌کنندهٔ آینه‌های کروی را بزرگتر از اندازهٔ واقعی رسم می‌کنند و برای آنکه نوع آینهٔ کروی (مقعر یا محدب) را نشان دهند طرف غیر صیقلی کره را هاشور می‌زنند (شکلهای ۴۶ و ۴۷) .

شکل ۴۶ ـ نمایش آینهٔ مقعر



شکل ۴۷ ـ نمایش آینهٔ محدب

کانونهای آینهٔ کروی ـ فرض می‌کنیم که دهانهٔ یك آینهٔ کروی کوچك است . یك دسته اشعهٔ متوازی را به‌موازات محور اصلی آینه بر آینه می‌تابانیم . تجربه نشان می‌دهد که این اشعه پس از انعکاس به یك دسته اشعهٔ مخروطی تبدیل می‌شودکه رأس‌آن برمحور اصلی واقع است . این دسته اشعه درآینه‌های مقعر همگرا و در آینه‌های محدب واگراست (شکلهای ۴۸ و ۴۹) . نقطهٔ F ، رأس این دسته اشعه ، را **کانون اصلی** آینه می‌نامیم .



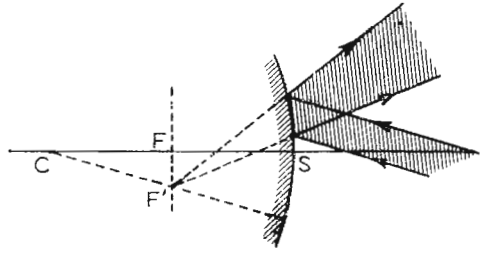
شکل ۴۹ شکل ۴۸

فاصلهٔ SF را **فاصلهٔ کانونی** آینه می‌نامیم و آن را با f نشان می‌دهیم. آزمایش ومحاسبات نشان می‌دهد که فاصلهٔ کانونی مساوی نصف شعاع آینه است :

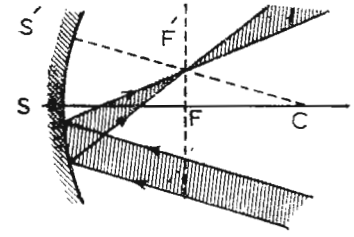
$$f=SF=\frac{CS}{۲}=\frac{R}{۲}$$

بنابراین هر شعاعی‌که به‌موازات محور اصلی به‌آینهٔ کروی بتابد، امتداد شعاع انعکاس آن ازکانون اصلی آینه می‌گذرد وبنا به‌اصل بازگشت نور ، هر شعاعی که امتداد آن از کانون اصلی بگذرد پس از برخورد به آینه به‌موازات محور اصلی منعکس می‌شود .

حال اگر یك دسته اشعهٔ متوازی‌را به‌موازات یکی از محورهای فرعی آینه بر آینه بتابانیم ، پس از انعکاس تبدیل به یك دسته اشعهٔ مخروطی می‌شود که رأس آن بر آن محور فرعی واقع است . نقطهٔ F′



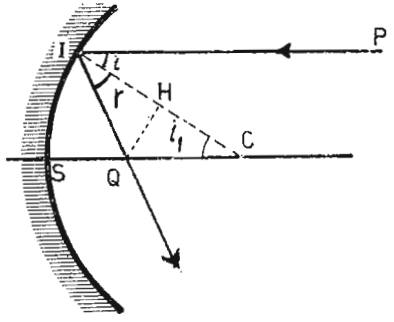
شکل ۵۱



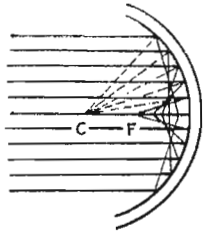
شکل ۵۰

رأس این دسته اشعه را **کانون فرعی** آینه می‌نامیم (شکلهای ۵۰ و ۵۱). در این حالت نیز $CF'=F'S'$ یعنی $CF'=\frac{R}{۲}$. واضح است‌که بر هر محور فرعی یك کانون فرعی وجود دارد که فاصله‌اش از مرکز $f=\frac{R}{۲}$ است .

یادآوری ـ آنچه در بارهٔ کانون گفته شد تقریبی است و درواقع اشعهٔ موازی با محور پس ازانعکاس تقریباً دریك نقطه جمع می‌شوند، زیرا چنانکه در شکل ۵۲ دیده می‌شود ، زاویهٔ $i=r=i_۱$. پس مثلث QIC متساوی‌الساقین است و $QI=QC$. اما $QI>QS$ ، پس Q اولاً در وسط SC نیست و ثانیاً بستگی به نقطهٔ تابش I دارد . لیکن هر چه نقطهٔ I به S نزدیکتر باشد ، به‌عبارت دیگر هرچه اشعهٔ موازی به محور اصلی نزدیکتر باشند دو طول QI و QS به هم نزدیکتر می‌شوند و Q تقریباً در وسط CS می‌افتد . شکل ۵۳ نشان می‌دهدکه اشعهٔ موازیی‌که به‌آینهٔ کروی‌می‌تابند، پس از انعکاس ، همه از یك نقطه نمی‌گذرند . ولی اگرجلوآینه دیافراگمی بگذاریم،اشعه‌ای که به قسمت مرکزی آینه می‌تابند ، پس از انعکاس ، تقریباً ازیك نقطه



شکل ۵۲

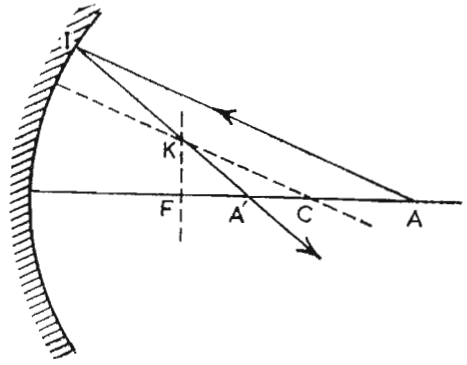


شکل ۵۳

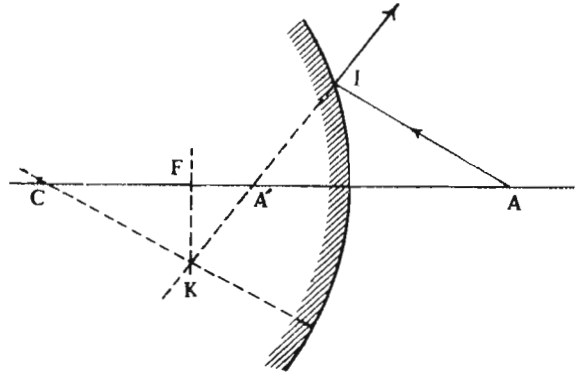
خواهند گذشت و بدین طریق از ورود شعاعهایی که باعث گسترش کانون می‌شوند جلوگیری می‌شود .

سطح کانونی مکان هندسی کانونهای فرعی آینه، کره‌ای است به‌شعاع $\frac{R}{2}$ و به مرکز C . لیکن چون همواره قسمت کوچکی از آینه مورد استفاده قرار می‌گیرد ، تقریباً می‌توان به جای این سطح کروی یك سطح مستوی در نظر گرفت که برمحور اصلی در کانون اصلی عمود باشد . این سطح را **سطح کانونی** می‌نامند (شکلهای ۵۰ و ۵۱) .

رسم شعاع انعکاس در آینهٔ کروی ـ از نقطهٔ A ، واقع بر محور اصلی آینه، شعاع AI به‌آینه می‌تابد . برای رسم شعاع انعکاس آن ، محور فرعی CK را موازی با AI رسم می‌کنیم این محورسطح کانونی را در نقطهٔ K قطع می‌کند . IK امتداد شعاع



شکل ۵۴ ـ رسم شعاع انعکاس در آینهٔ مقعر



شکل ۵۵ ـ رسم شعاع انعکاس در آینهٔ محدب

انعکاس است، چه دوشعاع موازی AI و CK باید پس از انعکاس یکدیگر را درکانون فرعی مربوط که همان نقطهٔ K است قطع کنند . ضمناً محل تقاطع IK با محور اصلی ، نقطهٔ A' را که تصویر نقطهٔ A است بدست می‌دهد (شکلهای ۵۴ و ۵۵) .

رسم تصویر در آینهٔ کروی ـ برای یافتن تصویر جسم در آینه‌ها، جسم را عمود برمحور اصلی فرض می‌کنیم . چنانکه گفته شد ، تصویر نیز برمحور اصلی عمود خواهد بود ، بنابراین کافی است که تصویر یك نقطه از جسم را بدست آوریم .

برای این منظور، ازمیان اشعه‌ای که ازهر نقطه بدآینه می‌تابد دوشعاع کافی است ، چه محلی که این دو شعاع پس از انعکاس یکدیگر را تلاقی می‌کنند ، محل و نوع تصویر نقطه را تعیین خواهد کرد . آشکار است که آن دو شعاعی را اختیار می‌کنیم که رسم شعاع انعکاس آنها آسان باشد . شعاعهایی که رسم شعاع انعکاس آنها آسان است عبارتند از :

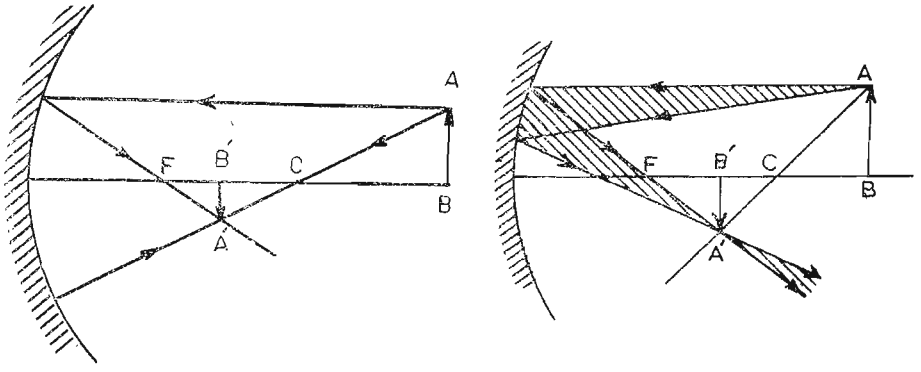
۱ ـ شعاعی که امتداد آن از مرکز می‌گذرد . امتدادشعاع انعکاس آن نیز از مرکز می‌گذرد .

۲ـ شعاعی که امتدادآن بدموازات محوراصلی است . امتداد شعاع انعکاس آن از کانون اصلی می‌گذرد .

۳ ـ شعاعی که امتداد آن از کانون اصلی می‌گذرد . امتداد شعاع انعکاس آن بدموازات محور اصلی است .

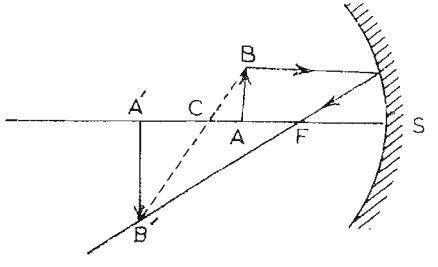
تصویر در آینهٔ مقعر ـ ۱ ـ جسم دورتر از مرکز آینه ـ جسم

AB عمود بر محور اصلی و دورتر از مرکز C آینه است (شکل ۵۶) . از نقطهٔ A شعاعی به‌موازات محور اصلی به‌آینه می‌تابانیم ، شعاع انعکاس آن ازکانون می‌گذرد . شعاع دیگر AC است‌که ازمرکز آینه می‌گذرد و بر روی خود منعکس می‌شود . این دو شعاع انعکاس یکدیگر را در



شکل ۵۶

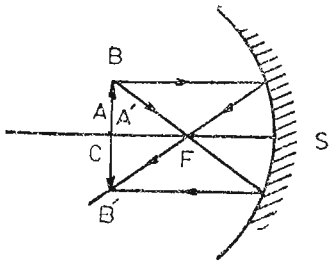
نقطهٔ A′ قطع می‌کنند . از A′ خط A′B′ را بر محور اصلی عمود می‌کنیم . A′B′ تصویر AB است .این تصویر حقیقی،کوچکترازجسم ، و نسبت به‌آن معکوس است (شکل ۵۶) و بین F و C قرار دارد .



شکل ۵۷

به‌موجب اصل بازگشت نور، در صورتی که جسم را در محل A′B′ قرار دهیم ، تصویر آن‌درمحل AB تشکیل می‌شود. این تصویر حقیقی، از جسم بزرگتر ، و نسبت به آن معکوس است (شکل ۵۷) .

۲ - جسم در مرکز آینه ـ در این صورت تصویر نیز در مرکز آینه

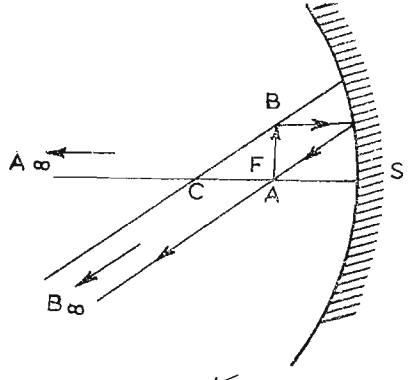


شکل ۵۸

است . این تصویر حقیقی ، معکوس و مساوی جسم است (شکل ۵۸) .

۳ - جسم در کانون ـ می‌دانیم که اشعه‌ای که از بینهایت به آینه بتابند در سطح کانونی جمع می‌شوند. پس به‌موجب اصل بازگشت نور ، هرگاه جسمی در سطح کانونی قرارگیرد ، تصویر آن در بینهایت دور تشکیل می‌شود (شکل ۵۹) .

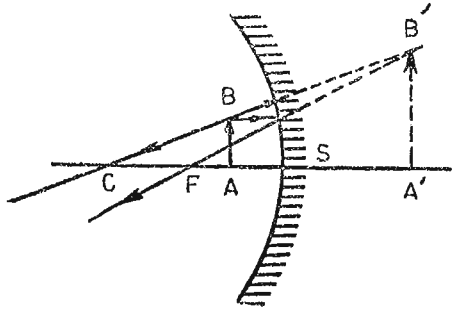
از این خاصیت در نورافکن و چراغ اتوموبیل استفاده می‌شود .



شکل ۵۹

در این دستگاهها یك چراغ قوی در کانون یك آینهٔ مقعر قرار دارد . اشعهٔ نور ، چون به موازات هم خارج می‌شوند، پخش نمی‌شوند و فواصل دور را روشن می‌کنند .

۴ - جسم در فاصلهٔ کانونی ـ هرگاه جسم را درفاصلهٔ کانونی آینه ، یعنی بین کانون ورأس آن‌قرار دهیم ، اشعه‌ای‌که ازهر نقطهٔ جسم به آینه می‌تابد پس‌از انعکاس ، تبدیل به‌یك دسته اشعهٔ واگرا می‌شود، یعنی‌از جسم تصویر حقیقی تشکیل

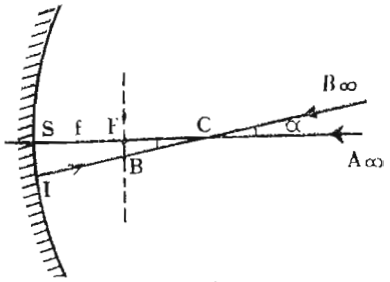


شکل ۶۰

نمی‌گردد . امتداد اشعهٔ انعکاس در پشت آینه یکدیگر را قطع می‌کنند. تصویر مجازی ، مستقیم ، و بزرگتر از جسم است (شکل ۶۰) .

در آینه‌هایی که در دندانسازی و برای اصلاح صورت بکار می‌برند از این خاصیت استفاده می‌شود .

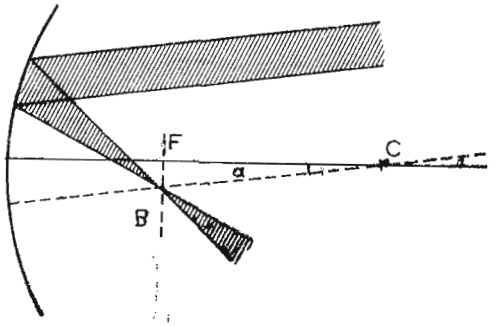
۵ - جسم در بینهایت دور ـ اکنون می‌خواهیم تصویر یك جسم دور ، مثلاً خورشید را در آینهٔ مقعر رسم کنیم . اولاً می‌دانیم که اشعهٔ متوازیی که از بینهایت می‌تابند، همه درسطح کانونی آینه جمع می‌شوند ، بنابراین تصویر خورشید در سطح کانونی آینه تشکیل می‌شود. حال فرض کنیم که محور اصلی آینه به لبهٔ پایینی خورشید مماس باشد . از نقطهٔ تماس ، یعنی انتهای پایینی خورشیدکه بر روی محور اصلی است، اشعه به موازات محوراصلی آینه می‌تابند. این اشعه در F ،کانون اصلی آینه، جمع می‌شوند . یعنی F تصویر لبهٔ پایین خورشید است (شکل ۶۱) .



شکل ۶۱

از لبهٔ بالایی خورشید نیز اشعهٔ متوازی بر آینه می‌تابند . لیکن این اشعه با محور اصلی زاویه‌ای مساوی α می‌سازند که همان قطر ظاهری خورشید است . این اشعه در B جمع می‌شوند (این نقطه بر روی سطح کانونی BF است) . شعاع CI که ازلبهٔ بالایی خورشید می‌تابد ، با محور اصلی زاویهٔ α می‌سازد . این شعاع چون از C گذشته است ، بر روی خود منعکس می‌گردد وسطح کانونی را در B قطع می‌کند. بنابراین شعاعهایی که به‌موازات CI یعنی تحت زاویهٔ α می‌تابند ، پس از انعکاس همه در B جمع می‌شوند . پس

B تصویر لبهٔ بالایی خورشید و FB قطر دایرهٔ تصویر خورشید خواهد بود (شکل ۶۲) .



شکل ۶۲

محاسبهٔ FB یا قطر دایرهٔ تصویر خورشید ـ در مثلث CFB :

$$tg\alpha = \frac{FB}{f} \quad \text{و از آنجا} \quad FB = f \times tg\alpha$$

لیکن چون معمولاً α زاویهٔ کوچکی است ، می‌توان به جای $tg\alpha$ خود زاویهٔ α را برحسب رادیان قرار داد[1] ، در این صورت خواهیم داشت :

$$FB = f \times \alpha$$

مثال ـ قطرظاهری خورشید ۳۲ دقیقه است . قطر دایرهٔ تصویرآن را در آینه‌ای به‌فاصلهٔ کانونی ۲ متر بدست‌آورید :

$$f = ۲۰۰۰ mm$$

$$\alpha = \frac{۳۲ \times ۲\pi}{۳۶۰ \times ۶۰} \neq \frac{۱}{۱۰۰} \text{رادیان}$$

---

۱ ـ جدول آخر کتاب نشان می‌دهد که برای زوایای کوچك ، tg و sin آن زوایا اعدادی هستند بسیار نزدیك به خود آن زوایا برحسب رادیان، وبسته به‌دقت وتقریبی‌که در محاسبات لازم می‌شود می‌توان تا حدود ۱۰درجه sin و tg و رادیان زوایا را به‌جای یکدیگر بکار برد .

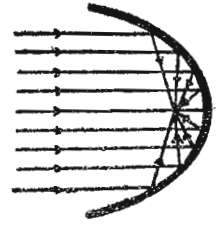
$$FB = f \times \alpha = ۲۰۰۰ \times \frac{۱}{۱۰۰} = ۲۰mm$$

بنابراین فرمول ، هرچه فاصلهٔ کانونی یا شعاع آینه بزرگتر باشد تصویر بزرگتر خواهد بود . در دوربینهای بزرگ نجومی از این خاصیت استفاده می‌کنند .

بزرگترین آینهٔ مقعری که تا به‌حال برای این منظور ساخته‌اند آینه‌ای است به‌قطر تقریباً ۵ متر (۲۰۰ اینچ) که در دوربین رصدخانهٔ معروف **پالومار** ، واقع در ایالت کالیفرنیای امریکا ، کارگذاشته‌اند .

این دوربین از دولحاظ اهمیت دارد : اولاً چون فاصلهٔ کانونی آن زیاد است ، ازاجسام دور (خورشید،ماه وسیارات منظومهٔ شمسی) تصاویر بزرگ می‌دهد . ثانیاً تمام دهانهٔ بزرگ آینه در مقابل ستارگان قرار می‌گیرد و نوری که در کانون جمع می‌شود در حدود یك میلیون برابر نوری است که مستقیماً از ستاره به‌چشم می‌رسد . از این‌رو با این دوربین ستارگانی را می‌توان دید یا از آنها عکسبرداری کرد که چشم بتنهایی هرگز قادر به دیدن آنها نیست .

یادآوری ـ آینه‌های بزرگ را کمی می‌تراشند تا ازشکل کروی به‌شکل سهمی درآیند . در این صورت هرقدر هم‌که دهانهٔ آینه بزرگ باشد،همهٔ اشعهٔ موازی با محور واقعاً دریك نقطه (کانون) جمع می‌شوند (شکل۶۳) وتصویر خیلی بهتر است. درصورتی که درآینهٔ کروی تقریباً دریك نقطه جمع می‌شوند.

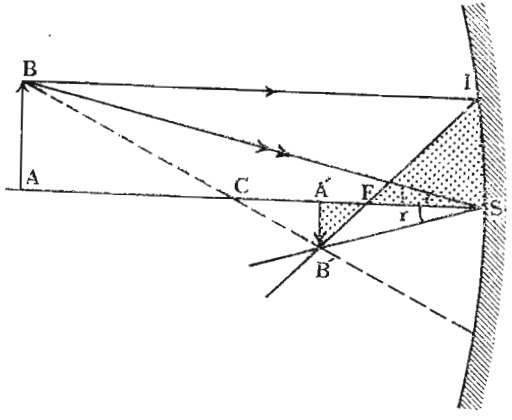


شکل ۶۳

فرمولهای آینهٔ مقعر ـ ازآنچه تا به‌حال گفته شد معلوم می‌شود

که می‌توان به طریق رسم هندسی محل ، نوع ، و طول تصویر هرجسم را درآینهٔ مقعر تعیین‌کرد . اکنون می‌خواهیم روابطی بدست بیاوریم که از راه محاسبه نیز بتوان مشخصات تصویر را بدست آورد . این روابط را فرمولهای آینه می‌نامند .

۱ـ جسم دورتر از کانون (تصویر حقیقی) ـ $A'B'$ تصویر حقیقی جسم AB در آینهٔ مقعری به فاصلهٔ کانونی f است (شکل ۶۴) . $SA = x$ و $SA' = x'$ را بترتیب فاصلهٔ جسم و فاصلهٔ تصویر آن تا آینه و $SF = f$ را فاصلهٔ کانونی فرض می‌کنیم .



شکل ۶۴

در دو مثلث متشابه SAB و $SA'B'$:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{SA'}{SA} = \frac{x'}{x}$$

پس :

$$\gamma = \frac{A'B'}{AB} = \frac{x'}{x} \qquad (۱)$$

نسبت γ که نسبت طول تصویر به طول جسم را نشان می‌دهد **بزرگنمایی آینه** است .

حال از دو مثلث متشابه FIS و $FB'A'$ (چون دهانهٔ آینه کوچك

است قوس SI را می‌توان یك خط عمود بر محور اصلی در نظر گرفت)

نیز همان نسبت بزرگنمایی را تشکیل می‌دهیم :

$$\frac{A'B'}{SI}=\frac{FA'}{SF}$$

لیکن $SI=AB$ و $FA'=SA'-SF$

$$\text{پس}\quad \frac{A'B'}{AB}=\frac{SA'-SF}{SF}=\frac{x'-f}{f}=\frac{x'}{f}-1 \qquad (۲)$$

از تساوی روابط (۱) و (۲) نتیجه می‌شود که

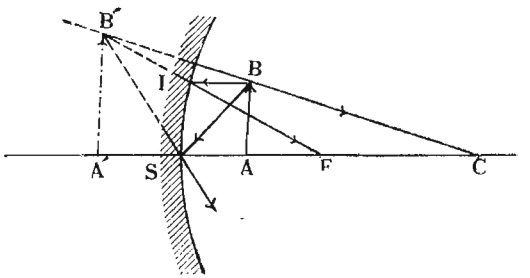
$$\frac{x'}{x}=\frac{x'}{f}-1$$

که پس از تقسیم طرفین بر x' چنین می‌شود $\quad -\frac{1}{x}=\frac{1}{f}-\frac{1}{x'}$

یا $\quad \boxed{\frac{1}{x}+\frac{1}{x'}=\frac{1}{f}}$ تصویر حقیقی

۲- جسم در فاصلهٔ کانونی (تصویرمجازی) - از تشابه مثلثهای متشابه SAB و SA′B′ در شکل ۶۵ (چرا این دو مثلث متشابهند ؟)

نتیجه می‌شود :



شکل ۶۵

$$\boxed{\gamma=\frac{A'B'}{AB}=\frac{x'}{x}}$$

و از تشابه مثلثهای FSI و FA′B′ نیز خواهیم داشت :

$$\frac{A'B'}{AB}=-\frac{x'+f}{f}$$

و بالاخره : $\quad \boxed{\frac{1}{x}-\frac{1}{x'}=\frac{1}{f}}$ تصویر مجازی

می‌بینیم که شکل فرمول ، در هر دو حالت یکسان است با این تفاوت‌که درحالت اخیر تصویر مجازی وعلامت x' منفی است، و چنانکه بعداً خواهیم گفت هر دو فرمول را می‌توان کاملاً به یك شکل درآورد .

مثال ۱ - جسمی به‌طول ۱cm به‌فاصلهٔ ۱۰cm ازیك‌آینهٔ مقعر به‌شعاع ۳۰cm قرارگرفته است. نوع، محل تصویر، و طول‌آن را تعیین کنید .

حل- فاصلهٔ‌کانونی آینه نصف شعاع آن است . پس :

$$f=\frac{R}{2}=\frac{30}{2}=15\text{cm}$$

بنابراین $x=10$ و $f=15$ و $x'=?$. چون جسم در فاصلهٔ کانونی است تصویر مجازی است . پس :

$$\gamma=\frac{A'B'}{AB}=\frac{x'}{x}$$

$$\gamma=\frac{30}{10}=3$$

$$A'B'=3AB=3\text{cm}$$

$$\frac{1}{x}-\frac{1}{x'}=\frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{10}-\frac{1}{x'}=\frac{1}{15}$$

$$\frac{1}{x'}=\frac{1}{10}-\frac{1}{15}=\frac{1}{30}$$

$$x'=30\text{cm}$$

پس تصویر جسم مجازی و در ۳۰ سانتیمتری پشت آینه واقع و طول آن 3cm است .

مثال ۲- آینهٔ مقعری، به فاصلهٔ کانونی 8cm ، از جسم‌کوچك AB تصویری ۲ برابر جسم داده است . محل جسم کجاست ؟

حل- دو حالت اتفاق می‌افتد : ۱- تصویر حقیقی و دو برابر جسم ؛ ۲- تصویر مجازی و دو برابر جسم .

۱ـ تصویر حقیقی و دو برابر جسم ـ $\gamma = \frac{x'}{x} = ۲$

یعنی $x' = ۲x$

مقادیر x و x' را در رابطهٔ اصلی می‌بریم . چون تصویر حقیقی است :

$$\frac{۱}{x} + \frac{۱}{x'} = \frac{۱}{f}$$

$$\frac{۱}{x} + \frac{۱}{۲x} = \frac{۱}{۸} \qquad x = ۱۲cm$$

یعنی جسم بین کانون و مرکز است .

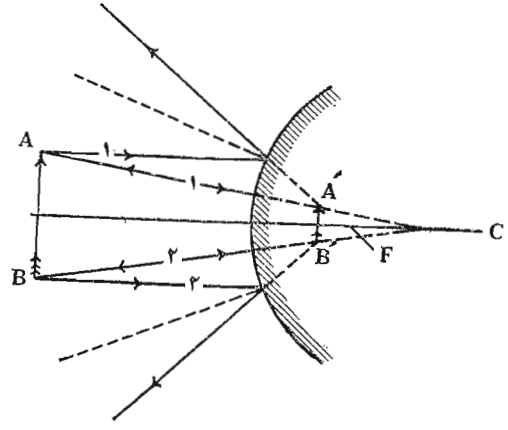
۲ـ تصویر مجازی و دو برابر جسم ـ در این صورت

$$\frac{۱}{x} - \frac{۱}{x'} = \frac{۱}{f}$$

$$\frac{۱}{x} - \frac{۱}{۲x} = \frac{۱}{۸} \qquad x = ۴cm$$

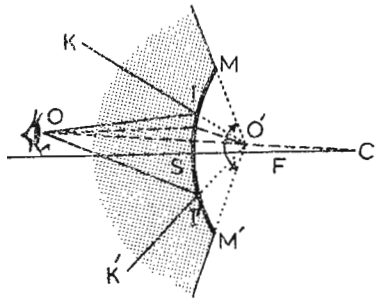
یعنی جسم در فاصلهٔ کانونی است .

تصویر در آینهٔ محدب ـ آینهٔ محدب از هرجسمی که جلو آن قرار گیرد تصویری کوچك ، مجازی ، و مستقیم می‌دهد. برای یافتن تصویر ، از دو نقطهٔ اصلی یعنی مرکز و کانون آینه استفاده می‌کنیم (شکل ۶۶). در این شکل از نقطهٔ A یك شعاع به موازات محور اصلی و یك شعاع عمود بر آینه (که از



شکل ۶۶

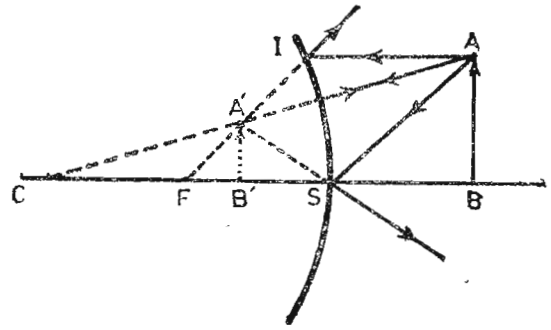
مرکز می‌گذرد) می‌تابد . امتداد منعکس آنها در A' متقاطع است و نیز امتداد شعاعهای انعکاس اشعه‌ای که از B خارج شده‌اند همدیگر را در B' قطع می‌کنند . $A'B'$ تصویری کوچك، مجازی، و مستقیم از آن جسم است . می‌بینیم که این آینه نیز مانند آینهٔ تخت همیشه از یك جسم حقیقی تصویری مجازی می‌دهد ، لیکن این تصویر همیشه از جسم کوچکتر است . امتیاز این آینه بر آینهٔ تخت این است که با ابعاد یکسان میدان وسیع‌تری دارد (شکل ۶۷) . از این خاصیت در آینهٔ اتوموبیلها استفاده می‌شود تا راننده بتواند فضای قابل ملاحظه‌ای از عقب یا کنار خود را ببیند .



شکل ۶۷

توجه کنید که طرز یافتن میدان در آینهٔ محدب و تخت یکسان است .

فرمولهای آینهٔ محدب ـ با همان قرار دادهای آینهٔ مقعر



شکل ۶۸

$SB=x$ ؛ $SB'=x'$ ؛ $SF=f$ (شکل ۶۸) ، از تشابه مثلثهای SAB و $SA'B'$ نتیجه می‌شود که

$$\gamma=\frac{A'B'}{AB}=\frac{x'}{x}$$ رابطهٔ بزرگنمایی

از دو مثلث متشابه دیگر FIS و $FA'B'$ نیز نتیجه می‌شود که

$$\frac{A'B'}{SI}=\frac{FB'}{FS}$$

یا
$$\frac{A'B'}{AB}=\frac{FS-B'S}{FS}$$

یا
$$\frac{A'B'}{AB}=\frac{f-x'}{f}=1-\frac{x'}{f}$$

از تساوی دو مقدار $\frac{A'B'}{AB}$ رابطهٔ زیر بدست می‌آید :

$$\frac{x'}{x}=1-\frac{x'}{f}$$

و پس از تقسیم طرفین بر x' :
$$\frac{1}{x}=\frac{1}{x'}-\frac{1}{f}$$

یا
$$\frac{1}{x}-\frac{1}{x'}=-\frac{1}{f}$$

فرمول کلی آینه‌ها ـ با توجه به‌آنچه تاکنون خواندیم فرمول آینه‌های کروی را می‌توان به‌صورت کلی زیر نوشت :

$$\frac{1}{x}+\frac{1}{x'}=\frac{1}{f}$$

در این فرمول هرگاه شیء حقیقی باشد x مثبت و اگر مجازی

باشد x منفی است . هرگاه تصویر حقیقی باشد x' مثبت و اگر مجازی باشد x' منفی است. هرگاه آینه مقعر باشد f مثبت و اگر محدب باشد f منفی است .

مثال ـ تصویر جسم AB در آینه‌ای مجازی است و طول آن نصف AB است . نوع آینه و فاصلهٔ کانونی آن را تعیین‌کنید در صورتی که فاصلهٔ جسم تا آینه ۱۰cm باشد .

حل ـ از فرمول بزرگنمایی مقدار x' را بدست آورده در فرمول کلی آینه‌ها می‌گذاریم تا f بدست آید :

$$\frac{A'B'}{AB}=\frac{x'}{x}=\frac{1}{2}$$

$$x'=\frac{x}{2}=\frac{10}{2}=5cm$$

چون می‌دانیم‌که تصویر مجازی است ، باید در فرمول به‌جای x' رقم ۵ — را بگذاریم . پس

$$\frac{1}{10}-\frac{1}{5}=\frac{1}{f}$$

$$f=-10cm$$

بنابراین کانون مجازی است چون علامت آن منفی درآمده است . پس آینهٔ مطلوب یك‌آینهٔ محدب به‌فاصلهٔ کانونی ۱۰cm است .

پرسش و مسئله

۱ـ فرق بین تصویرحقیقی و تصویرمجازی چیست؟ آیا همیشه تصویری که چشم می‌بیند تصویری است حقیقی ؟

۲ـ اگر درآینه‌ها تصویر در پشت آینه باشد، حقیقی است یا مجازی ؟ چرا ؟

۳ـ فرق بین انعکاس و پخش نور چیست ؟

۴ـ طول یك آینهٔ تخت چقدر باید باشد و در چه فاصله از سطح زمین

باید آن را به دیوار نصب کنید تا بتوانید تمام قد خود را در آن ببینید ؟ آیا طول آینه به فاصلهٔ شخص ازآینه بستگی دارد یانه ؟

۵ـ چرا یك تیغهٔ شیشه‌ای ضخیم دو تصویر از اجسام تولید می‌کند ؟ و هرگاه یك طرف شیشه را نقره‌اندود کنیم، چرا یکی از تصاویردوشن‌تر است؟

۶ـ در شبهایی که برف بر زمین نشسته است چرا هوا روشن‌تر است ؟

۷ـ هرگاه شخصی با سرعت دو متر در ثانیه به آینهٔ تختی نزدیك شود با چه سرعتی به‌تصویرخود نزدیك می‌شود ؟

۸ـ چشم ناظری به فاصلهٔ ۵۰ سانتیمتر از یك آینهٔ تخت قائم به ابعاد ۴۰ سانتیمتر قرار دارد . تعیین‌کنید این شخص چه سطحی از دیوار پشت سر خود را که به‌فاصلهٔ ۴متر ازآینه است می‌تواند ببیند .

۹ـ در فاصلهٔ یك متری از یك آینهٔ تخت کوچك ، صفحهٔ کدری را به موازات سطح آینه نصب می‌کنیم . این صفحه سوراخی دارد که از آن نور به‌آینه می‌تابد . اشعهٔ انعکاس بر اشعهٔ تابش منطبق است . آینه را کمی می‌چرخانند ، مشاهده می‌شود که لکهٔ روشنی بر صفحه کدر و در فاصلهٔ ۴ سانتیمتری از سوراخ می‌افتد . تعیین کنید آینه را چند درجه چرخانده‌ایم (روش پوگندرف) . جواب : $1^\circ 9'$

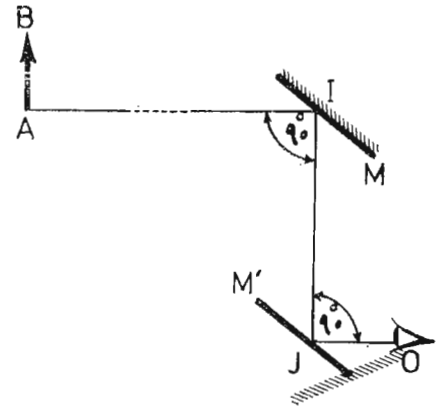
۱۰ـ دستگاهی تشکیل شده است از دو آینهٔ متوازی M و M' (شکل ۶۹) . این دوآینه با خط قائم IJ زاویهٔ 45° می‌سازند . چشم ناظر درنقطهٔ O واقع است و شیء AB را نگاه می‌کند . داریم :

$AB = 2m$

$AI = 11m$

$IJ = 1m$

$JO = 0/2m$



شکل ۶۹

اولاً ـ ناظرتصویر AB را قائم می‌بیند یا افقی ؟

ثانیاً ـ این تصویر مستقیم است یا معکوس ؟

ثالثاً ـ تصویر AB ، به کمك این دستگاه تحت چه زاویه‌ای دیده می‌شود (این زاویه را برحسب رادیان و درجه پیدا کنید) .

جواب : قائم، مستقیم، تقریباً $9^\circ 24'$

۱۱ـ آینهٔ مقعری است به فاصلهٔ کانونی $5cm$. شیء AB به فاصلهٔ $8cm$ از آن و عمود برمحور اصلی قرارگرفته است. معین کنید محل و نوع تصویر و بزرگنمایی آینه را . جواب : $13/3cm$، حقیقی، $\frac{5}{3}$

۱۲ـ آینهٔ مقعری است به‌فاصلهٔ کانونی $12cm$. شیء AB به فاصلهٔ $30cm$ ازآن و عمود برمحور اصلی قرارگرفته است . معین‌کنید محل و نوع تصویر و بزرگنمایی آینه را .

۱۳ـ در آینهٔ مقعر مسئلهٔ بالا شیء AB به‌فاصلهٔ $10cm$ ازآینه قرار می‌گیرد. محل و نوع تصویر و بزرگنمایی آینه را تعیین‌کنید .

۱۴ـ آینهٔ مقعری است به‌شعاع $12cm$. جسم را درچه فاصله ازآینه قرار دهیم تا تصویرآن سه برابر بزرگترشود . جواب : الف ـ $8cm$، ب ـ $4cm$

۱۵ـ شخصی برای اینکه براحتی قرائت کند کتاب را به فاصلهٔ ۲۵ سانتیمتری خود نگاه می‌دارد . این شخص هنگام تراشیدن صورت خود ازیك آینهٔ مقعر به‌فاصلهٔ کانونی ۳۰ سانتیمتر استفاده می‌کند . دراین هنگام صورت این شخص درچه فاصله ازآینه باید باشد ؟ جواب : $10cm$

۱۶ـ آینهٔ محدبی است با فاصلهٔ کانونی $150cm$. شیء AB به‌فاصلهٔ $50cm$ از آن واقع شده است . معین‌کنید محل تصویر وبزرگنمایی‌آینه را .

۱۷ـ در چه‌صورت آینهٔ محدب تصویری برابر شیء می‌دهد ؟ آیا این تصویرمستقیم است یا معکوس ، مجازی است یا حقیقی ؟

دکارت دانشمند فرانسوی اولین بار قوانین انکسار نور را با آزمایشهای ساده پیدا کرد و بیشتر مسائل مبحث نور هندسی را حل کرد .

فصل سوم

شکست نور

شکست نور ـ تاکنون متوجه شده‌اید که هرگاه چوبی را بطور مایل درآب فروکنید ، درمحل برخورد باآب شکسته بنظر می‌رسد ونیز کف حوض پر از آب بالاتر از محل واقعی آن دیده می‌شود .

بسیاری از این مشاهدات روزانه بر اثر کیفیتی است موسوم به شکست نور .

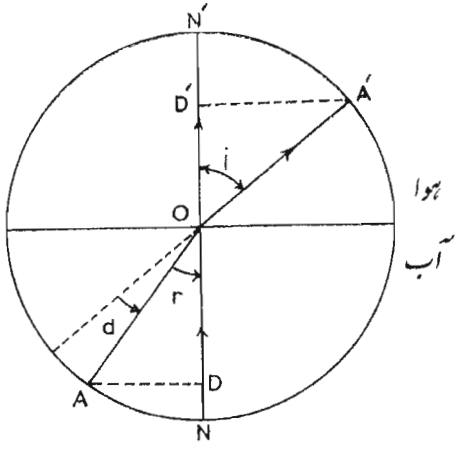
آزمایشهای مختلف نشان داده است که هرگاه نور از یك محیط شفاف وارد محیط شفاف دیگری شودکه غلظت آن بامحیط اول فرق داشته باشد،

در فصل مشترك دومحیط شکسته و از مسیر خود منحرف می‌شود . بطوری که قبلاً بیان کردیم این کیفیت را **شکست** یا **انکسار نور** می‌نامند .

آزمایش اصلی ـ آزمایش زیرسهلترین وآموزنده‌ترین آزمایش برای مطالعهٔ شکست نور است :

بر روی قطعه‌ای ازتختهٔ سفید ، یك دایره و دو قطرعمود برهم رسم می‌کنیم و در مرکز (O) و درنقطه‌ای از محیط آن (A) دو سنجاق عمود برسطح تخته می‌گذاریم . تخته را بطور قائم چنان در آب فرو می‌بریم و نگاه می‌داریم‌که قطردایره درست برسطح آب باشد (شکل ۷۰) .

اکنون از خارج در امتدادی که ظاهراً خط **OA** در آن امتداد دیده می‌شود نگاه می‌کنیم و یك سنجاق دیگر **A′** را روی محیط دایره آنقدر جابجا می‌کنیم تا هر سه سنجاق **A** و **O** و **A′** در یك امتداد دیده شوند. تخته را ازآب بیرون آورده نقاط فوق‌را به‌هم‌وصل می‌کنیم . مشاهده می‌کنیم که خطوط **OA** و **OA′** در یك امتداد نیستند. بنابراین **شعاع نور که در امتداد AO از داخل آب می‌تابد درامتداد OA′ خارج می‌شود .**



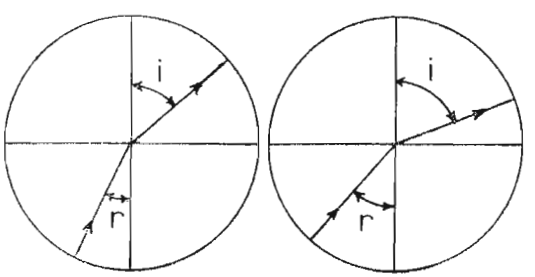
شکل ۷۰

به موجب اصل بازگشت نور ، اگر شعاعی در امتداد **A′O** بتابد درامتداد **OA** واردآب خواهد شد. فصل مشترك دومحیط را که نور درآنجا می‌شکند **سطح شکست نور** یا **دیوپتر** وشعاع نور درمحیط

دوم را **شعاع شکست** می‌نامند . زاویهٔ میان شعاع تابش و عمود برسطح شکست در نقطهٔ تابش را ، **زاویهٔ تابش** می‌نامند (درشکل ۷۰ اگر نور از هوا برآب بتابد زاویهٔ تابش $\hat{i}$ است) و زاویهٔ شعاع شکست را با همین عمود **زاویهٔ شکست** می‌نامند (درشکل ۷۰ اگر نور از هوا برآب بتابد زاویهٔ شکست $\hat{r}$ است) . **صفحهٔ تابش** همان است که در انعکاس تعریف شده وصفحهٔ شعاع شکست وخط عمود برسطح را ، **صفحهٔ شکست** نامند. چنانکه در شکل ۷۰ می‌بینیم ، شعاع نور به اندازهٔ زاویهٔ $\hat{d}=\hat{i}-\hat{r}$ ازامتداد خود منحرف شده‌است. این زاویه را **زاویهٔ انحراف** می‌نامند.

درآزمایش دیگر اگر سنجاق را در نقطهٔ **N** نصب کنیم ، مشاهده می‌کنیم که سنجاق سوم را باید در نقطهٔ **N'** نصب کنیم تا هر سه بر یك خط مستقیم دیده شوند . یعنی اگر شعاعی بطور عمود بر سطح شکست بتابد ، بدون انحراف به راه خود ادامه خواهد داد .

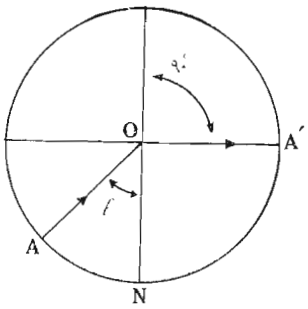
اکنون سنجاق **A** را تدریجاً از **N** دور و به عبارت دیگر زاویهٔ $\hat{r}$ را بزرگ می‌کنیم . مشاهده می‌شود که زاویهٔ $\hat{i}$ هم تدریجاً بزرگ



شکل ۷۱

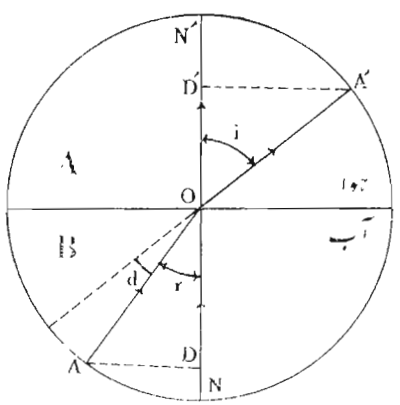
می‌شود ولی همواره از **r** بزرگتر است (شکل ۷۱) و هنگامی می‌رسدکه زاویهٔ $\hat{i}$ به ۹۰ درجه می‌رسد ، یعنی برای دیدن سنجاق **A** باید بطور

افقی در امتداد **A'O** نگاه کنیم (شکل ۷۲) . حال اگر سنجاق **A** را از این محل نیز بالا ببریم ، یعنی اگرزاویهٔ **r** را ازاین مقدار هم زیادترکنیم، دیگر سنجاق **A** ازخارج دیده نمی‌شود، به‌همین مناسبت زاویهٔ $\widehat{AON}=l$ را **زاویهٔ حد** می‌نامند (شکل ۷۲) .



شکل ۷۲

ضریب شکست ـ از نقاط **A** و **A'** (شکل ۷۳) دو عمود **AD** و **A'D'** را برقطر **NN'** وارد کرده طول هریك را بدقت اندازه می‌گیریم و نسبت این دو طول یعنی $\frac{A'D'}{AD}$ را حساب می‌کنیم . مشاهده می‌کنیم‌که درتمام آزمایشها این نسبت مقدار تقریباً ثابت $۱/۳۳=\frac{۴}{۳}$ درمی‌آید (البته هرچه آزمایش دقیق‌تر باشد و خطوط باریکتر رسم شود این نسبت به $\frac{۴}{۳}$ نزدیکتر است) .



شکل ۷۳

بنابر تعریف این مقدارثابت را ، ضریب شکست آب نسبت به هوا می‌نامند .

نسبت ثابت $\frac{A'D'}{AD}$ را می‌توان به صورت زیر در آورد : در مثلث $OA'D'$ ، $\sin i=\frac{A'D'}{R}$ (**R** شعاع دایره است) و در مثلث **OAD** ،

$sin r = \frac{AD}{R}$. از تقسیم دو مقدار فوق خواهیم داشت :

$$\frac{sin i}{sin r} = \frac{A'D'}{AD}$$

یعنی نسبت سینوس زاویهٔ تابش به سینوس زاویهٔ شکست مقداری است ثابت که آن را ضریب شکست می‌نامند و با n نشان می‌دهند پس

$$\frac{sin i}{sin r} = n .$$

بنا براین **ضریب شکست محیط B نسبت به محیط A ، نسبت سینوس زاویهٔ تابش در محیط A به سینوس زاویهٔ شکست در محیط B است .**

رابطهٔ فوق را می‌توان به صورت زیر که موسوم به رابطهٔ دکارت است در آورد :

$$sin i = n sin r$$

جدول تجربی زیر ، در مورد دیوپتر هوا ـ شیشه ، نشان می‌دهد که نسبت $\frac{sin i}{sin r}$ تقریباً ثابت است :

i	r	sin i	sin r	$\frac{sin i}{sin r} = n$
۹°	۶°	۰/۱۶	۰/۱۱	۱/۴۶
۲۷/۵°	۱۸°	۰/۴۶	۰/۳۱	۱/۴۸
۳۸°	۲۴°	۰/۶۱	۰/۴۱	۱/۴۹
۴۸/۵°	۳۰°	۰/۷۵	۰/۵۰	۱/۵۰

ضریب شکست n بستگی به دومحیطی دارد که نور از یکی وارد

دیگری می‌شود . جدول زیر ضریب شکست چند محیط شفاف را نسبت به هوا نشان می‌دهد :

جسم	n	جسم	n
سولفورکربن	۱/۶۳	آب جوش	۱/۳۲
الماس	۲/۴۲	شیشه معمولی	۱/۵۰
نمك متبلور	۱/۵۲	شیشه کراون	۱/۵۲
آب سرد	۱/۳۳	شیشه فلنت	۱/۶۵

قانونهای شکست نور ـ از مشاهدات فوق قانونهای زیر نتیجه می‌شود :

۱ـ شعاع تابش و شعاع شکست و خط عمود بر سطح شکست در نقطهٔ تابش نور هرسه بریك صفحه واقعند (صفحهٔ تابش بر صفحهٔ شکست منطبق است) ؛

۲ـ برای یك دیوپتر معین نسبت سینوس زاویهٔ تابش به‌سینوس زاویهٔ شکست مقداری است ثابت .

یادآوری ـ می‌دانیم کد شعاعی که با زاویهٔ تابش i از هوا بر سطح آب بتابد با زاویهٔ شکست r وارد آب می‌شود . بالعکس اگرشعاع نور با زاویهٔ تابش r از آب به هوا وارد شود بنا بر اصل بازگشت نور زاویهٔ شکست‌آن مساوی i خواهد بود (رجوع به شکل ۷۰) .

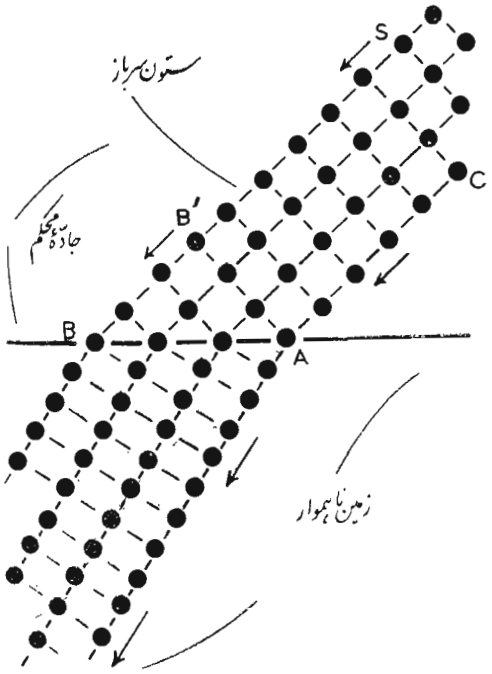
مثال ـ یك دسته اشعهٔ نوری متوازی با زاویهٔ ۴۵° به سطح جسمی به ضریب شکست $n = \sqrt{2}$ می‌تابد . زاویهٔ شکست را پیدا کنید .

حل ـ بنا بر فرمول دکارت $sin i = n sin r$

چون $i = 45°$ و $n = \sqrt{2}$ ، $sin 45° = \sqrt{2} sin r$

$$\text{یا} \quad \frac{\sqrt{۲}}{۲} = \sqrt{۲}\sin r \quad ، \quad \sin r = \frac{۱}{۲} \quad \text{و} \quad r = ۳۰^\circ$$

رابطهٔ ضریب شکست با سرعت نور ـ پس از اینکه روشهای دقیق و قابل اعتمادی برای اندازه گیری سرعت نور بدست آمد ، معلوم شد که سرعت نور در آب کمتر از سرعت آن در هوا و در خلأ است ، بطوری که اگر نور از هوا وارد آب یا محیط شفاف دیگری بشود از سرعتش کم خواهد شد و کندتر حرکت می‌کند . علت شکست نور همین تغییر ناگهانی سرعت آن است . فرض کنید چند صف متوازی از افراد ، در امتداد **SB** بر روی جادهٔ محکمی ، درحرکت باشند و در **AB** به‌یك زمین سنگلاخ برسند . آشکار است که سرعت افراد در این زمین کم می‌شود . افراد هر ردیف باید طوری حرکت کنند که همواره امتداد ردیف بر امتداد سطح عمود باشد (**AB′** عمود بر **AC**) . هنگامی که نفر **A** به خط **AB** رسید از سرعت پیشروی او کاسته می‌شود در حالی‌که نفر چهارم این ردیف در این لحظه در نقطهٔ **B′** است و با همان سرعت قبلی پیش می‌رود . اگر نفر **A** در همان امتداد **AC** به حرکت خود ادامه دهد ، نتیجه این خواهد شدکه پس از آنکه تمام ردیف وارد زمین سنگلاخ شد خط ردیف برخط صف عمود نباشد (رسم کنید تا این نتیجه روشن شود) . این است که نفر **A** مجبور می‌شودکه درشکل ۷۴ به‌طرف چپ خود مایل شود یعنی امتداد صف را طوری بشکند که ردیف برصف عمود باشد . همین‌کیفیت در نور نیز اتفاق می‌افتد . اگر صف بطور عمود بر **AB** برسد ، همهٔ افراد ردیف در یك لحظه به **AB** می‌رسند و دیگر



شکل ۷۴

احتیاجی به شکستن صف نخواهد بود و حرکت خود را در همان امتداد ولی با سرعت کمتر ادامه می‌دهند ($i = ۰$ ، $r = ۰$) .

محاسبات و آزمایشهای‌دقیق نشان داده است که ضریب شکست یك محیط نسبت به‌محیط دیگر برابر با عکس نسبت سرعتهای نور در این دو محیط است .

$$\text{ضریب شکست محیط ۲ نسبت به محیط ۱} = \frac{V_۱}{V_۲}$$

(این رابطه را می‌توانید از شکل ۷۴ پیدا کنید) . مثلاً اگر **V** سرعت نور در هوا و **V′** سرعت آن درآب باشد خواهیم داشت :

$$\text{ضریب شکست آب نسبت به هوا} \quad \left| n = \frac{V}{V'} \right|$$

یادآوری ـ ضریب شکست اجسام شفاف را نسبت به‌خلأ **ضریب شکست مطلق** می‌نامند . از نسبت سرعتها بآسانی ثابت می‌شودکه ضریب شکست محیط **B** نسبت به محیط **A** مساوی نسبت ضریب شکست مطلق

B به ضریب شکست مطلق A است . درصورتی که ضریب شکست مطلق B مساوی n_2 وضریب شکست مطلق A مساوی n_1 باشد، ضریب شکست محیط B نسبت به محیط A مساوی است با :

$$n = \frac{n_2}{n_1}$$

چون ضریب شکست مطلق هوا تقریباً برابر یك است ضریب شکست یك جسم شفاف نسبت به هوا تقریباً برابر است با ضریب شکست مطلق آن جسم .

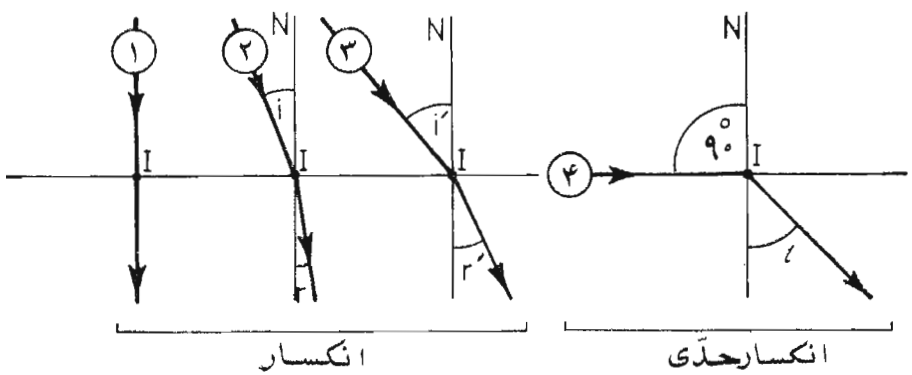
مثال- ضریب شکست مطلق شیشه $\frac{3}{2}$ و از آن آب $\frac{4}{3}$ است . ضریب شکست شیشه نسبت به آب چقدر است ؟

$$N = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{3}{2}}{\frac{4}{3}} = \frac{9}{8}$$

بحث در فرمول دکارت - ازفرمول دکارت $\sin i = n \sin r$ می‌توان همواره مقادیر مختلف r را برحسب i یا بالعکس i را برحسب r بدست آورد .

۱- **نور از محیط رقیق وارد محیط غلیظ می‌شود** - اگر شعاعی ، مثلاً از هوا ، عمود برسطح آب ، یا محیط شفاف دیگر باضریب شکست n ، بتابد همچنان عمود و بدون انحراف وارد محیط دوم می‌شود ، زیرا که دراین صورت $i = 0$ پس $n \sin r = 0$. و چون n صفر نیست $\sin r = 0$ یا $r = 0$ است ، پس $i = 0$ و $r = 0$.

حال اگر زاویهٔ تابش i رفته رفته زیاد شود ، r هم زیاد می‌شود لیکن همواره از i کوچکتر می‌ماند ، زیرا در فرمول دکارت داریم $\sin i = n \sin r$. چون n بزرگتر از یك است $\sin i > \sin r$ و $i > r$ است. بنابراین هنگامی‌که زاویهٔ i به ۹۰° برسد، زاویهٔ r به مقداری می‌رسد مساوی l که از ۹۰° کمتراست . این مقدار همان **زاویهٔ حد** است، زیرا



شکل ۷۵

در حقیقت حد زوایای شکست محسوب می‌شود (شکل ۷۵) و مقدار آن از فرمول فوق چنین بدست می‌آید :

$$\sin 90^\circ = n \sin l$$

$$1 = n \sin l$$

پس

$$\sin l = \frac{1}{n}$$

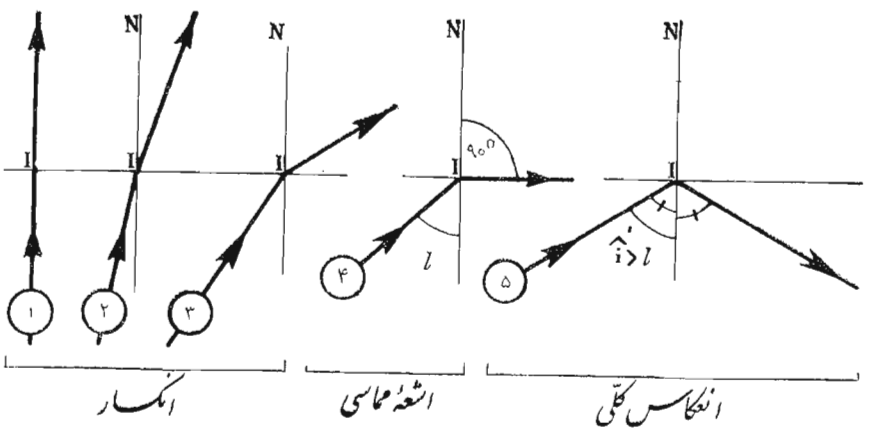
در مورد آب خواهیم داشت :

$$\sin l = \frac{3}{4} \quad \text{یعنی} \quad l = 48/5^\circ$$

در مورد شیشه : $\sin l = \frac{2}{3}$ یعنی $l = 42^\circ$

۲ ـ **نور از محیط غلیظ وارد محیط رقیق می‌شود** ـ اشعهٔ (۱) که عمود بر سطح آب می‌تابد در همان امتداد عمود از آب خارج می‌شود ($i=0$ و $r=0$) .

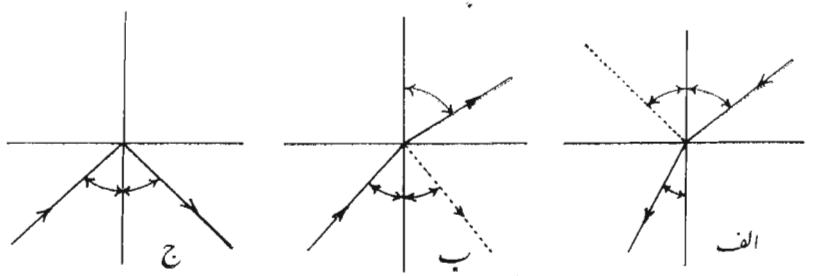
اشعه‌ای نظیر (۲) و (۳) ، که با زاویهٔ $i<l$ بر آب می‌تابند ، از آب خارج می‌شوند و اشعه‌ای مانند (۴) ، که زاویهٔ تابش آنها مساوی



شکل ۷۶

زاویهٔ حد است ($i=l$) مماس بر سطح آب خارج می‌شوند . از آن پس اشعه‌ای مانند (۵) که با زاویهٔ بزرگتر از l به سطح آب می‌تابند دیگر از آن بیرون نمی‌روند، بلکه سطح آب برای آنها درست همچون آینه‌ای است که تمام نور را دوباره به‌داخل آب منعکس می‌کند . دراین صورت می‌گویند که **انعکاس کلی** روی داده است (شکل ۷۶) .

یادآوری ـ چنانکه پیش از این گفته شد ، هنگامی که یك دسته اشعهٔ نوری بر سطح جدایی دو محیط بتابد قسمتی از آن منعکس می‌شود و قسمتی می‌شکند (شکل ۷۷ ـ الف و ب) . هرگاه نور ازمحیطی که ضریب شکست آن کمتر است به محیطی که ضریب شکست‌آن بیشتر است وارد شود همیشه پدیده‌های انعکاس و شکست با هم و در یك زمان



شکل ۷۷

الف ـ قسمتی ازاشعه وارد آب و قسمتی منعکس می‌شود .

ب ـ قسمتی از اشعه در آب منعکس وقسمتی‌از آب خارج می‌شود .

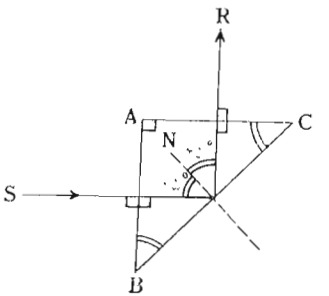
ج ـ تمام اشعهٔ نور بر سطح آب منعکس می‌شود .

اتفاق می‌افتند . اما مشاهده می‌شود که هرچه زاویهٔ تابش‌کوچکتر، یعنی اشعهٔ تابش به خط عمود نزدیکتر باشد، شدت اشعهٔ منعکس‌کمتر و شدت اشعهٔ شکست بیشتر است وبرعکس هرچه زاویهٔ تابش بزرگتر باشد، شدت اشعهٔ منعکس بیشتر و شدت اشعهٔ شکست کمتر است . بهمین دلیل است که اگر درکنارآب راکدی بایستیم و درآب نگاه کنیم تصویر خود را در آن کمرنگ می‌بینیم ، در حالی که اگر جسمی در ته آب باشد بخوبی دیده می‌شود . اما اگر از کنار این آب قدری دور شویم جسمی را که در ته آب است نمی‌توانیم بخوبی ببینیم ؛ در حالی که تصویر درختها و اجسامی را که درکنار آب است بهتر می‌بینیم .

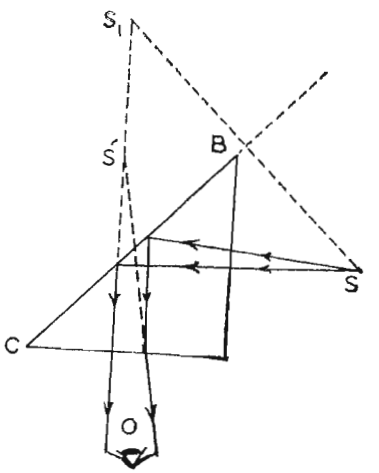
اکنون حالتی را در نظر می‌گیریم که نور از محیطی که ضریب شکست آن بیشتر است به محیطی که ضریب شکست آن کمتراست وارد بشود . اگر زاویهٔ تابش کمتر از زاویهٔ حد باشد پدیده‌های انعکاس و شکست باهم و دریك زمان اتفاق می‌افتند . اما اگر زاویهٔ تابش از زاویهٔ

حد بیشترشود دیگر پدیدهٔ شکست اتفاق نمی‌افتد و **تمام اشعهٔ تابش منعکس می‌شود** (شکل ۷۷ـ ج) . به همین دلیل است که می‌گویند **انعکاس کلی** رخ داده است .

منشور انعکاس کلی ـ منشور انعکاس‌کلی منشوری است که قاعدهٔ آن مطابق شکلهای ۷۸ و ۷۹ مثلث قائم‌الزاویهٔ متساوی‌الساقین است . می‌دانیم‌که زاویهٔ حد شیشه 42° است. فرض‌کنیم‌که شعاع S عمود بروجه AB بتابد . این شعاع در همان امتداد وارد منشور شده و با زاویهٔ $i=45^\circ$ بر سطح BC می‌تابد . چون این زاویه بزرگتر اززاویهٔ‌حد 42° است، انعکاس‌کلی پیدا می‌کند و چنانکه ازشکل پیداست عمودبر سطح AC می‌تابد ودرهمان‌امتداد خارج می‌شود . می‌بینیم که این منشور برای شعاع عمودی درست همچون آینهٔ تخت BC کار کرده است. و اگر از نقطهٔ O نگاه‌کنیم (شکل ۷۹) ، تصویر نقطهٔ نورانی S را در S' خواهیم دید (چون اشعه‌ای که از S بر منشور می‌تابد وبه‌چشم می‌رسد کاملاً عمود نیست وکمابیش می‌شکند. این است‌که نقطهٔ S_1 درست نسبت به وتر CB قرینهٔ



شکل ۷۸

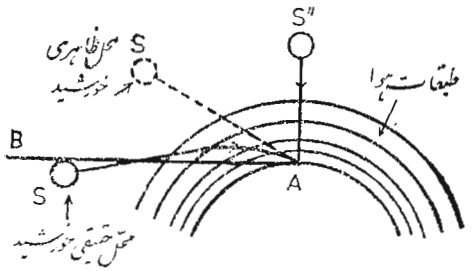


شکل ۷۹

S نیست وکمی نزدیکتر دیده می‌شود) .

بنا بر این می‌توان از منشور انعکاس کلی بدجای آینهٔ تخت استفاده کرد .

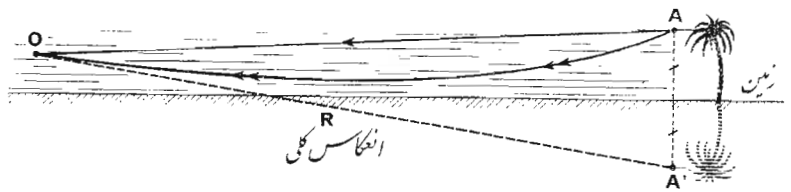
تأثیرشکست نور در رؤیت ستاره‌ها ـ سرعت نور در هرگاز بستگی به‌شرایط فیزیکی آن گاز دارد . هرچه گاز رقیق‌تر باشد سرعت بیشتر است . چگالی لایه‌های مختلف جوّ زمین یکسان نیست . هر چه بالاتر رویم هوا رقیق‌تر و سرعت نور درآنجا بیشتراست ، درنتیجه شعاع نوری که از خورشید یا ستاره‌ها به چشم رسیده است در لایه‌های هوا پیوسته شکست یافته و مسیر آن به شکل منحنی درآمده است (شکل ۸۰) و چون چشم همواره جسم را در امتداد شعاع ، در آن نقطه که به چشم تابیده است ، می‌بیند ، خورشید و ستاره‌ها را در امتداد واقعی نمی‌بیند ، بلکه آنها را اندکی بالاترمی‌بیند ، این انحراف هنگام طلوع وغروب بیشتراست ، چه اشعه مایلتر می‌تابند . این‌کیفیت باعث می‌شودکه بتوان خورشید را مدت زمانی در حدود ۶ تا ۷ دقیقه پیش از طلوع و پس از غروب مشاهده کرد (شکل ۸۰) . در S'' زاویهٔ تابش صفر است .



شکل ۸۰

سراب ـ هنگام تابستان درجاده‌های صاف وآسفالتی یا دربیابانها ، هوای مجاور زمین براثرگرم شدن ، رقیق‌تر از طبقات بالاتر است ، واین امر باعث ایجاد سراب می‌شود . بدین طریق که اشعهٔ خورشیدی یا نوری

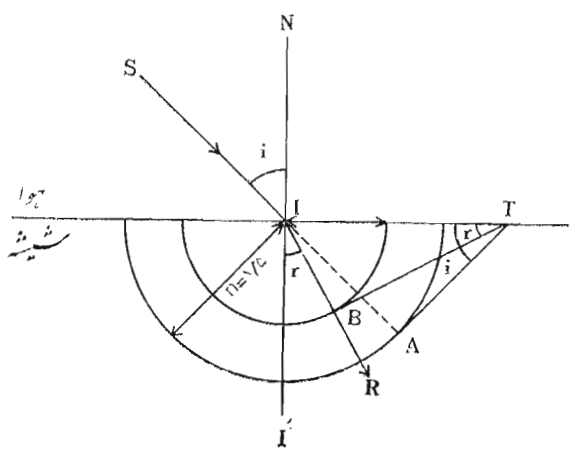
که از نقطهٔ مرتفعی بطور خیلی مایل به پایین می‌تابد ، پس از شکستهای متوالی ، سر انجام رو به بالا انعکاس کلی یافته به چشم می‌رسد ، و چنین



شکل ۸۱

می‌نماید که نور به سطح آب بر خورده و منعکس شده است . شکل ۸۱ نشان می‌دهد که چشم ، علاوه بر دیدن خود جسم ، تصویر معکوسی از جسم را برائرسراب مشاهده می‌کند. سراب اغلب سبب گمراهی مسافرین در بیابانها بوده است .

رسم شعاع شکست به طریق هندسی ـ شعاع SI برسطح شیشه‌ای که ضریب شکست آن ۱/۵ است می‌تابد ، می‌خواهیم شعاع شکست IR را رسم کنیم . به مرکز I دو دایره به‌شعاع ۱ و $n=1/5$ رسم می‌کنیم .



شکل ۸۲

شعاع SI را امتداد می‌دهیم تا دایرهٔ بزرگتر را در نقطه‌ای مانند A قطع کند (شکل ۸۲) . از A مماسی براین دایره رسم می‌کنیم واز محل تقاطع آن با سطح شکست (نقطهٔ T) مماس TB را به دایرهٔ کوچکتر رسم می‌نماییم . از B (نقطهٔ تماس) به I وصل می‌کنیم . IBR امتداد شعاع شکست است. چرا ؟ (سینوس زوایای i و r را بریکدیگر تقسیم کنید.)

پرسش و مسئله

۱ـ یك دسته اشعهٔ نوری از هوا وارد محیطی می‌شود که ضریب شکست آن $n=1/732$ است (که آن را می‌توان برابر $\sqrt{3}$ دانست) . به فرض آنکه شعاع شکست با خط عمود بر دیوپتر زاویهٔ 30° بسازد ، زاویهٔ تابش را تعیین کنید .

۲ـ ضریب شکست محیط دوم دوبرابر ضریب شکست محیط اول است. به طریق رسم و محاسبه زاویهٔ حد شکست را تعیین کنید .

۳ـ یك دسته اشعهٔ متوازی تحت زاویهٔ 45° برسطح آب می‌تابد. زاویهٔ شکست را به طریق رسم ومحاسبه بدست‌آورید (ضریب شکست آب $\frac{4}{3}$ است) .

۴ـ درمسئلهٔ فوق زاویهٔ انحراف را محاسبه‌کنید .

۵ـ یك دسته اشعهٔ نوری متوازی تحت زاویهٔ 50° از داخل‌آب برسطح آب می‌تابد . آیا چنین شعاعی ازآب خارج می‌شود ؟

۶ـ سرعت نور درآب زیادتر است یا درشیشه ؟

۷ـ درصورتی که سرعت نور در هوا تقریباً $300000\,km/s$ باشد ، سرعت آن درآب چقدر است ؟

۸ـ سرعت نور درمحیط شفافی مساوی $200000\,km/s$ است، ضریب شکست این محیط نسبت به هوا چقدر است ؟

۹ـ در سولفورکربن به‌ضریب شکست ۱/۶۳ سرعت نور چقدر است ؟

۱۰ـ ضریب شکست الماس نسبت به‌هوا ۲/۴۲ است. زاویهٔ حد شکست

را در الماس تعیین‌کنید . اگر الماس را درآب غوطه‌ورکنیم زاویهٔ حد شکست آن چقدر خواهد شد . ضریب شکست آب نسبت به هوا $\frac{۴}{۳}$ است .

جواب : $I=۲۴^\circ\ ۲۴'$ ، $I'=۳۳^\circ\ ۲۵'$

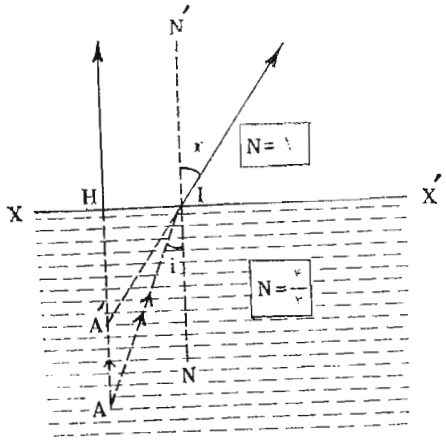
۱۱ـ نور در امتداد SI برسطح جدایی دومحیط می‌تابد . IR امتداد شعاع انعکاس و IR′ امتداد شعاع شکست است . زاویهٔ تابش چقدر باشد تا IR بر IR′ عمود شود . ضریب شکست محیط دوم نسبت به محیط اول برابر است با n . به ازای $n=۱/۵۲$ جواب عددی مسئله را بدست آورید .

جواب : $tgi=n$ ، $i=۵۶^\circ\ ۳۹'$

دیوپتر تخت ـ تیغهٔ متوازی‌السطوح

دیوپتر تخت ـ دومحیط شفاف راکه بدوسیلهٔ سطحی ازیکدیگر جدا شده باشند یك **دیوپتر**[۱] می‌نامند . درصورتی که فصل مشترك دو محیط یك سطح تخت باشد دیوپتر را دیوپتر تخت گویند .

تصویر در دیوپتر تخت ـ مشاهدات روزانه نشان می‌دهدکه اشیایی که در آب هستند ، برای ناظری که از خارج بدانها نگاه می‌کند ، نزدیکتر بنظر می‌رسند . علت چیست ؟ از نقطه‌ای از جسم مثلا A یك دسته اشعه برسطح آب می‌تابد . از میان این اشعه دو شعاع AH (عمود بر سطح آب) و AI را در نظر بگیریم . امتداد این اشعه پس از شکست ، در نقطه‌ای مانند A′ یکدیگر را قطع می‌کنند و چنین بنظر می‌رسد که نور از A′ به چشم می‌رسد . از این‌رو چشم نقطهٔ A را در A′ مشاهده می‌کند که تصویری است مجازی از نقطهٔ A (شکل ۸۳) .



شکل ۸۳

برای یافتن محل A′ فرض می‌کنیم که $AH=x$ و $A'H=x'$

۱ - Dioptre

و ضریب شکست آب n باشد . از دو مثلث AHI و $A'HI$ ، تانژانت زوایای i و r را بدست آورده بریکدیگر تقسیم می‌کنیم .

$$(\widehat{HAI}=i \text{ و } \widehat{HA'I}=r)\quad tgr=\frac{HI}{HA'}\ ،\ tgi=\frac{HI}{HA}$$

$$x'=x\frac{tgi}{tgr} \text{ و ازآنجا } \frac{tgi}{tgr}=\frac{HA'}{HA}=\frac{x'}{x}$$

چون نسبت $\frac{tgi}{tgr}$ مقدار ثابتی نیست ، محل تصویر A' هم ثابت نیست و بستگی دارد به زاویهٔ r یا محل چشم ، و چنانکه هنگام نگاه کردن در آب حوض مشاهده کرده‌اید ، وقتی‌که جای چشم نسبت به‌سطح آب چنان تغییرکندکه r بزرگتر شود ، کف حوض رفته رفته بالاتر بنظر می‌رسد . لیکن اگر تقریباً عمودی به سطح آن نگاه کنیم ، زاویهٔ r ، و در نتیجه زاویهٔ i ، مقادیر کوچکی خواهند داشت . در این صورت می‌توان به جای تانژانت آنها سینوس آن زوایا را گذاشت (جدول آخر کتاب) .

$$x'=x\frac{sini}{sinr}$$

و چون $\frac{sini}{sinr}=\frac{1}{n}$ است ، خواهیم داشت $x'=\frac{x}{n}$

اکنون می‌توان تغییرمکان AA' را نیز حساب‌کرد .

$$AA'=x-x'=x-\frac{x}{n}$$

یا

$$\boxed{AA'=x(1-\frac{1}{n})}$$

فرمول اخیر نشان می‌دهد که هنگامی که زاویهٔ تابش کوچك فرض شود ، محل تصویر A' تقریباً ثابت است (زیرا x و n ثابتند) .

مثال ـ جسمی‌که یك متر زیر آب است در چه فاصله از سطح آب دیده می‌شود $(n=\frac{4}{3})$ ؟

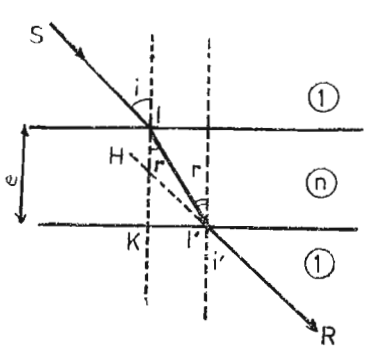
حل :
$$x'=\frac{x}{n}=100\times\frac{3}{4}=75cm$$

یعنی اگر تقریباً بطور عمود نگاه کنیم ، این جسم ۷۵ سانتیمتر زیر سطح آب یا ۲۵ سانتیمتر بالاتر از محل خود بنظر می‌رسد .

یادآوری ـ اگر A شیئی مجازی باشد ، A' تصویر آن حقیقی خواهد بود (چرا ؟) .

تیغهٔ متوازی‌السطوح ـ تیغهٔ متوازی‌السطوح محیط شفافی است که با دو سطح تخت موازی از محیطهای شفاف دیگر جدا شده باشد ، مانند تیغه‌های شیشه‌ای پنجره یا شیشهٔ آینه .

اگر یك دسته اشعهٔ نوری متوازی بطور مایل بریك تیغهٔ متوازی‌السطوح بتابد ، قسمتی از آن شکسته شده وارد تیغه می‌شود و از سطح دیگر به موازات امتداد تابش خارج خواهد شد .



شکل ۸۴

علت این امر با رسم مسیر نور روشن می‌شود (شکل۸۴) . شعاع SI در امتداد II' وارد تیغه می‌شود بطوری که $sini=nsinr$ (۱) و در امتداد $I'R$ از آن خارج

می‌گردد بطوری که $\sin i' = n \sin r$ (۲) . چون طرف دوم دو رابطهٔ (۱) و (۲) باهم مساویند خواهیم داشت :

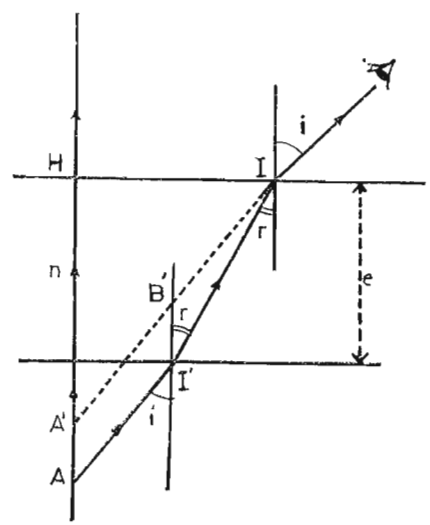
$$\sin i = \sin i'$$

یعنی $i = i'$. بنابراین $I'R$ موازی با SI است (شکل ۸۴) .

از این‌رو گوییم‌که تیغه نور را منحرف نمی‌کند ، بلکه فقط آن را منتقل می‌نماید . البته هرچه تیغه نازکتر باشد مقدار انتقال کمتر است (چرا ؟) .

تصویر در تیغهٔ متوازی‌السطوح ـ نقطهٔ A از پشت تیغهٔ متوازی‌السطوح در A' دیده می‌شود (شکل ۸۵). اگر در اینجا نیز تقریباً در امتداد عمود بر تیغه نگاه‌کنیم ، محاسبهٔ AA' ساده می‌شود . در شکل ۸۵ ، $AA' = I'B'$ و B' را می‌توان تصویر نقطهٔ I' در دیوپتر تخت HI بشمار آورد. پس اگر e ضخامت تیغه باشد (فاصلهٔ I' از HI)، مقدار تغییر مکان $I'B'$ چنین خواهد شد :

$$I'B' = e\left(1 - \frac{1}{n}\right)$$



شکل ۸۵

زیرا $x = e$ است .

پس

$$AA' = e\left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

می‌بینیم که در تیغهٔ متوازی‌السطوح نیز ، اگر تقریباً بطور عمود بر سطح تیغه نگاه کنیم ، تغییر مکان AA' بستگی به فاصلهٔ نقطهٔ A از تیغه ندارد .

مثالـ یك جسم را از پشت تیغه‌ای به‌کلفتی ۳ میلیمتر و ضریب شکست $\frac{۳}{۲}$ چقدر جلوتر می‌بینیم ؟

$$AA' = ۳\left(۱ - \frac{۲}{۳}\right) = ۱\text{mm}$$

پرسش و مسئله

۱ ـ کف حوض پر از آبی در فاصلهٔ ۴۰ سانتیمتری از سطح آب بنظر می‌رسد . عمق حوض چقدر است $\left(n = \frac{۴}{۳}\right)$ ؟

۲ ـ کف حوضی را که تا ارتفاع ۶۰ سانتیمتر آب دارد ، تحت زاویهٔ ۴۵° نگاه می‌کنیم ، با استفاده ازجدول خطوط مثلثاتی آخرکتاب حساب‌کنید کف حوض چقدر بالاتر بنظر می‌رسد ؟

۳ـ یك ماهی بنظر می‌رسدکه در ۱۵ سانتیمتری زیر آب شنا می‌کند . محل حقیقی آن را پیداکنید $\left(n = \frac{۴}{۳}\right)$.

۴ـ کلفتی شیشهٔ ته یك لیوان ۱٫۵cm است . در لیوان تا ارتفاع ۱۰ سانتیمتر آب ریخته وآن را روی سکه‌ای می‌گذاریم . تعیین‌کنید اگر از بالای لیوان نگاه‌کنیم سکه چقدر بالاتر دیده می‌شود (ضریب شکست آب $\frac{۴}{۳}$ و ضریب شکست شیشه $\frac{۳}{۲}$ است) .

جواب : ۳cm

۵ ـ ثابت کنید که هرگاه یك طرف شیشه‌ای به ضخامت ۱۲mm و

ضریب شکست $\frac{۳}{۲}$ را نقره‌اندود کنیم ، آن شیشه مانند آینه‌ای تخت خواهد بود که سطح منعکس‌کننده‌اش در ۴ میلیمتری سطح نقره‌اندود شیشه است .

۶ ـ چشم ناظری که بطور عمود بر سطح آب نگاه می‌کند در نقطهٔ A به‌فاصلهٔ ۱۲۰ سانتیمتری بالای سطح آب است . در نقطهٔ B ، واقع بر خط قائمی که از نقطهٔ A می‌گذرد ، در ۸۰ سانتیمتری زیر آب ، چشم ماهیی قرار دارد که آن هم بطور عمود بر سطح آب نگاه می‌کند . چشم ناظر چشم ماهی را در B' و ماهی چشم ناظر را در A' می‌بیند . فواصل AB' و BA' را تعیین کنید. چه‌نسبتی بین AB' و BA' وجود دارد ؟ ضریب شکست آب $\frac{۴}{۳}$ است .

جواب : $AB'=۱/۸m$ ، $BA'=۲/۴m$ ، نسبت $\frac{BA'}{AB'}$ برابر است با ضریب شکست آب .

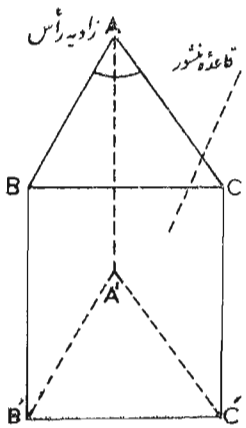
۷ ـ ظرفی محتوی آب به ضریب شکست ۱/۳۳ و بنزن به ضریب شکست ۱/۴۸ است . ارتفاع آب ۲۵cm وارتفاع بنزن ۱۰cm است (بنزن بر روی آب می‌ایستد و تقریباً درآب حل نمی‌شود) . چشم ناظری ،که بطور عمود بر سطح مایع نگاه می‌کند ، در ۱۵ سانتیمتری بالای سطح آزاد بنزن است . این شخص کف ظرف را در چه فاصله از چشم خود می‌بیند ؟

جواب : ۴۰/۵cm

منشور

تعریف ـ در مبحث نور هندسی ، در فیزیك ، منشور به محیط شفافی گفته می‌شود که محدود به دو دیوپتر مسطح غیرمتوازی است .

دوصفحه‌ای راکه این محیط به‌آنها محدود می‌شود **وجوه** منشور و فصل مشترك این دو صفحه را **یال** منشور می‌نامند . سطح مقابل یال منشور ، خواه مسطح باشد خواه مسطح نباشد ، **قاعدهٔ** منشور و هر صفحهٔ عمود بر یال را **صفحهٔ مقطع اصلی** منشور می‌نامند . فصل مشترکهای صفحهٔ مقطع اصلی با وجوه منشور زاویه‌ای تشکیل می‌دهد که آن را **زاویهٔ رأس** منشور می‌گویند .



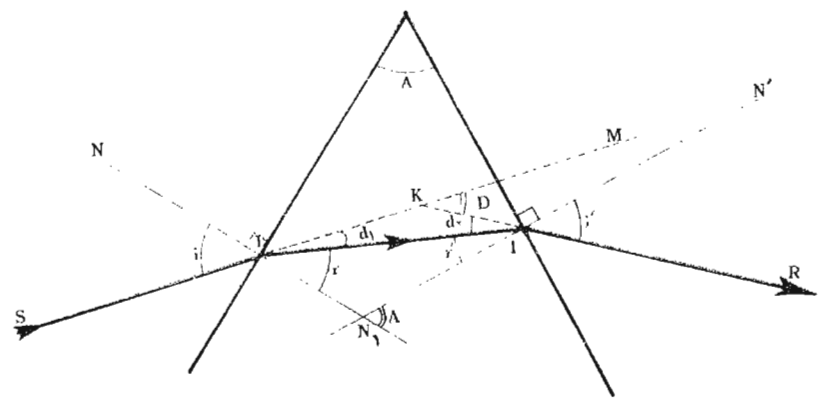
شکل ۸۶

در شکل ۸۶ صفحات $ABB'A'$ و $ACC'A'$ وجوه منشور و AA' یال منشور است . مثلث ABC صفحهٔ مقطع اصلی است و $\widehat{BAC}$ زاویهٔ رأس منشور است . به منظور سهولت بررسی معمولاً منشوری را انتخاب می‌کنیم که محیط طرفین آن یکسان باشد. و نیز در مسیر نور تابش شیشه‌ای رنگین ، مثلاً به رنگ سرخ ، قرار می‌دهیم ؛ زیرا در غیر این صورت پدیدهٔ تجزیهٔ نور ، که بعداً از آن گفتگو می‌کنیم ، موجب کم شدن دقت نتایج حاصل می‌شود .

فرمولهای منشور ـ ۱ ـ فرض می‌کنیم که از نقطهٔ S شعاع SI

که در صفحهٔ مقطع اصلی منشور است تحت زاویهٔ i بر وجه AB منشور بتابد . این شعاع تحت زاویهٔ r در امتداد II′ وارد منشور خواهد شد (شکل ۸۷) ، بطوری‌که

$$\boxed{\sin i = n \sin r} \qquad (۱)$$



شکل ۸۷

فرض بر آن است که ضریب شکست منشور نسبت به محیط طرفین آن بزرگتر از یك است . بنابراین **نور تحت هر زاویه‌ای که بتابد وارد منشور می‌شود .**

۲ ـ شعاع II′ تحت زاویهٔ r′ از داخل بر وجه AC می‌تابد . **درصورتی که این زاویه از زاویهٔ حد منشور کوچکتر باشد** ، شعاع II′ تحت زاویهٔ i′ از منشور خارج می‌شود بطوری که

$$\boxed{\sin i' = n \sin r'} \qquad (۲)$$

۳ ـ چون زاویهٔ $N_۱$ مساوی زاویهٔ A است (اضلاع عمودبرهم) ، و نیز زاویهٔ $N_۱$ زاویهٔ خارجی مثلث $IN_۱I'$ یعنی $\hat{N}_۱ = r + r'$ است ،

بین زاویهٔ رأس A و زوایای r و r′ رابطهٔ زیر برقرار است :

$$\boxed{A = r + r'} \qquad (۳)$$

۴ـ شعاع تابش SI در امتداد I′R از منشور خارج می‌شود ، یعنی به اندازهٔ زاویهٔ D انحراف پیدا می‌کند . این زاویه را **زاویهٔ انحراف** می‌نامند و مقدار آن چنین محاسبه می‌شود : زاویهٔ D زاویهٔ خارجی مثلث KII′ و مساوی مجموع دو زاویهٔ مقابل آن است . پس

$$\hat{D} = \widehat{KII'} + \widehat{KI'I} = (i - r) + (i' - r')$$

یا $D = i + i' - (r + r')$ و چون $r + r' = A$ است :

$$\boxed{D = i + i' - A} \qquad (۴)$$

چهار فرمول بالا را فرمولهای منشور می‌نامند . با در دست داشتن زاویهٔ تابش i می‌توان مقادیر r و r′ و i′ و D را در هر منشور معین بدست آورد .

مثال ـ منشوری است به زاویهٔ رأس $A = ۶۰^\circ$ و ضریب شکست $n = \sqrt{۲}$. یك شعاع نور با زاویهٔ تابش $i = ۴۵^\circ$ بر آن می‌تابد . زاویهٔ انحراف منشور چقدر است ؟

حل ـ از فرمول (۱) منشور مقدار r حساب می‌شود :

$$\sin ۴۵^\circ = \sqrt{۲} \sin r$$

$$\sin r = \frac{۱}{۲} \text{ یعنی } \frac{\sqrt{۲}}{۲} = \sqrt{۲} \sin r \text{ پس } r = ۳۰^\circ$$

و چون $A = r + r'$ است ، $r' = A - r = ۶۰ - ۳۰ = ۳۰^\circ$. از فرمول (۲) مقدار i′ یعنی زاویهٔ خروج از منشور بدست می‌آید :

$$\sin i' = n \sin r'$$

$$\sin i' = \sqrt{۲} \sin ۳۰^\circ \quad \text{پس} \quad \sin i' = \frac{\sqrt{۲}}{۲} \quad \text{و در نتیجه} \quad i' = ۴۵^\circ$$

طبق فرمول (۴) زاویهٔ انحراف منشور مساوی است با

$$D = i + i' - A = ۴۵ + ۴۵ - ۶۰ = ۳۰^\circ$$

حالت مخصوص ـ در صورتی که زاویهٔ رأس منشور و زاویهٔ تابش نور هر دو کوچك باشند ، فرمولهای منشور به صورتهای سادهٔ زیر در می‌آید :

۱ـ چون زاویهٔ i کوچك است ، زاویهٔ r هم کوچك است ومی‌توان به‌جای سینوس این زوایا ، مقدار زوایا را برحسب رادیان قرار داد (جدول آخر کتاب) . پس :

$$\boxed{i = nr} \qquad (۱)$$

۲ ـ چون زاویهٔ A نیز کوچك فرض شده است ، بنا بر رابطهٔ $r' = A - r$ مقدار r' و در نتیجه i' هم کوچك خواهد شد و می‌توان نوشت :

$$\boxed{i' = nr'} \qquad (۲)$$

۳ـ فرمول سوم تغییری نمی‌کند :

$$\boxed{A = r + r'} \qquad (۳)$$

۴ـ فرمول انحراف بدین صورت درمی‌آید :

$$D = i + i' - A$$

$$D = nr + nr' - A = n(r + r') - A = nA - A$$

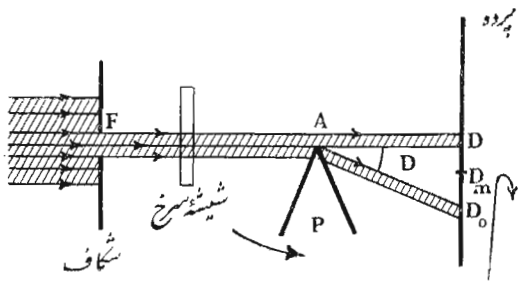
یا

$$\boxed{D = (n - ۱)A} \qquad (۴)$$

پس اگرزاویهٔ رأس منشور و زاویهٔ تابش نورکوچك باشند ، زاویهٔ انحراف مقداری است ثابت که بستگی به زاویهٔ تابش ندارد .

مینیمم انحراف منشور ـ چنانکه از فرمول کلی انحراف معلوم می‌شود، هرگاه زاویهٔ i تغییرکند زاویهٔ انحراف هم تغییر می‌کند ، برای مطالعهٔ تغییرات D به‌آزمایش زیر می‌پردازیم :

جلو یك چراغ پر نور یك شکاف باریك بطور افقی قرار داده و نوری را که از شکاف می‌گذرد پس‌ازگذشتن از شیشه‌ای به رنگ سرخ بریك منشور A می‌تابانیم (شکل۸۸). در آغاز کار منشور را

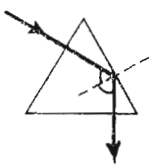


شکل ۸۸

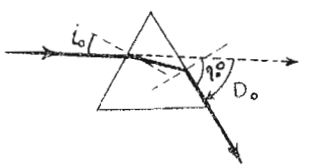
طوری قرارمی‌دهیم‌که شعاع نورتقریباً مماس به‌وجه‌آن بتابد ($i = ۹۰^\circ$). این شعاع‌نور پس از خروج ازمنشور منحرف‌گشته و درنقطهٔ D_0 برروی پرده‌ای می‌افتد .

حال اگرمنشور را به‌دورنقطهٔ A درجهت پیکان بچرخانیم ، زاویهٔ i تدریجاً از ۹۰° کوچکتر می‌شود و مشاهده می‌کنیم که لکهٔ نورانی بر روی پرده از نقطهٔ D_0 تدریجاً بالارفته به نقطه‌ای مانند D_m می‌رسد و سپس پایین می‌آید . بنا براین زاویهٔ انحراف منشور در وضع D_m به‌کمترین‌مقدارخود رسیده است. این مقدار انحراف را **مینیمم انحراف**

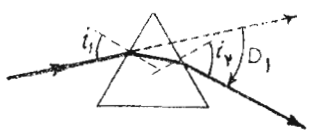
۱- $i<i_0$ (در این شکل $i=0$ است) . روی وجه دوم منشور انعکاس کلی رخ می‌دهد .



۲- $i=i_0$
شعاع خروجی مماس بروجه دوم منشور است .
زاویهٔ انحراف D_0

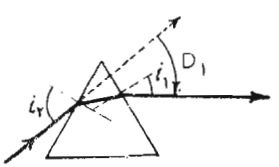


۳- $i=i_1$
$(i_0<i_1<i_m)$
زاویهٔ خروجی $i_2>i_1$
زاویهٔ انحراف $D_1<D_0$

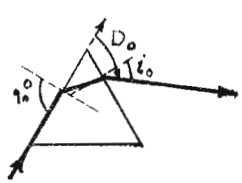


۴- $i=i_m$
زاویهٔ خروجی i^m
زاویهٔ انحراف D_m
(مینیمم زاویهٔ انحراف)

۵- $i=i_2$
(به شکل ۳ مراجعه کنید)
زاویهٔ خروجی i_1
زاویهٔ انحراف D_1



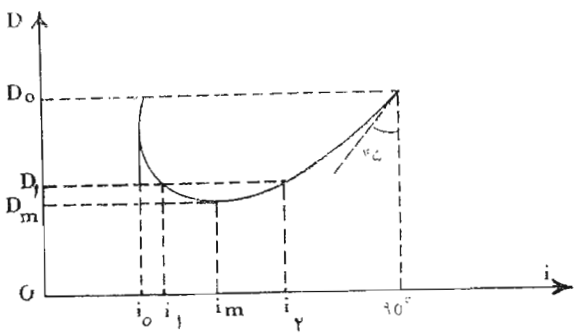
۶- $i=۹۰°$
(تابش مماس بروجه منشور است)
زاویهٔ خروجی i_0
زاویهٔ انحراف D_0



شکل ۸۹

می‌نامند . شکلهای ۸۹ تغییرات زاویهٔ انحراف را با زاویهٔ تابش نشان می‌دهد .

هرگاه از راه آزمایش مقادیر مختلف D را برای i های مختلف بدست آورده برروی دو محور مختصات ببریم و نقاط مربوط را ، به‌طریق نقطه‌یابی ، به هم وصل کنیم منحنی شکل ۹۰ بدست می‌آید که یك نقطهٔ مینیمم دارد .



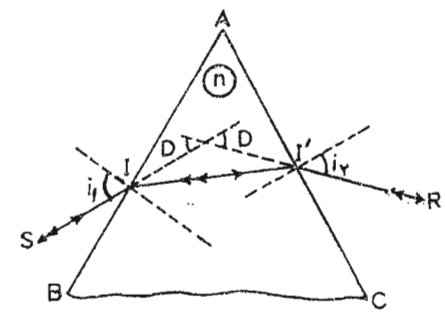
شکل ۹۰

آزمایش بالا و منحنی آن نشان می‌دهد که همواره به ازای دو مقدار زاویهٔ تابش (i_1 و i_2) یك مقدار برای انحراف D وجود دارد. در واقع به موجب اصل بازگشت نور، هرگاه شعاعی تحت زاویهٔ i_1 به منشور بتابد و تحت زاویهٔ i_2 خارج شود ، انحراف مساوی $D=i_1+i_2-A$ است و هرگاه شعاع نور در امتداد RI' یعنی با زاویهٔ تابش i_2 بتابد با زاویهٔ i_1 خارج می‌شود . زاویهٔ انحراف این‌بار $D=i_2+i_1-A$ است که برابر با زاویهٔ انحراف حالت پیش است (شکل ۹۱) .

بنابراین زوایای i_1 و i_2 که برای آنها زاویهٔ D یکسان است ، یکی زاویهٔ تابش برمنشور و دیگری زاویهٔ خروج از آن است . منحنی

فوق نشان می‌دهد که در مینیمم انحراف این دو زاویه با یکدیگر مساوی هستند. به عبارت دیگر هنگامی که زاویهٔ انحراف مینیمم می‌شود، زوایای تابش و خروجی منشور با یکدیگر برابرند. یعنی

$$i_1 = i_2$$

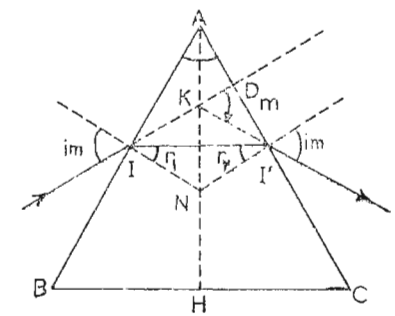


شکل ۹۱

محاسبهٔ ضریب شکست منشور ـ از انحراف مینیمم منشور می‌توان برای بدست آوردن ضریب شکست منشور استفاده کرد (شکل ۹۲).

طبق رابطهٔ دکارت $(n = \frac{\sin i}{\sin r})$ اگر زوایای i و r معلوم باشند می‌توان مقدار n را محاسبه کرد.

در حالت انحراف مینیمم، $i_1 = i_2$ پس $r_1 = r_2$ خواهد بود.



شکل ۹۲

بنا براین از رابطهٔ $D = i_1 + i_2 - A$ نتیجه می‌شود که

$$D_m = 2i - A$$

و از آنجا

$$i = \frac{D_m + A}{2}$$

از فرمول $A = r_1 + r_2$ هم می‌توان زاویهٔ r را بدست آورد.

$$A = r_1 + r_2$$

$$A = 2r \qquad \text{و از آنجا} \qquad r = \frac{A}{2}$$

و از رابطهٔ $n = \frac{\sin i}{\sin r}$ خواهیم داشت:

$$n = \frac{\sin \frac{D_m + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$$

بنا براین با اندازه‌گیری مقدار D_m و A می‌توان ضریب شکست منشور را محاسبه کرد.

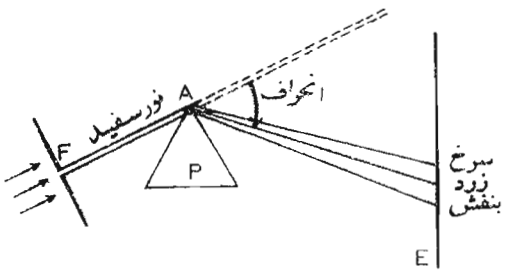
یادآوری ـ اگر زاویهٔ رأس منشور و همچنین زاویهٔ تابش نور کوچك باشند، چنانکه دیدیم زاویهٔ انحراف هم کوچك است و می‌توان نوشت:

$$n = \frac{\sin \frac{D_m + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}} \neq \frac{D_m + A}{A} = 1 + \frac{D_m}{A}$$

یا $D_m = (n-1)A$ و این همان است که قبلا گفته شد، یعنی زاویهٔ انحراف درچنین حالتی ثابت است و بستگی به زاویهٔ تابش ندارد.

تجزیهٔ نور

طیف نور سفید ـ فرض می‌کنیم که یك دسته اشعهٔ نور سفید، که از شکاف F خارج می‌شود ، به منشور P ، که یال آن به موازات شکاف است ، بتابد (شکل ۹۳) . نور هنگام خروج از منشور نه تنها **منحرف**

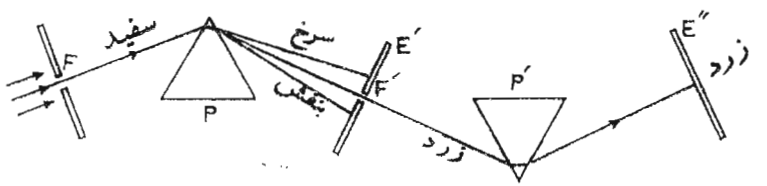


شکل ۹۳

می‌شود بلکه **تجزیه** نیز می‌شود : اگر پرده‌ای مانند E سر راه اشعهٔ خروجی قرار دهیم نوار رنگینی بر پرده تشکیل می‌شود. این نوار شامل تمام رنگهای قوس قزح است . این رنگها بطور پیوسته تغییر می‌کنند و حد فاصلی بین آنها نمی‌توان تشخیص داد . معلوم نیست که رنگ سرخ کجا پایان می‌یابد و رنگ نارنجی کجا آغاز می‌شود . اما در میان این بینهایت رنگها می‌توان هفت رنگ اصلی را تشخیص داد که به‌ترتیب افزایش زاویهٔ انحراف عبارتند از : سرخ ، نارنجی ، زرد ، سبز ، آبی ، نیلی ، بنفش . این نوار رنگین را **طیف نور سفید** می‌گویند .

نور تکرنگ ـ به‌جای پردهٔ E پرده‌ای مانند E′ قرار می‌دهیم که بر آن شکاف بسیار نازکی مانند F′ چنان تعبیه شده است که به موازات

یال منشور باشد. فرض می‌کنیم که F′ مثلاً درقسمت زرد طیف قرار گیرد. بنا بر این فقط نور **زرد** از پردهٔ E′ عبور می‌کند . اگر این دسته اشعهٔ نور زرد به منشوری مانند P′ بتابد (شکل ۹۴) ، منحرف می‌شود ، اما تجزیه نمی‌شود: بر پرده‌ای مانند E″ تصویر زرد رنگ یکنواختی مشاهده می‌شود .



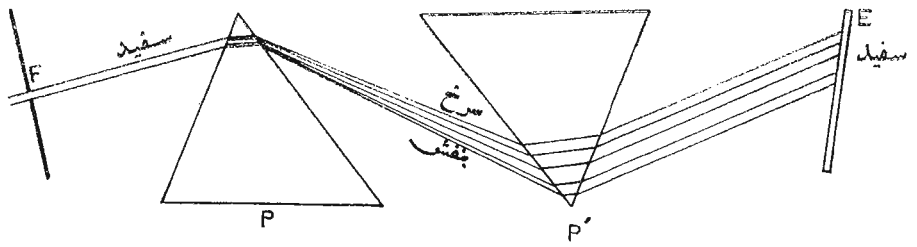
شکل ۹۴

اگر F′ را در طیف جابجا کنیم ، مشاهده می‌کنیم که همیشه بر پردهٔ E″ تصویری تشکیل می‌شود که رنگ آن یکنواخت و همرنگ نوری است که از F′ عبور می‌کند . چنین نور یا چنین تابشی را **ساده** یا **تکرنگ** گویند . نورهایی را که ساده نباشد **نور مرکب** گویند .

بعضی از منابع نورانی نور تکرنگ تابش می‌کنند . مثلاً چراغ بخار سدیم نور تکرنگی تابش می‌کند که به‌نور زرد سدیم موسوم است .

ماهیت نور سفید ـ اگر طیف نورسفید را روی منشور P′ که نسبت به منشور P وارونه است تشکیل دهیم ، و پردهٔ E را در پشت منشور P′ جایی قرار دهیم که نورها، پس ازعبور ازاین منشور ، درآنجا جمع می‌شوند، مشاهده می‌شود که بر پرده تصویری سفید رنگ می‌افتد (شکل۹۵).

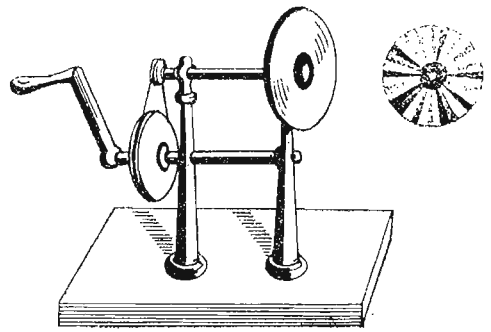
در این آزمایش می‌توان به جای منشور P′ یك عدسی در راه رنگهای طیف قرار داد و دوباره نور سفید بدست آورد .



شکل ۹۵

بنابراین : از ترکیب تمام نورهایی که در طیف نور سفید وجود دارد نور سفید بدست می‌آید .

نیوتن بکمك صفحهٔ معروف خود نشان دادکه ازترکیب رنگهای اصلیی‌که درطیف نور سفید دیده می‌شود بطور تقریب رنگ سفید بدست می‌آید. نیوتن بر روی این‌صفحه قطاعهای دایره‌ای را به رنگهای اصلی طیف رنگ کرد و بسرعت صفحه را دوران داد و مشاهده کرد که صفحه در حال دوران سفید بنظر می‌رسد (شکل ۹۶) .



شکل ۹۶

همچنین می‌توان سطح یك فرفرهٔ بازی را بهمین‌طریق رنگ کرد و چرخانید . در همهٔ این آزمایشها **تأثیرمجموعهٔ این رنگها با هم اثر نور سفید بر چشم می‌گذارد .** آزمایش نشان داده است که هرگاه نوری را که به چشم می‌تابد دفعتاً قطع کنیم ، اثر آن دفعتاً از میان نمی‌رود ، بلکه حدود $\frac{1}{20}$ ثانیه برچشم

باقی می‌ماند . اگر سرعت دورانی فرفره یا صفحهٔ نیوتن اقلاً بیست دور در ثانیه باشد ، فرفره یا صفحه هر دور را در $\frac{1}{20}$ ثانیه می‌زند ، و در این مدت تمام رنگهای طیف یك‌بار ازجلو چشم می‌گذرند وهنوز تأثیررنگ اول برطرف نشده‌که رنگ دیگرمی‌رسد ودرنتیجه چشم ترکیبی از رنگها را احساس می‌کند .

از مجموع این تجربیات می‌توان نتیجه گرفت که **نور سفید از ترکیب بینهایت نور (یا تابش) تکرنگ تشکیل شده است** که تمام آنها در یك لحظه از منبع نور منتشر می‌شوند. این همان نتیجه‌ای است‌که نیوتن پس از تجربیات متعدد در اواخر قرن هیجدهم بدست آورده بود .

تغییر ضریب شکست یك محیط شفاف با نورهای مختلف ـ ضریب شکست یك محیط بستگی به نورتکرنگی دارد که مورد استفادهٔ آن محیط است . برای یك جسم معین همیشه ضریب شکست ازنور سرخ به طرف نور بنفش افزایش می‌یابد . از طرفی ، همانطور که می‌دانیم ، بررسی منشور نشان می‌دهدکه هرچه ضریب شکست محیط منشور بیشتر باشد بیشتر نور را منحرف می‌کند . بنا براین منشور نور بنفش را بیشتر از نور سرخ منحرف می‌کند .

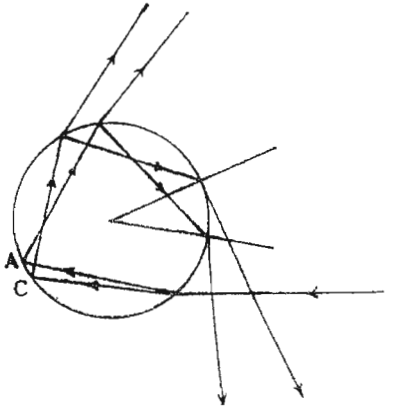
یکی از شیشه‌هایی که در نور هندسی مورد استعمال زیاد دارد شیشه‌ای است از نوع کراون . کراون مانند شیشهٔ معمولی مرکب از سیلیکاتهای سدیم و کلسیم است . ضریب شکست این ماده برای نور سرخ ۱/۵۱ و برای نورزرد ۱/۵۲ و برای نور بنفش ۱/۵۳ است .

یادآوری ـ درتمام‌آزمایشهای مربوط به‌شکست نور،که تاکنون بیان‌کردیم ، از نور تکرنگ استفاده می‌کردیم ؛ زیرا در غیر این صورت پدیدهٔ تجزیهٔ نور موجب کم‌شدن دقت نتایج حاصل می‌شد . اگر منابعی

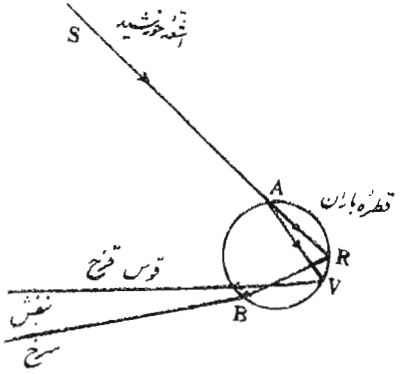
که نور تکرنگ تابش می‌کنند در اختیار نداشته باشیم می‌توانیم از شیشه‌های رنگین، مثلاً شیشهٔ سرخ رنگ، استفاده‌کنیم . یك شیشهٔ سرخ رنگ‌که درمسیر نور سفید قرارگیرد تمام تابشهای از نارنجی تا بنفش را جذب می‌کند و نوری‌که ازآن می‌گذرد تشکیل شده است از مجموعه‌ای ازتابشهای سرخ ، بنابراین نوری‌که ازآن می‌گذرد نور ساده یا تکرنگ نیست . اما بطور تقریب می‌توان آن را ، در آزمایشهای مربوط به شکست نور ، به‌عنوان نور تکرنگ مورد استفاده قرار داد .

شیشه‌هایی را که فقط یك نوع نور از خود عبور می‌دهند **فیلتر (صافی)** می‌نامند .

قوس قزح ـ قوس قزح هنگامی دیده می‌شودکه خورشید با افق زاویه‌ای نزدیك به ۴۲° بسازد . علت تشکیل قوس قزح این است‌که اشعهٔ



شکل ۹۸

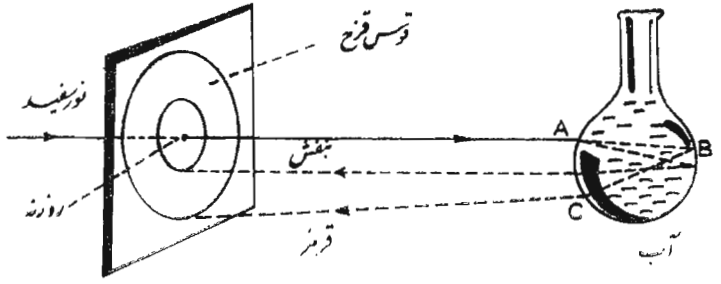


شکل ۹۷

خورشید مثلاً SA ، که به‌یك قطره باران برخورد می‌کند (شکل۹۷)، در شکست در نقطهٔ A تجزیه می‌شود . نور سرخ در امتداد AR و نور بنفش

در امتداد AV می‌شکند . سایر نورهای طیف نورسفید نیزدر امتدادهایی بین امتدادهای AR و AV می‌شکنند . قسمتی از این اشعه در برخورد با سطح قطرهٔ باران که کروی است (نقاطی نظیر R و V) به طرف داخل انعکاس یافته در حوالی نقطهٔ B از قطره خارج می‌شود . بنا بر این اشعهٔ نور خورشید ، پس از خروج از قطرهٔ باران ، به‌رنگهای طیف تجزیه می‌شود و ناظری که پشت به خورشید است این رنگها را به شکل قوس قزح می‌بیند . گاهی یك قوس قزح کمرنگ نیز بالای قوس قزح اصلی مشاهده می‌شود . این قوس قزح مربوط به اشعه‌ای است که دوبار درون قطرهٔ باران انعکاس یافته و خارج شده‌اند (شکل ۹۸) .

باآزمایش سادهٔ زیرمی‌توان دایره‌ای ازقوس قزح را برروی صفحهٔ مقوایی تشکیل داد. نور یك چراغ پرنور را از روزنهٔ یك صفحهٔ مقوایی



شکل ۹۹

بزرگ (شکل ۹۹) به بالون پر از آبی بتابانید . با دور و نزدیك کردن بالون می‌توان دایره‌ای ازقوس قزح رابرروی صفحهٔ مقوایی مشاهده‌کرد.

رنگهای اصلی و رنگهای مکمل ـ سه منبع بسیار قوی نور سفید (مثلاً سه پروژکتور) و سه شیشه به رنگهای سرخ و سبز وآبی در یك اتاق تاریك فراهم می‌کنیم .

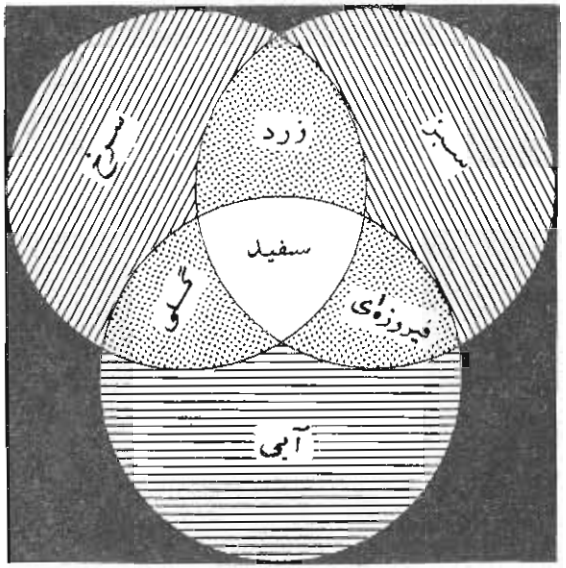
یکی ازمنابع نور را روشن می‌کنیم وشیشهٔ سرخ‌رنگ را درمقابل آن قرارمی‌دهیم وسپس نور این‌منبع را بریك صفحهٔ کاغذ سفید می‌تابانیم. بدیهی است که نوری که از این منبع برصفحهٔ کاغذ تابیده می‌شود سرخ است و صفحهٔ کاغذ نیز سرخ بنظر می‌رسد .

اکنون به‌جای منبع فوق منبعی را روشن می‌کنیم که در مقابل آن شیشهٔ سبزرنگ را قرار داده‌ایم و سپس نور آن را به همان صفحهٔ کاغذ می‌تابانیم . بدیهی است که نوری که از این منبع بر صفحهٔ کاغذ تابیده می‌شود سبزاست وصفحهٔ کاغذ نیز ، اگر تنها با همین نور روشن شود، سبز بنظر می‌رسد . این آزمایش را می‌توان با نورآبی رنگ نیز انجام داد .

اکنون نور سرخ و نور سبز را با هم بر صفحهٔ کاغذ می‌تابانیم ؛ یعنی از یکی از منابع ، نور سبز و از منبع دیگر نور سرخ برصفحهٔ کاغذ می‌تابانیم . صفحهٔ کاغذ زرد بنظرمی‌رسد. بنابراین ازترکیب نورهای سبز و سرخ نور زرد بدست می‌آید .

آزمایش نشان می‌دهد که از ترکیب نورهای سرخ وآبی نور گلی و نیز از ترکیب نورهای سبز و آبی نور فیروزه‌ای و از ترکیب نورهای سرخ و آبی و سبز نور سفید بدست می‌آید . از ترکیب این سه نور به نسبتهای مناسب نه تنها رنگ سفید بلکه تمام رنگهای طیف را نیز می‌توان بدست آورد . به همین دلیل است که این سه‌رنگ به **رنگهای اصلی** موسومند .

در شکل ۱۰۰ هریك از دایره‌ها تصویریکی ازمنابع نورآزمایش قبل است . بطوری که مشاهده می‌شود نور زرد ترکیبی از نورهای سبز و سرخ است ونور سفید ترکیبی ازنورهای سبز وسرخ وآبی است . بنابراین



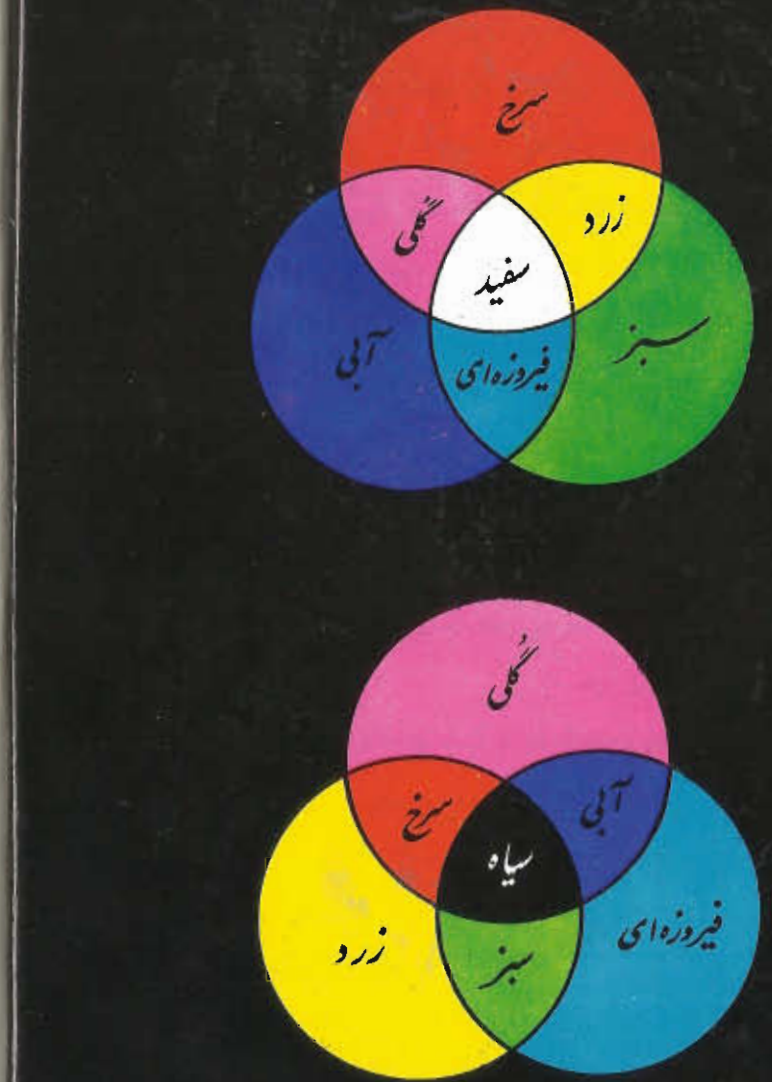
شکل ۱۰۰

اگر نورآبی را با نور زرد ترکیب کنیم نور سفید بدست می‌آید . هر دو نوری را که از ترکیب آنها نور سفید بدست‌آید **مکمل** یکدیگرگویند.

رنگ یك جسم ـ رنگ یك جسم رنگ نوری است که از آن جسم به‌چشم می‌رسد .

۱ ـ نور از جسم تابش می‌شود ـ اجسام در هر دمایی که باشند تابش می‌کنند. اگر دمای جسم‌کم باشد تابش جسم مرئی نیست ، اما اگر دمای آن را زیادکنیم (بالاتر از $500^{\circ}C$) تابش‌آن مرئی می‌شود. رنگ چنین جسمی بستگی به ماهیت آن جسم و به دمای‌آن جسم دارد. مثلاً آهن در دمای حدود $600^{\circ}C$ نور سرخ تیره و در دمای حدود $1500^{\circ}C$ نور سفید تابش می‌کند .

۲ ـ نور از جسم منعکس یا پراکنده می‌شود یا از آن عبور می‌کند ـ دراین شرایط معمولاً یك قسمت از نور تابش به‌وسیلهٔ جسم جذب می‌شود



و نوری که به چشم می‌رسد ترکیبی است از بقیهٔ نورها . بنابراین رنگ یك جسم بستگی دارد به ماهیت آن جسم و به نوری که بر آن می‌تابد .

فرض می‌کنیم که نور تابش نورسفید باشد . دراین صورت می‌توان حالات زیر را درنظرگرفت :

الف - جسم هیچیك از نورهای طیف نور سفید را جذب نمی‌کند . در این صورت رنگ جسم سفید است و اثری که برچشم می‌گذارد اثر نور سفید است .

ب - جسم همهٔ نورهای طیف نورسفید را بطورکامل جذب می‌کند. در این صورت جسم سیاه بنظر می‌رسد .

ج - جسم همهٔ نورهای طیف نورسفید را بطورجزئی جذب می‌کند. در این صورت جسم خاکستری بنظر می‌رسد .

د - جسم بعضی از نورهای طیف نور سفید را جذب می‌کند . در این‌صورت رنگ جسم مکمل رنگ جذب شده است . این رنگ مکمل را **رنگ واقعی جسم** می‌گویند . مثلاً جسمی‌که نور آبی را جذب کند در نور سفید زرد رنگ است و همچنین جسمی‌که نورهای آبی و سبز را جذب‌کند در نور سفید سرخ رنگ است (چرا ؟) .

اکنون فرض می‌کنیم که نور تابش سفید نیست . در این صورت حالات زیر را می‌توان درنظرگرفت :

الف - نور تابش همرنگ رنگ واقعی جسم است . دراین صورت جسم به رنگ واقعی دیده خواهد شد ، مثلاً در نور سرخ یك گل سرخ به رنگ سرخ دیده می‌شود .

ب - رنگ نور تابش مکمل رنگ جسم است . در این صورت

جسم سیاه بنظرمی‌رسد. مثلاً هرگاه بریك صفحهٔ کاغذ سرخ رنگ ، یعنی کاغذی‌که در نور سفید سرخ رنگ است ، نور فیروزه‌ای بتابانیم ، رنگ کاغذ سیاه بنظرخواهد رسید . زیرا بطوری که بیان شد کاغذ سرخ رنگ نورهای آبی و سبزرا جذب می‌کند و ازطرفی نور فیروزه‌ای ترکیبی است ازنورهای سبز وآبی ؛ به‌این دلیل تمام نورتابش توسط‌کاغذ جذب می‌شود وکاغذ سیاه بنظر می‌رسد .

ج - نور تابش نه مکمل رنگ واقعی جسم است و نه همرنگ آن . در این صورت جسم نه سیاه دیده می‌شود و نه به رنگ واقعی ؛ زیرا نوری‌که به‌چشم می‌رسد ترکیبی ازنورهایی است‌که جذب نشده‌اند. مثلاً اگر بریك صفحهٔ کاغذکه در نور سفید فیروزه‌ای رنگ است نور زرد بتابانیم ، رنگ آن سبز بنظر خواهد رسید (چرا ؟) .

مثال - اگر بر یك صفحهٔ کاغذ سفید ، رنگ زرد و رنگ گلی بزنیم کاغذ در نور سفید چه رنگی می‌شود ؟

حل - رنگ زرد موجب می‌شود که‌کاغذ نور آبی را از نور سفید جذب کند و رنگ گلی موجب می‌شودکه کاغذ نورسبز را جذب‌کند. اگر براین‌کاغذ نور سفید بتابانیم نورهای سبز وآبی جذب می‌شود و کاغذ سرخ بنظر می‌رسد. یعنی از ترکیب **رنگهای** زرد وگلی رنگ سرخ تولید می‌شود .

طیف پیوسته و طیف ناپیوسته - اگر درشکل ۹۳ شکاف F را با نور چراغ جیوه روشن کنیم ، بر پردهٔ E ، به جای نوار رنگین چند خط رنگی تشکیل می‌شودکه مجموع آنها را طیف نور جیوه می‌گوییم. این خطوط تصاویرشکاف F می‌باشندوآنها را **خطوط طیفی** می‌گویند.

طیفی مانند طیف نور جیوه راکه ازیك عده خطوط متمایز تشکیل شده است **طیف ناپیوسته** می‌گویند . اما طیفهایی را که به شکل یك

نوار رنگین است ودر آن رنگها بطور پیوسته تغییر می‌کند **طیف پیوسته** می‌گویند .

بطور کلی مایعات[1] وجامداتی که به حال التهاب هستند نوری تابش می‌کنند که طیف آن پیوسته است . مثلاً نوری که از التهاب رشته‌های تنگستن در چراغهای الکتریکی تابش می‌شود تشکیل طیف پیوسته می‌دهد . در حالی که طیف نوری که از گازهای فروزان تابش می‌شود ناپیوسته است . مثلاً اگر گازی ، مانند گاز ئیدروژن ، را در لولهٔ تخلیه گرم کنیم و نوری را که تابش می‌کند بر منشور بتابانیم طیفی تشکیل می‌شود که مرکب از یك عده خطوط روشن رنگی است .

آزمایش نشان می‌دهد که هرعنصری که به‌حالت گاز است خطوط طیفی معینی دارد که مخصوص همان عنصر است . یعنی در دستگاهی که طیف را بررسی می‌کنیم محل و وضعیت خطوط طیفی یك عنصر همواره ثابت ومعین است. بنابراین درشرایط معمولی، طیف یك جسم ازمشخصات آن جسم است . یعنی با دانستن نوع عنصری که تابش می‌کند می‌توان طیف آن را پیش‌بینی کرد و بر عکس اگر طیف عنصری را داشته باشیم می‌توانیم آن عنصر را بشناسیم. پس خطوط طیفی یك عنصر «اثرانگشت» آن عنصر است .

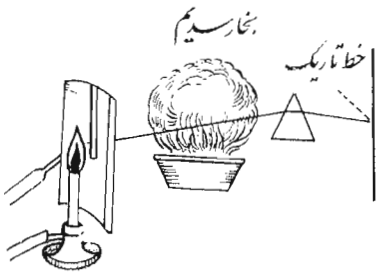
ساده‌ترین طیف گازها طیف بخار سدیم است . این طیف از یك خط زرد تشکیل شده است (با دستگاههای بسیار دقیق دوخط زرد نزدیك به هم می‌توان تشخیص داد). بهاین دلیل می‌گوییم که سدیم نور تکرنگ تابش می‌کند .

۱ــ مثلاً فلزاتی که به حال مذابند .

طیف نمك یك فلز منطبق بر طیف فلز آن نمك است ؛ زیرا وقتی که نمك یك فلز را به دمای زیاد می‌رسانیم به دو جزء تشکیل دهنده‌اش تجزیه می‌شود . وتنها جزء فلزی آن است که خطوط طیفی آن در منطقهٔ بین سرخ تا بنفش ، یعنی در منطقهٔ نور مرئی ، قرار دارد. بهمین دلیل درآزمایشگاهها می‌توان طیف نمك یك فلزرا به‌جای طیف آن فلز بررسی کرد . مثلاً کلرور سدیم را می‌توان در شعلهٔ آبی رنگ یك چراغ الکلی تبخیر کرد و ، شعلهٔ زرد رنگ سدیم را بسادگی بدست آورد .

طیف تابشی و طیف جذبی ــ طیف تابشی طیفی است که ازتجزیهٔ نوری که مستقیماً از جسم تابش می‌شود بوجود می‌آید . اما اگر مادهٔ شفافی را درمسیر اشعهٔ نور سفید قرار دهیم وسپس اشعهٔ خارج شده ازآن را به‌وسیلهٔ منشور تجزیه کنیم طیفی بدست خواهد آمد که آن را طیف جذبی می‌گویند . در طیف جذبی یك یا چند خط از طیف نور سفید از میان رفته است . پس این نورها توسط آن ماده جذب شده‌اند .

مثلاً اگر در مسیر نور چراغ الکتریکی ، ظرفی را که حاوی بخار سدیم باشد قراردهیم وسپس نور خارج شده ازآن را تجزیه‌کنیم، مشاهده خواهیم کرد که طیف حاصل پیوسته نیست و در ناحیهٔ زرد دوخط تاریك نزدیك به هم مشاهده می‌شود (شکل۱۰۱). این‌دوقسمت را بخار سدیم جذب کرده است .



شکل ۱۰۱

این نوع طیفها را **طیف جذبی** می‌نامند . بامقایسهٔ طیفهای تابشی وجذبی سدیم معلوم می‌شود که خطوط

جذبی سدیم درست درهمان‌محل واقعندکه درطیف‌نشری سدیم دوخط زرد دیده می‌شود . این پدیده عمومیت دارد ، یعنی مواد همان نورهایی را جذب می‌کنندکه آنها را تابش می‌کنند . درنتیجه ، از وضع قرارگرفتن خطوط جذبی می‌توان به‌وجود عنصر جذب‌کننده پی‌برد . مثلاً اگرطیف خورشید را که ظاهراً یك طیف پیوسته است به وسیلهٔ طیفنماهای قوی تجزیه‌کنیم ، عدهٔ زیادی خطوط تاریك در سراسر طیف مشاهده می‌شود . این خطوط به‌علت وجود عناصرمختلفی است که اطراف کرهٔ خورشید را احاطه‌کرده است . با دقت درخطوط جذبی حاصل ، عناصری‌که خورشید را تشکیل داده‌اند معلوم می‌شود . بطور کلی طیف اجسام ، افق بسیار وسیعی برای مطالعهٔ ساختمان داخلی‌اجسام ، شکل قرارگرفتن مولکولها و اتمها ، نیروی مولکولی و اتمی و بسیاری دیگر ازاین نوع مسائل که اساس فیزیك جدید است باز می‌کند .

طیفها رامعمولاً توسط دستگاههای مخصوصی به‌نام اسپکتروسکوپ یا طیفنما بررسی وحتی ازآنها عکسبرداری نیز می‌کنند .

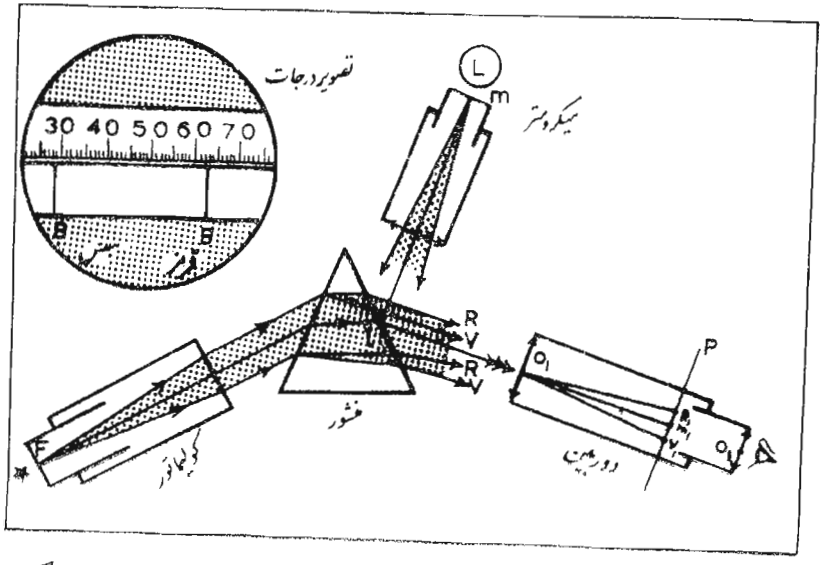
طیفنما ـ اگر نور مرکبی را از منشوری عبور دهیم ، رنگهای آن از یکدیگر جدا می‌شوند وبدین ترتیب می‌توان رنگهایی راکه یك نور مرکب از آنها تشکیل شده است معین‌کرد .

طیفنما که قسمت اساسی آن همان منشور است برای این منظور بکار می‌رود. بطورکلی طیفنما از سه قسمت اساسی زیر تشکیل یافته است (شکل ۱۰۲) :

۱ـ **کولیماتور** که به‌توسط آن اشعه‌ای‌که ازسرچشمهٔ نور می‌تابد تبدیل به‌یك دسته اشعهٔ متوازی شده به‌منشور می‌تابد ؛

۲ ـ **منشور** که عمل آن تجزیهٔ نور است ؛

۳ ـ **دوربین** که به‌توسط آن می‌توان ازطیف حاصل تصویر بزرگتری مشاهده کرد .



شکل ۱۰۲ـ نور ازکولیماتور به‌منشورمی‌تابد و دوربین طیف حاصل را بزرگ می‌کند و ناظر آن را در P مشاهده می‌نماید . ضمناً درجات میکرومتر نیز به طریق انعکاس از سطح منشور در دوربین دیده می‌شود . دایرهٔ گوشهٔ شکل منظره‌ای است از آنچه در دوربین دیده می‌شود .

پرسش و مسئله

۱ ـ هرگاه ضریب شکست منشور زیاد شود زاویهٔ انحراف هم زیاد می‌شود . چرا ؟ (i و A را ثابت فرض‌کنید .)

۲ ـ هرگاه زاویهٔ رأس منشور بزرگ شود زاویهٔ انحراف هم بزرگ می‌شود . چرا ؟

۳ ـ A زاویهٔ رأس منشور و I زاویهٔ حد شکست منشور است . تحقیق کنید :

الف ـ هرگاه $A \geq 2l$ باشد ، نور از منشور خارج نمی‌شود .

ب ـ هرگاه $A = 2l$ باشد ، فقط شعاعی‌که بطور مماس بر وجه منشور می‌تابد از وجه دیگر ، و آن هم بطور مماس ، خارج می‌شود .

ج ـ هرگاه $l < A < 2l$ باشد ، فقط شعاعی می‌تواند از منشور خارج شود که زاویهٔ تابش آن بزرگتر از مقدار معینی باشد (این مقدار معین برای هرمنشور ثابت است) .

د ـ اگر $A \leq l$ باشد هرشعاعی (با زاویهٔ تابش مثبت) از منشورخارج می‌شود (زاویهٔ تابش شعاعهایی‌که در طرف رأس منشور می‌باشند منفی محسوب می‌شود) .

۴ ـ زاویهٔ رأس منشوری 60° و ضریب شکست آن $\sqrt{2}$ است . حدود اشعهٔ تابش را که از این منشور خارج می‌شود بدست آورید (با استفاده از جدول آخرکتاب) .

۵ ـ زاویهٔ رأس منشوری 75° و ضریب شکست آن $\sqrt{2}$ است . زاویهٔ تابش از 90° تا 45° تغییر می‌کند . زاویهٔ خروجی منشور در چه حدودی تغییر می‌کند ؟

۶ ـ ضریب شکست منشوری برای نور سرخ ۱/۵ و برای نور بنفش ۱/۶ و زاویهٔ رأس منشور 60° است . یك شعاع نور مرکب از سرخ و بنفش با زاویهٔ تابش 45° به منشور می‌تابد . مقدار انحراف را برای این دو نور حساب‌کنید (با استفاده از جدول آخرکتاب) .

۷ ـ چگونه می‌توان توضیح داد که به ازای دو مقدار از زاویهٔ تابش یك مقدار برای زاویهٔ انحراف وجود دارد ؟

۸ ـ زاویهٔ رأس منشوری مساوی 50° و ضریب شکست آن ۱/۵ است. برای زاویه‌های تابش 27° ، 40° ، 50° ، 60° ، 70° ، 80° ، 90° ، با استفاده از جدول مثلثاتی ، مقادیر زوایای انحراف را بدست آورید و به طریقهٔ نقطه‌یابی منحنی تغییرات D را نسبت به i رسم‌کنید و از روی‌آن مقدار تقریبی مینیمم انحراف و زاویهٔ تابش مربوط به آن را بدست آورید .

۹ ـ مقصود از تجزیهٔ نور چیست ؟

۱۰ ـ چگونه می‌توان علت تجزیهٔ نور را به وسیلهٔ منشور بیان کرد ؟

۱۱ ـ منظور از یك طیف پیوسته چیست ؟

۱۲ ـ چه فرقی است بین رنگهای مکمل و رنگهای اصلی ؟

۱۳ ـ با توجه به شکل ۱۰۰ به این سؤالها جواب دهید :

مکمل نور سرخ چیست ؟

مکمل نور سبز چیست ؟

مکمل نور آبی چیست ؟

۱۴ ـ طیفنما چه فایده‌ای دارد ؟

۱۵ ـ زاویهٔ رأس منشور 60° و ضریب انکسارآن برای نور زرد $\sqrt{2}$ است . یك دسته نور سفید به منشور می‌تابد و دستگاه طوری تنظیم شده است‌که انحراف برای نور زرد مینیمم باشد .

اولاً زاویهٔ تابش را بدست آورید ،

ثانیاً زاویهٔ انحراف را حساب‌کنید (برای نور زرد) .

۱۶ ـ زاویهٔ رأس منشوری 30° است . یك شعاع نور تکرنگ عمود بر وجه منشور می‌تابد و از وجه مقابل با زاویهٔ 45° خارج می‌شود . ضریب شکست منشور چقدر است ؟

۱۷ ـ یك شعاع با زاویهٔ تابش 4° به منشوری می‌تابد که زاویهٔ رأسش 60° است . زاویهٔ انحراف را محاسبه‌کنید .

۱۸ ـ یك دسته اشعهٔ متوازی لکه‌ای نورانی برروی پرده‌ای می‌اندازد. در سر راه این اشعه و به‌فاصلهٔ یك متر از پرده ، منشوری قرار می‌دهیم . زاویهٔ رأس منشور 6° و زاویهٔ تابش نور 5° است . معین کنید لکهٔ نورانی چقدر بر روی پرده تغییر محل می‌دهد .

۱۹ ـ یك‌دسته اشعهٔ متوازی تکرنگ عمود برمنشوری‌که‌زاویهٔ رأس‌آن 60° است می‌تابد . امتداد اشعه را در داخل منشور رسم کنید ($n = \sqrt{2}$) .

۲۰ ـ اگر بر یك صفحه‌کاغذ سفید ، رنگ زرد و رنگ فیروزه‌ای بزنیم کاغذ در نور سفید چه رنگی می‌شود ؟ جواب : سبز

۲۱ ـ اگر یك صفحهٔ کاغذ را که رنگ واقعی آن گلی است با شیشهٔ فیروزه‌ای رنگ نگاه‌کنیم کاغذ در نور سفید چه رنگی دیده می‌شود ؟

۲۲ ـ اگر بر یك صفحه کاغذ سفید ، ابتدا رنگ زرد و سپس رنگ گلی و بالاخره رنگ فیروزه‌ای بزنیم کاغذ در نور سفید چه رنگی می‌شود ؟

۲۳ ـ اگر بریك صفحه کاغذ سفید ، رنگ‌آبی و سپس رنگ زرد بزنیم کاغذ در نور سفید چه رنگی می‌شود ؟

گالیله دانشمند ایتالیایی (۱۵۶۴ - ۱۶۴۲) از ترکیب عدسیها اولین دوربین را ساخت و مرزهای آسمان را برای چشم انسان کنجکاو باز کرد .

فصل چهارم

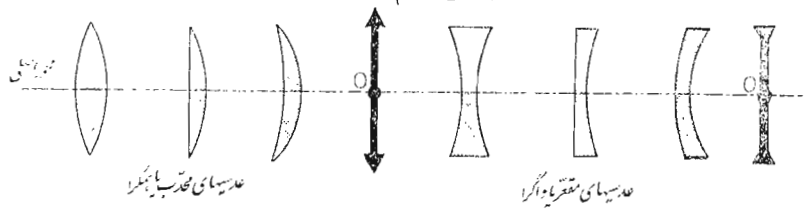
عدسیها

اهمیت عدسیها از زمان گالیله روز افزون بوده است . این وسایل ساده ، که اساس ساختمان میکروسکوپ و دوربین و دستگاه عکاسی و بسیاری دیگر از وسایل دقیق علمی امروز است ، معلومات بشر را از دنیای عظیم کواکب تا عالم اسرارآمیز میکروبها به‌میزان قابل توجهی توسعه داده است.

بنا بر تعریف **عدسی عبارت از محیط شفافی است که با دوسطح کروی (یکی از سطوح ممکن است مسطح باشد) به‌دو محیط شفاف دیگر محدود شده باشد.** در این فصل عدسیهایی را مطالعه می‌کنیم که محیط طرفین آن یکسان

باشد. خطی که مراکز این دو کره را به‌هم وصل می‌کند، یا از مرکز یك کره بر سطح تخت عمود است، **محور اصلی عدسی** نامیده می‌شود (شکل ۱۰۳).

عدسیها بر دو نوعند : عدسیهای **همگرا** که لبهٔ آنها نازکتر از وسط آنهاست و عدسیهای **واگرا** که وسط آنها نازکتر از لبهٔ آنهاست. عدسیهایی که در این فصل مطالعه خواهد شد نازك فرض می‌شوند و برای سهولت آنها را به‌صورت یك خط نمایش می‌دهیم (شکل ۱۰۳) .



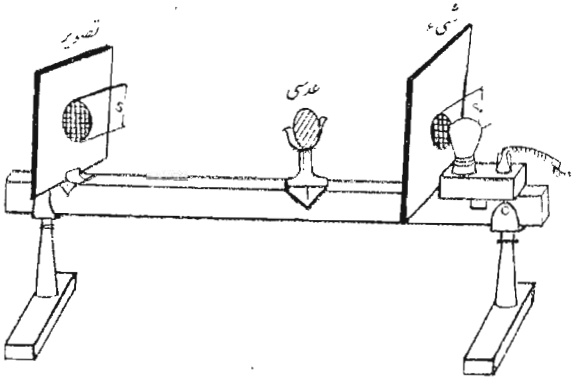
شکل ۱۰۳

محل تلاقی یك عدسی نازك را با محور اصلی آن ، **مرکز نوری** آن عدسی می‌نامیم . هر شعاع نور که بر این نقطه بتابد بدون انحراف از عدسی خارج می‌شود .

هرخطی ، جز محور اصلی ، که از نقطهٔ O ، یعنی مرکز نوری عدسی ، بگذرد **محور فرعی عدسی** نامیده می‌شود .

شرایط وجود تصویر دقیق در عدسیها ـ بر روی یك کاغذ نیم‌شفاف ، یك مربع بزرگ (به‌ضلع ۲۰cm) رسم کرده آن را به‌مربعهای کوچکتری تقسیم کنید . سپس پشت این ورقه چراغی پرنور وجلو آن یك عدسی همگرا قرار داده و تصویر مربع را بر روی پرده‌ای که پشت عدسی واقع است بیندازید (شکل ۱۰۴) . اگر محور اصلی بر کاغذ عمود باشد و ازمرکز آن بگذرد، مشاهده می‌کنیدکه تصویر این مربع ، مربع دیگری

است که همانطور تقسیم‌بندی شده است ، لیکن در این تصویر مربعهای مرکزی بهتر و دقیق‌تر از مربعهای کنار است. به‌عبارت دیگر هرچه جسم



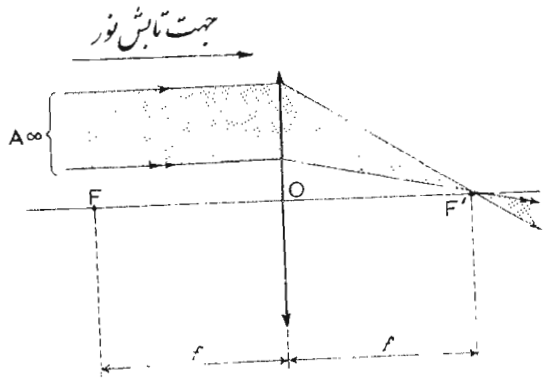
شکل ۱۰۴

به محور اصلی عدسی نزدیکتر باشد تصویر آن واضح‌تر است . حال اگر عدسی را نسبت به‌مربع یا مربع را نسبت به‌عدسی چنان کج نگاه داریم که سطح آن بر محور اصلی عدسی عمود نباشد ، تصویر بکلی تغییر شکل می‌دهد و دیگر شباهتی با مربع اصلی نخواهد داشت . عدسی را دوباره راست کرده یک دیافراگم جلو آن می‌گذاریم . تصویر دقیق‌تر و واضح‌تر می‌شود . بنابراین **دریک عدسی هنگامی تصویر واضح ودقیق است که اشعه‌ای که به عدسی می‌تابد نسبت به‌محور اصلی زیاد مایل نباشد .**

در مطالعهٔ عدسیها فرض براین است که اولاً جسم عمود بر محور اصلی عدسی قرار دارد و ثانیاً جلو عدسی یک دیافراگم است .

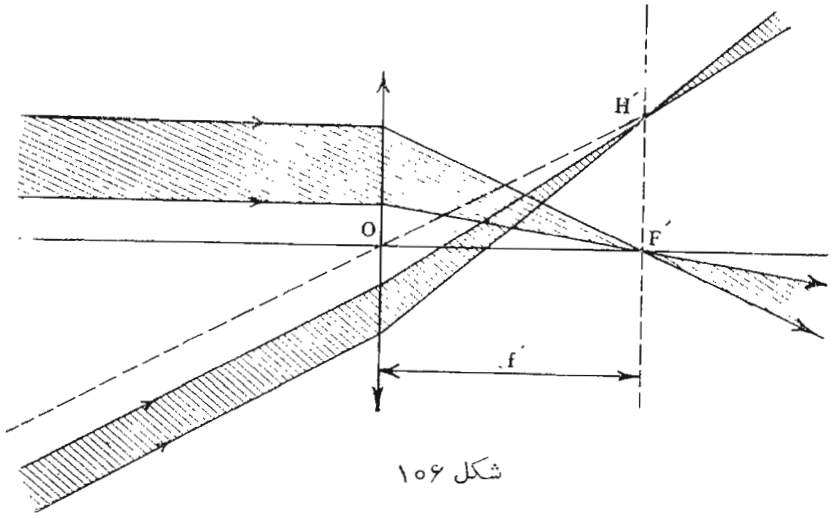
کانون و سطح کانونی ـ ۱ ـ یک دسته اشعهٔ متوازی را بموازات محور اصلی یک عدسی همگرا بر عدسی می‌تابانیم . این دسته اشعه پس ازعبور ازعدسی بدیک دسته اشعهٔ مخروطی همگرا تبدیل می‌شودکه رأس

آن F' برمحور اصلی عدسی واقع است (شکل ۱۰۵). این نقطه را **کانون اصلی تصویر** عدسی می‌نامیم . فاصلهٔ این نقطه تا مرکز نوری عدسی ($OF' = f$) **فاصلهٔ کانونی عدسی** نامیده می‌شود .



شکل ۱۰۵

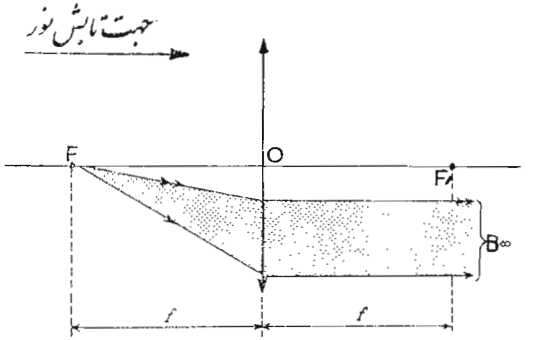
اکنون یک دسته اشعهٔ متوازی را به‌موازات یکی ازمحورهای فرعی عدسی همگرا برعدسی می‌تابانیم . این دسته اشعه پس از عبوراز عدسی



شکل ۱۰۶

بازهم به یك دسته اشعهٔ مخروطی همگرا تبدیل می‌شود. اما رأس آن H' بر محور فرعی موازی با امتداد تابش واقع است. این نقطه را **کانون فرعی تصویر** می‌نامیم. می‌بینیم که برای هر امتداد تابش یك کانون موجود است. بنابراین عدهٔ کانونهای فرعی بینهایت خواهد بود. این کانونها بر صفحه‌ای واقعند موسوم به **سطح کانونی تصویر** که می‌توان آن را تقریباً سطح تختی فرض کرد که از کانون اصلی تصویر می‌گذرد و بر محور اصلی عمود است (شکل ۱۰۶).

۲ـ فرض می‌کنیم که F' قرینهٔ F' نسبت به‌مرکز نوری عدسی باشد. نقطه‌ای نورانی را در F قرار می‌دهیم. دسته اشعهٔ مخروطی که از F تابش می‌شود پس از عبور از عدسی به‌یك دسته اشعهٔ متوازی که موازی با محوراصلی است تبدیل می‌شود. نقطهٔ F را **کانون اصلی شیء** می‌نامیم (شکل ۱۰۷). سطحی را که از کانون اصلی شیء می‌گذرد و برمحوراصلی



شکل ۱۰۷

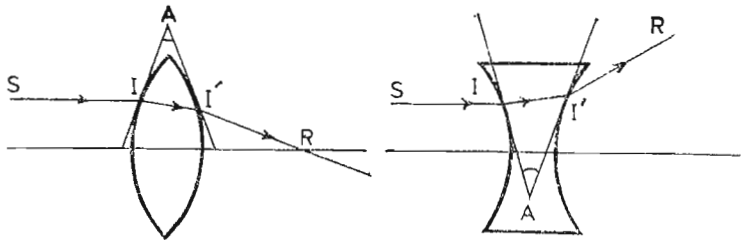
عمود است **سطح کانونی شیء** وهریك از نقاط واقع براین سطح را **کانون فرعی شیء** می‌نامیم. واضح است که اگر نقطه‌ای نورانی در یکی از کانونهای فرعی شیء قرار گیرد، اشعه‌ای که از این نقطه تابش می‌شود

پس از عبور ازعدسی به‌یك دسته اشعهٔ متوازی تبدیل می‌شودکه به‌موازات محور فرعیی است‌که از آن نقطه می‌گذرد.

بدیهی است که اگر نور از سوی دیگر عدسی بتابد، F مربوط به‌حالت پیش F' خواهد بود و F' حالت پیش F خواهد بود. پس‌کانون شیء یا کانون تصویربودن یك کانون بستگی به سوی تابش نور دارد.

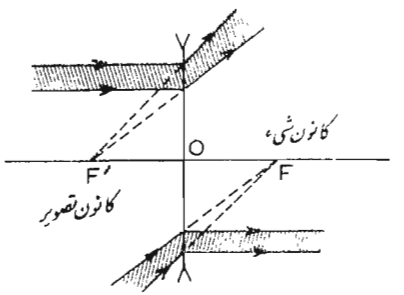
از این پس، شعاع تابنده‌را شعاع تابش و شعاع خروجی را شعاع تصویر خواهیم نامید.

یادآوری ـ شکل ۱۰۸ نشان می‌دهدکه عدسیها تقریباً مانند دو منشور متقارنند که قاعده‌شان بر یکدیگر منطبق است، و شعاعهای نور را طوری منحرف می‌کنندکه به‌قاعدهٔ منشورها (محور اصلی) نزدیك شود. بنابراین عدسی همگرا نورهایی را که به‌موازات محوراصلی آن

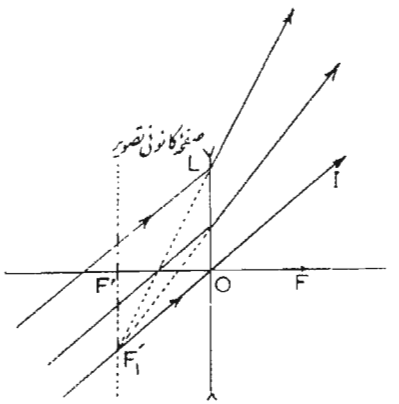


شکل ۱۰۸

بر آن می‌تابد به محور اصلی نزدیك می‌کند؛ در حالی که عدسی واگرا چنین نورهایی را از محور اصلی دور می‌کند. یعنی عدسیهای همگرا موجب همگرایی نور و عدسیهای واگرا موجب واگرایی نور می‌شوند. بنا بر این کانونهای یك عدسی واگرا مجازی است. یعنی این عدسیها دسته اشعهٔ متوازی را تبدیل به یك دسته اشعهٔ مخروطی واگرا می‌کنند (شکلهای ۱۰۹ و ۱۱۰).

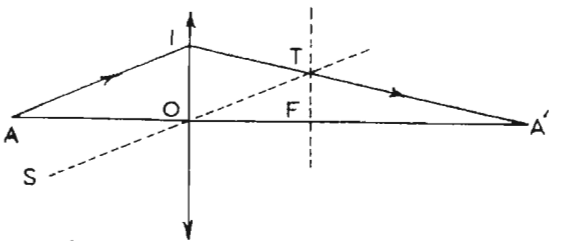


شکل ۱۰۹



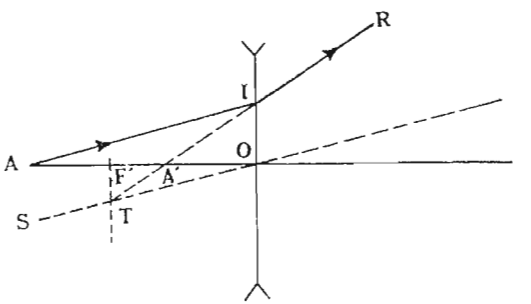
شکل ۱۱۰

رسم شعاع تصویر درعدسیها ـ فرض کنیم که از نقطهٔ نورانی **A** ، بر روی محور اصلی عدسی ، یك شعاع مانند **AI** بر عدسی بتابد



شکل ۱۱۱ ـ رسم شعاع تصویر در عدسی همگرا

(شکلهای ۱۱۱ و ۱۱۲) . منظور رسم شعاع تصویر آن است . محورفرعی **SO** را بهموازات شعاع **AI** رسم می‌کنیم تا سطح کانونی تصویر را در نقطهٔ **T** قطع کند. نقطهٔ **T** کانون مربوط بهمحورفرعی **SO** است.



شکل ۱۱۲ ـ رسم شعاع تصویر درعدسی واگرا

پس شعاع **AI** ، پس از خروج از عدسی ، باید از این نقطه بگذرد .

شعاع **IT** محور اصلی را در نقطهٔ **A'** قطع می‌کند که تصویر نقطهٔ **A** است .

رسم تصویردرعدسیها ـ همانطور که قبلاً گفتیم فرض می‌کنیم که جسم عمود برمحور اصلی عدسی است. دراین صورت اگردرجلوعدسی دیافراگمی قرارگیرد و نیز اشعه‌ای که از هر نقطهٔ جسم بر عدسی می‌تابد عمود ، یاتقریباً عمود، برعدسی باشد تصویرنیزعمود برمحور اصلی است. شرط اخیر ، چنانکه می‌دانیم ، هنگامی برقرار می‌شود که قطر ظاهری جسم ، وقتی که جسم از مرکز نوری عدسی مشاهده شود ، بسیار کوچك باشد . بنابراین برای رسم تصویرکافی است که تصویر یك نقطه از جسم را بدست‌آوریم .

برای این منظور ازمیان اشعه‌ای‌که ازهر نقطه به‌عدسی می‌تابد دو شعاع‌کافی است. شعاعهایی‌که‌رسم شعاع تصویرآن آسان است عبارتند از :

۱ـ شعاعی‌که از مرکز نوری می‌گذرد . این شعاع بدون انحراف از عدسی عبور می‌کند .

۲ـ شعاعی که امتداد آن از کانون اصلی شیء می‌گذرد . امتداد شعاع تصویر به‌موازات محور اصلی است .

۳ـ شعاعی‌که امتدادآن به‌موازات محور اصلی است. امتداد شعاع تصویر از کانون اصلی تصویر می‌گذرد .

رسم تصویر درعدسیهای همگرا ـ ۱ـ جسم در بینهایت است ـ همانطورکه می‌دانیم هنگامی‌که فاصلهٔ جسم از عدسی زیاد شود و ازحدود چند متر تجاوز کند ، اشعهٔ نورکه از هر نقطهٔ جسم برعدسی می‌تابد تقریباً

با یکدیگر موازی خواهند بود ، یعنی می‌توان فاصله‌های زیاد را برای عدسیها ، بینهایت دور فرض کرد . بنا بر این خواه اشعهٔ نور از اجسام بینهایت دورمانند خورشید یاستاره‌ها بتابد، خواه ازاجسامی‌که فاصله‌شان از عدسی زیاد است، این اشعه بایکدیگر موازی فرض می‌شوند .

اکنون عدسی را درمقابل جسمی دورطوری‌نگاه می‌داریم‌که محور اصلی عدسی بر لبهٔ پایین جسم مماس باشد (شکل۱۱۳ـ۱). تصویر این نقطه یعنی لبهٔ پایین جسم در کانون تصویر عدسی ، $\mathbf{F'}$ (نقطهٔ $\mathbf{A'}$) ، تشکیل می‌شود . اگر قطر ظاهری جسم α باشد ، از لبهٔ فوقانی آن اشعه‌ای تحت زاویهٔ α برعدسی می‌تابد. این اشعه درکانون فرعی $\mathbf{F'}_1$ (نقطهٔ $\mathbf{B'}$) جمع می‌شوند . بنا بر این تصویر جسم بینهایت دور در سطح کانونی عدسی تشکیل می‌شود وطول‌آن برابر $\mathbf{A'B'}$ است. طول $\mathbf{A'B'}$، بنابرمحاسبه‌ای که درآینه‌ها ذکر شد ، چنین است :

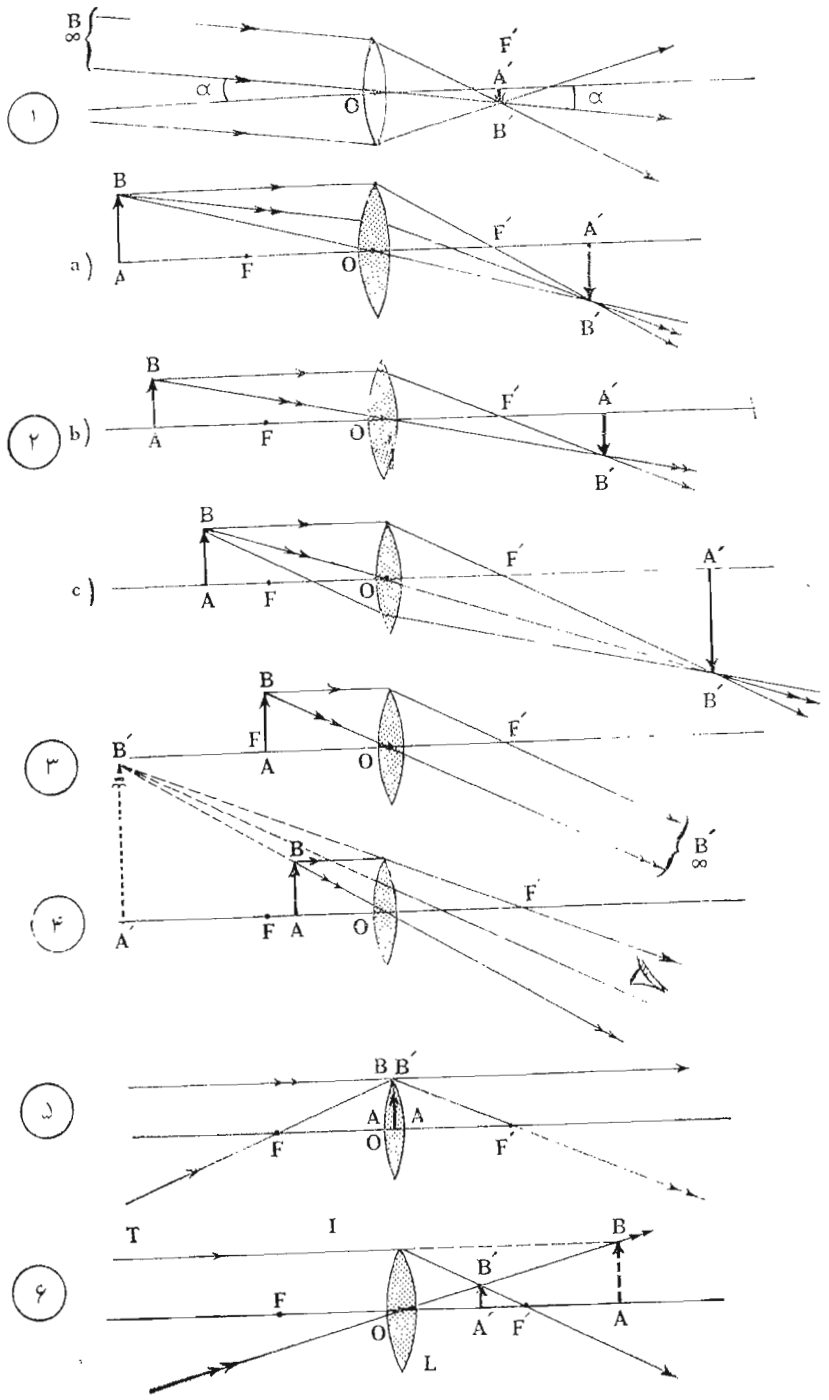
$$\mathbf{A'B'=f\times\alpha}$$

که $\mathbf{f}$ فاصلهٔ کانونی عدسی و α قطر ظاهری جسم است .

۲ـ جسم در دو برابر فاصلهٔ کانونی است ـ در این حالت تصویر آن حقیقی ، معکوس و مساوی جسم است . چرا ؟ (شکل ۱۱۳ ـ ۲ ـ b) .

بدیهی است‌که هرگاه فاصلهٔ جسم نسبت به‌عدسی از $\mathbf{2f}$ دورترشود، تصویرآن به $\mathbf{F'}$ نزدیك خواهد شد. این تصویر حقیقی و معکوس لیکن از جسم کوچکتر است (شکل ۱۱۳ـ۲ـ**a**) .

بالعکس هرگاه فاصلهٔ جسم نسبت به‌عدسی از $\mathbf{2f}$ کمترشود تصویر دورتر و بزرگتر می‌شود (شکل۱۱۳ـ۲ـ**c**) .



شکل ۱۱۳

از این خاصیت در پروژکتورها ودستگاههای سینما استفاده می کنند تا از یك جسم کوچك تصویر بزرگی بدست آید. برای این منظور فیلم یا شیشهٔ مثبت را نزدیك به کانون شیء عدسی قرار می‌دهند و آن را بشدت روشن می‌کنند . عدسی تصویر جسم را بطور معکوس ولی بزرگ برروی پرده می‌اندازد . بنابراین فیلم را بطور معکوس جلوعدسی باید گذارد تا تصویر آن مستقیم باشد .

۳- جسم درکانون ـ چنانکه گفته شد ، هرگاه جسم درکانون عدسی باشد ، تصویر آن در بینهایت دور تشکیل می‌شود . به عبارت دیگر اشعه به موازات یکدیگر از عدسی خارج می‌شوند (شکل۱۱۳ـ۳) .

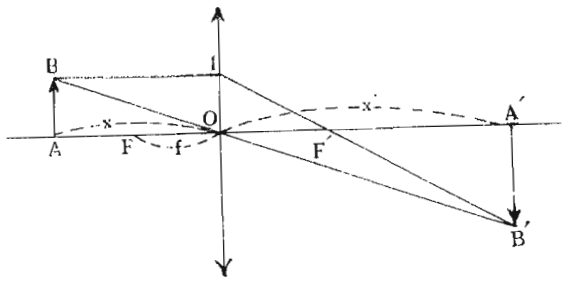
۴- جسم در فاصلهٔ کانونی ـ دراین صورت تصویر مجازی، مستقیم و بزرگتر از جسم است زیرا دسته اشعهٔ تصویر واگرا می‌باشد (شکل ۱۱۳ـ۴) . در این حالت عدسی می‌تواند از اجسام ریز تصاویر مستقیم و بزرگ بدهد که می‌توان مستقیماً رؤیت کرد . در تمام ذره‌بینهای ساده یا مرکب که در میکروسکوپها یا دوربینها بکار می‌برند ، از این خاصیت عدسیها استفاده می‌شود . شکلهای (۱۱۳ـ۵ و ۶) دو وضع دیگر جسم را نسبت به‌عدسی نشان می‌دهند که دریکی جسم برعدسی منطبق ودر دیگری جسم مجازی است .

یادآوری ـ باید دانست که در تمام حالاتی که ذکر شد، **حرکت جسم و تصویر در یك سوست ، یعنی اگر جسم در یك سو حرکت کند تصویر نیز در همان سو حرکت خواهدکرد .**

فرمولهای عدسیهای همگرا ـ مطالبی را که پیش از این برای یافتن تصویر به طریق هندسی بیان شد ، می‌توان با محاسبه نیز نتیجه

گرفت . فرض کنیم که درشکل ۱۱۴ فاصلهٔ جسم AB از عدسی $OA=x$، فاصلهٔ تصویر $A'B'$ ازعدسی $OA'=x'$ وفاصلهٔ کانونی $OF'=f$ باشد. در دومثلث متشابه ABO و $A'B'O$:

$$\frac{A'B'}{AB}=\frac{OA'}{OA}=\frac{x'}{x}$$



شکل ۱۱۴

این نسبت را **بزرگنمایی** عدسی می‌نامند .

$$\gamma=\frac{A'B'}{AB}=\frac{x'}{x} \qquad (۱)$$

در دو مثلث متشابه $F'A'B'$ و $F'OI$:

$$\frac{A'B'}{OI}=\frac{F'A'}{F'O}$$

لیکن مطابق شکل ، $OI=AB$ و $F'A'=x'-f$ است . پس

$$\frac{A'B'}{AB}=\frac{x'-f}{f}=\frac{x'}{f}-۱$$

از مقایسهٔ این رابطه با رابطهٔ (۱) نتیجه می‌شود :

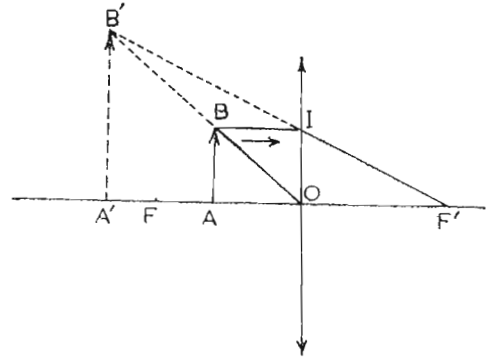
$$\frac{x'}{x}=\frac{x'}{f}-۱$$

طرفین معادلهٔ اخیررا به x' تقسیم می‌کنیم $\frac{۱}{x}=\frac{۱}{f}-\frac{۱}{x'}$

پس از اختصار $\boxed{\frac{۱}{x}+\frac{۱}{x'}=\frac{۱}{f}}$ (۲)

درصورتی‌که جسم درفاصلهٔ کانونی عدسی باشد تصویر مجازی خواهد بود . با استفاده از همان مثلثهای متشابه (شکل ۱۱۵) و پیروی از همان روش فرمول چنین می‌شود :

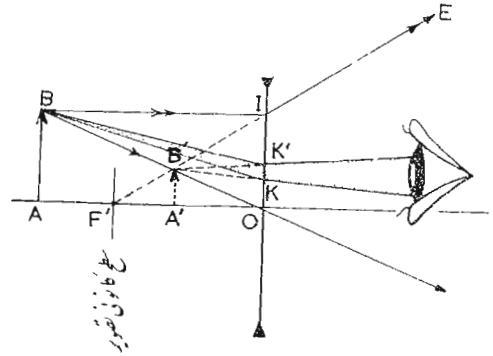
$\boxed{\frac{۱}{x}-\frac{۱}{x'}=\frac{۱}{f}}$



شکل ۱۱۵

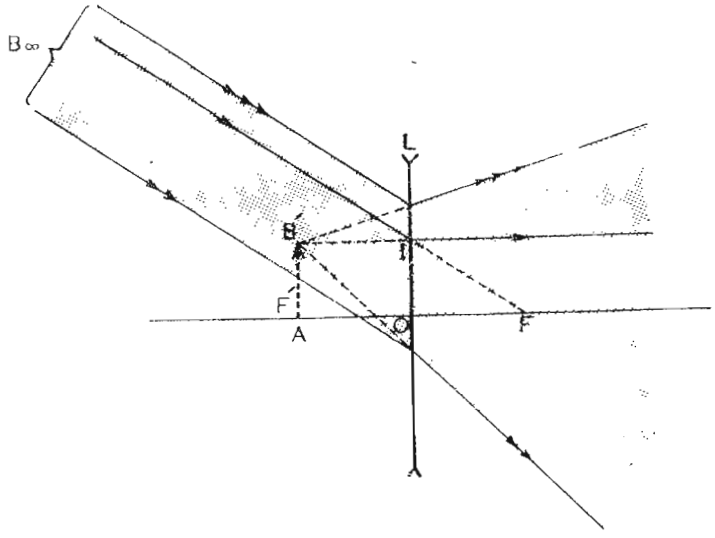
لیکن بطوری که در فرمول کلی آینه‌ها گفته شد ، و در عدسیها نیز خواهیم گفت ، این فرمول را نیز می‌توان به همان صورت کلی $\frac{۱}{x}+\frac{۱}{x'}=\frac{۱}{f}$ درآورد .

تصویر در عدسیهای واگرا - ۱- در این عدسیها شیء حقیقی همیشه تصویری می‌دهد مجازی ، مستقیم وکوچکتر از شیء که بین مرکز نوری وکانون تصویر تشکیل می‌شود (شکل ۱۱۶) .



شکل ۱۱۶

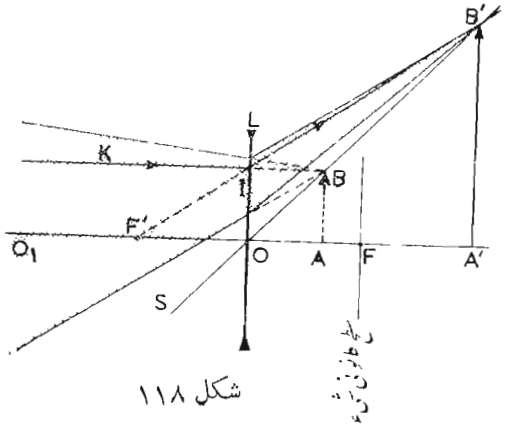
بدیهی است که اگر شیء در بینهایت باشد تصویر آن درسطح کانونی تصویر تشکیل می‌شود (شکل ۱۱۷) و طول آن $AB=f\times\alpha$ است که



شکل ۱۱۷

درآن f فاصلهٔ کانونی عدسی و α قطر ظاهری جسم است .

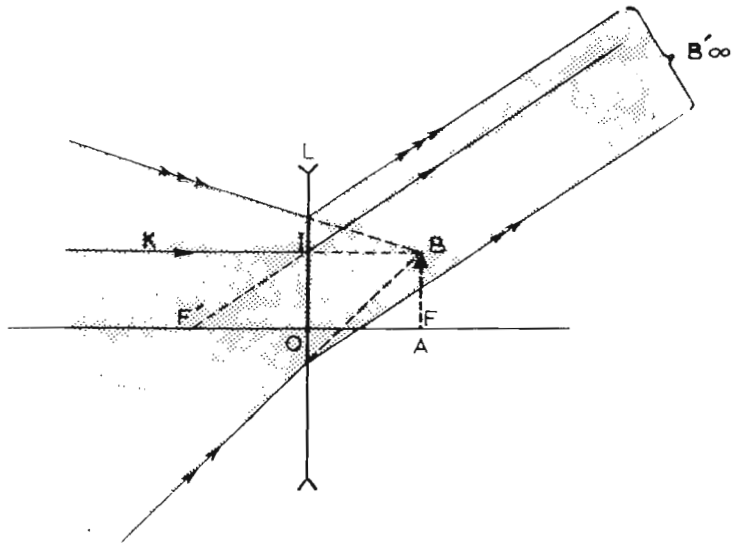
۲- هرگاه شیء مجازی بین مرکز نوری و کانون شیء قرار گیرد



شکل ۱۱۸

تصویر آن حقیقی، مستقیم و بزرگتر از شیء است (شکل ۱۱۸).

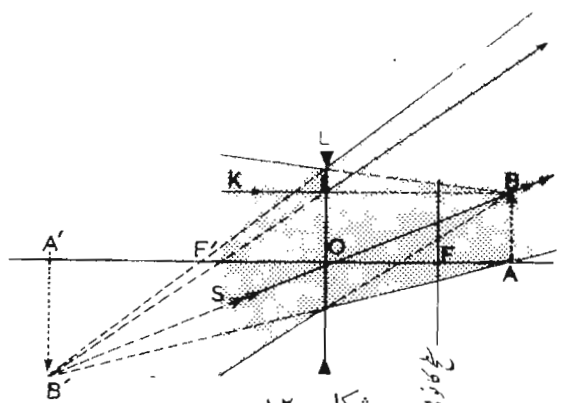
۳ـ هرگاه شیء مجازی در کانون شیء قرار گیرد تصویر آن در



شکل ۱۱۹

بینهایت تشکیل می‌شود (شکل ۱۱۹).

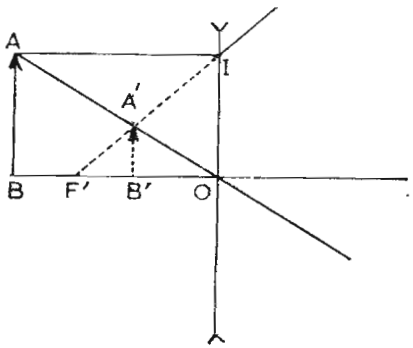
۴ـ هرگاه شیء مجازی دورتر از کانون شیء قرارگیرد تصویر آن



شکل ۱۲۰

مجازی و معکوس است (شکل ۱۲۰).

فرمولهای عدسی واگرا ـ فرمول این عدسیها نیز ازهمان راهی که در عدسیهای همگرا گفته شد بدست می‌آید (شکل ۱۲۱).



شکل ۱۲۱

اگر: $OB=x$ ، $OB'=x'$ و $OF'=f$ باشد، ازدومثلث متشابه AOB و $A'OB'$ نتیجه می‌شود:

$$\gamma=\frac{A'B'}{AB}=\frac{x'}{x} \qquad (1)$$

در دو مثلث متشابه دیگر $F'A'B'$ و $F'IO$ نیز همان نسبت را تشکیل می‌دهیم:

$$\frac{A'B'}{AB}=\frac{f-x'}{f}=1-\frac{x'}{f} \quad \text{یا} \quad \frac{A'B'}{IO}=\frac{F'B'}{F'O}$$

از مقایسهٔ این دو رابطه با هم نتیجه می‌شود که $\frac{x'}{x}=1-\frac{x'}{f}$

پس

$$\frac{1}{x}-\frac{1}{x'}=-\frac{1}{f} \qquad (2)$$

یادآور می‌شویم که کانون و تصویر هر دو مجازی هستند.

فرمول کلی عدسیها ـ بطورکلی می‌توان فرمول عدسیها را مانند فرمول آینه‌ها به‌صورت کلی زیر نوشت و در بکاربردن آن نیز همان نکاتی را که در مورد فرمول کلی آینه‌ها گفته شد ملحوظ داشت.

فرمول کلی $\boxed{\frac{۱}{x}+\frac{۱}{x'}=\frac{۱}{f}}$

مثال ـ جسمی به طول ۲cm را در فاصلهٔ ۱۲ سانتیمتری یك عدسی واگرا به فاصلهٔ کانونی ۱۰cm عمود بر محور اصلی می‌گذاریم . تصویر آن کجا تشکیل می‌شود و بزرگی آن چقدر است ؟

حل ـ مقادیر معلوم را در فرمول کلی عدسیها می‌گذاریم . چون می‌دانیم که عدسی واگراست ، به‌جای f باید ۱۰ — بگذاریم :

$$\frac{۱}{۱۲}+\frac{۱}{x'}=-\frac{۱}{۱۰} \quad \text{و از آنجا} \quad x'=\frac{-۶۰}{۱۱}=-۵/۴۵\text{cm}$$

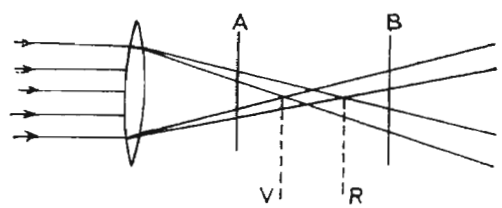
منفی بودن x' نشان می‌دهدکه تصویر مجازی است .

بزرگی تصویر را از رابطهٔ بزرگنمایی بدست می‌آوریم .

$$\frac{A'B'}{AB}=\frac{x'}{x}$$

$$\frac{A'B'}{۲}=\frac{\frac{۶۰}{۱۱}}{۱۲}=\frac{۵}{۱۱} \quad \text{پس} \quad A'B'=\frac{۱۰}{۱۱}=۰/۹\text{cm}$$

معایب عدسیها ـ همانطورکه منشور نور را تجزیه می‌کند عدسیها نیز سبب تجزیهٔ نور می‌شوند ، یعنی اگر یك دسته اشعهٔ متوازی نورسفید برعدسی بتابد ، پس از خروج از عدسی تجزیه شده و نور سرخ دورتر و نور بنفش نزدیکتر به‌عدسی جمع می‌شود ، سایر رنگهای طیف نیز بین آنها قرار می‌گیرد . بنابراین عدسی برای هر رنگ نور یك کانون دارد و این



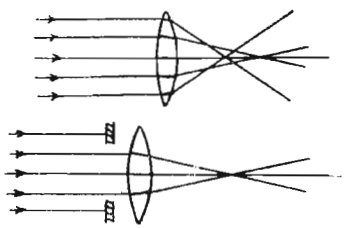
شکل ۱۲۲

امر سبب می‌شودکه تصویر کاملاً واضح نباشد و کناره‌های آن رنگی دیده شود (شکل ۱۲۲). اگر پرده‌ای را مطابق شکل دروضع A قراردهیم بر آن لکه‌ای تشکیل می‌شودکه اطراف آن سرخ است . درحالی‌که اگر پرده را در وضع B قراردهیم ، اطراف لکه‌ای‌که بر آن تشکیل می‌شود بنفش است.

این عیب عدسیها را در میکروسکوپ و دوربین عکاسی با ترکیب چند نوع عدسی تا اندازه‌ای برطرف می‌کنند .

از معایب مهم دیگر عدسیها این است‌که مانند آینه‌ها تمام اشعهٔ موازی را دریك نقطهٔ هندسی جمع نمی‌کنند . اشعه‌ای‌که به‌کنار عدسی می‌تابد نزدیکتر و اشعه‌ای‌که به‌مرکز عدسی می‌تابد دورترجمع می‌شود.

بنا بر این کانون یك نقطهٔ هندسی نیست بلکه درفاصلهٔ نسبتاً زیادی‌گسترده می‌شود. این عیب ، با قراردادن دیافراگم ، تااندازه‌ای برطرف می‌شود (شکل ۱۲۳) .

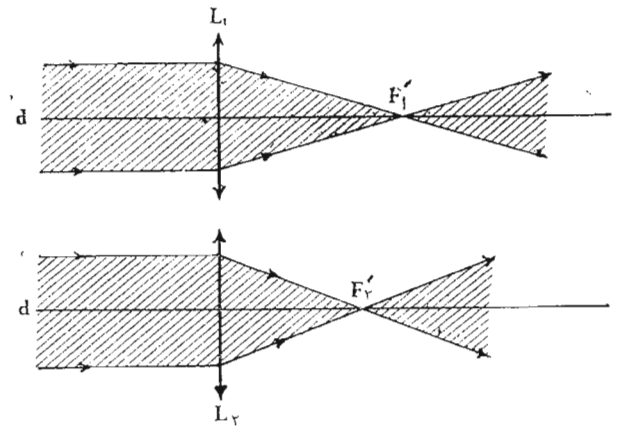


شکل ۱۲۳

همگرایی عدسیها

همگرایی ـ دوعدسی $L_۱$ و $L_۲$ به‌فاصله‌های‌کانونی متفاوت را در مقابل یك دسته اشعهٔ متوازی قرار می‌دهیم . آشکار است که از این دو عدسی ، آن‌که فاصلهٔ کانونیش کمتر است نور را زودتر از دیگری جمع می‌کند (شکل ۱۲۴) ، یعنی هرچه فاصلهٔ کانونی کوچکتر باشد عدسی

همگراتر است . در فیزیك قدرت همگرایی عدسیها را با **همگرایی** (یا **قدرت**) آنها می‌سنجند .



شکل ۱۲۴

بنا بر تعریف ، **همگرایی یك عدسی برابر است با عکس فاصلهٔ کانونی آن** . اگر همگرایی عدسی را با C و فاصلهٔ کانونی آن را با f نشان دهیم

$$C=\frac{۱}{f}$$

واحد همگرایی ـ واحد معمولی همگرایی یا قدرت عدسی **دیوپتری** (δ) است . بنا بر تعریف **یك دیوپتری همگرایی یك عدسی است که فاصلهٔ کانونی آن یك متر باشد** . پس اگر بخواهیم همگرایی یك عدسی را بر حسب دیوپتری بیان کنیم ، باید در فرمول $C=\frac{۱}{f}$ ، f **را برحسب متر بنویسیم** .

$$\leftarrow C=\frac{۱}{f\rightarrow}$$ دیوپتری / متر

مثال ۱ـ همگرایی یك عدسی همگرا را که فاصلهٔ کانونیش **۲۵cm** است حساب کنید .

$$C=\frac{۱}{f}=\frac{۱}{۰/۲۵}=۴\delta$$

مثال ۲ـ ذره‌بینی است به‌همگرایی ۵۰ دیوپتری . فاصلهٔ کانونی آن را حساب کنید .

$$f=\frac{۱}{۵۰}m=۲cm \quad \text{پس} \quad C=\frac{۱}{f}=۵۰$$

یادآوری ـ همگرایی عدسیهای واگرا را با رقم منفی نشان می‌دهند زیرا کانون آنها مجازی است و فاصلهٔ کانونیشان منفی بشمار می‌آید .

مثال ـ همگرایی یك عدسی واگرا به‌فاصلهٔ کانونی **۱۰cm** چقدراست؟

$$C=-\frac{۱}{f}=-\frac{۱}{۰/۱۰}=-۱۰\delta$$

نمرهٔ عینکهایی که اشخاص نزدیك‌بین یا دوربین به‌چشم می‌گذارند برحسب همین دیوپتری بیان می‌گردد . مثلاً یك عینك نمرهٔ ۲ — عبارت از عدسی واگرایی است به فاصلهٔ کانونی **۵۰cm** ، زیرا :

$$C=\frac{۱}{f} \quad \text{پس} \quad -۲=\frac{۱}{f} \quad \text{پس} \quad f=-\frac{۱}{۲}m=-۵۰cm$$

قضیهٔ همگرایی ـ درغالب اسبابهایی که درآنها ازعدسیها استفاده می‌شود ، برای رفع معایب عدسیها ، چند عدسی را به هم می‌چسبانند ، در این صورت **همگرایی دستگاه مساوی مجموع جبری همگراییهای هریك از عدسیهاست** . مثلاً اگر چند عدسی نازك به‌همگرایی $C_۱$ و $C_۲$ و . . . و C_n را به هم بچسبانیم یك دستگاه عدسی حاصل می‌شود که همگراییش مساوی است با C ، بطوری که :

$$\boxed{C=C_۱+C_۲+\cdots+C_n} \quad \text{یا} \quad \frac{۱}{f}=\frac{۱}{f_۱}+\frac{۱}{f_۲}+\cdots+\frac{۱}{f_n}$$

که درآن $f_۱$ و $f_۲$ و . . . فاصلهٔ کانونی عدسیها و f فاصلهٔ کانونی دستگاه است .

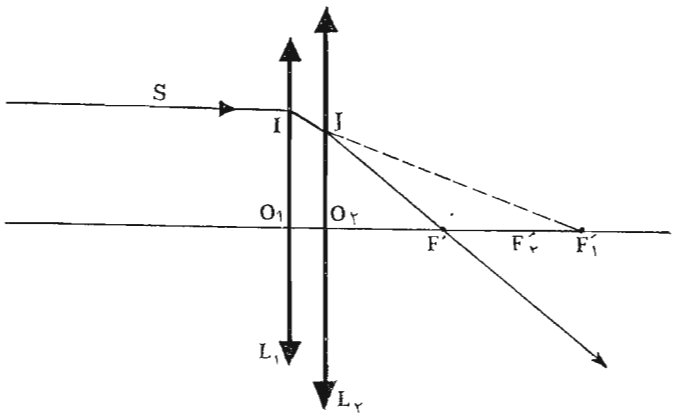
مثال ـ دو عدسی به همگرایی $C_1=2\delta$ و $C_2=3\delta$ را به هم می‌چسبانیم ، همگرایی دستگاه چقدر است ؟

$$C=C_1+C_2=2+3=5\delta$$

یعنی **می‌توان به جای دو عدسی فوق یك عدسی در نظر گرفت که همگراییش ۵ دیوپتری باشد.** فاصلهٔ کانونی این عدسی معادل عبارت خواهد بود از

$$C=\frac{1}{f} \quad \text{یعنی} \quad 5=\frac{1}{f} \quad \text{پس} \quad f=\frac{1}{5}m=20cm$$

توجه کنیدکه این مقدار از فاصلهٔ کانونی هریك از عدسیها کمتر است (شکل ۱۲۵) .



شکل ۱۲۵

یادآوری ـ واضح است‌که اگر یکی از عدسیها واگرا باشد باید همگرایی آن را در فرمول فوق منفی بشمار آورد .

مثال ـ دوعدسی، یکی همگرا به‌همگرایی ۳ دیوپتری و دیگری واگرا به‌همگرایی ۲ — دیوپتری را به‌هم می‌چسبانیم . همگرایی دستگاه چقدر است؟

$$C=C_1+C_2=3-2=1\delta$$

رابطهٔ فاصلهٔ کانونی با ضریب شکست و شعاع انحنای طرفین عدسی ـ اگرضریب شکست یك عدسی n وشعاع انحنای طرفین آن R_1 و R_2 فرض

شود ، فاصلهٔ کانونی عدسی را می‌توان از فرمول زیر بدست آورد :

$$\frac{1}{f}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)$$

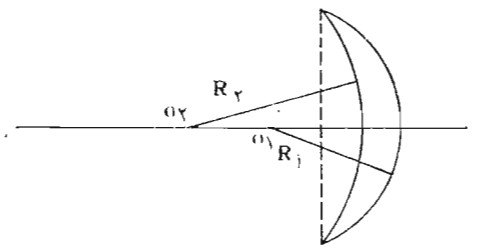
بدین طریق‌که هروجه عدسی‌که محدب باشد علامت شعاع آن را مثبت و اگرمقعر باشد شعاع آن وجه‌را منفی بشمار می‌آوریم . هرگاه‌که یك وجه عدسی تخت باشد ، چون $R=\infty$ ، $\frac{1}{R}=0$ خواهد بود .

مثال ۱ـ شعاع انحنای یك‌عدسی محدب‌الطرفین $R_1=R_2=10cm$ و ضریب شکست آن $n=\frac{3}{2}$ است . فاصلهٔ کانونی آن را حساب‌کنید .

حل ـ چون هردو وجه‌عدسی محدب است، R_1 و R_2 هردو مثبت هستند.

پس $\frac{1}{f}=(\frac{3}{2}-1)(\frac{1}{10}+\frac{1}{10})$ یعنی $f=10cm$

مثال۲ ـ عدسیی است به شکل هلال ، شعاع طرف محدب آن $10cm$ و شعاع طرف‌مقعر آن $20cm$وضریب شکست آن $n=\frac{3}{2}$ است . فاصلهٔ کانونی عدسی را حساب کنید (شکل ۱۲۶) .



شکل ۱۲۶

حل ـ چون یك طرف عدسی مقعراست، شعاع آن وجه منفی است پس :

$\frac{1}{f}=(n-1)(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2})$ یعنی $\frac{1}{f}=(\frac{3}{2}-1)(\frac{1}{10}-\frac{1}{20})$. پس $f=40cm$ بنابراین عدسی لبه نازك و فاصلهٔ کانونیش $+40cm$ است .

مثال ۳ـ ضریب شکست یك عدسی تخت و مقعر مساوی ۱/۶ و شعاع R طرف مقعر آن $15cm$ است . فاصلهٔ کانونی آن را حساب‌کنید .

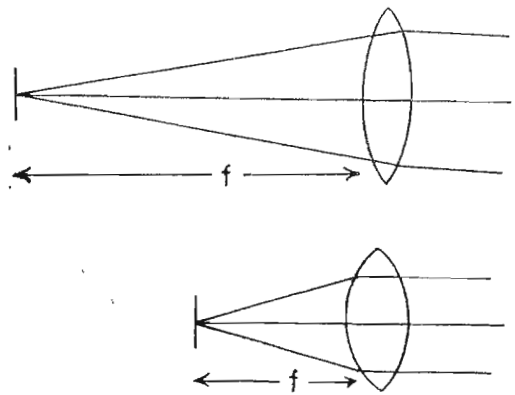
حل ـ چون یك وجه عدسی تخت است شعاع آن طرف $R=\infty$. پس :

$\frac{1}{R_2}=0$ و $\frac{1}{f}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{\infty}\right)$. پس :

$\frac{1}{f}=(1/6-1)\left(-\frac{1}{15}+0\right)$ یا $f=-25cm$

بنابراین فاصلهٔ کانونی عدسی منفی یعنی عدسی واگرا است .

یادآوری ـ فرمول فوق نشان می‌دهد که هر چه شعاع انحنای طرفین عدسی بزرگتر یعنی **عدسی تخت‌تر باشد فاصلهٔ کانونیش زیادتر و در نتیجه همگراییش کمتر است** . بالعکس هرچه شعاع انحنای طرفین عدسی کمتر باشد ، فاصلهٔ کانونی آن کمتر خواهد بود (شکل ۱۲۷) .



شکل ۱۲۷

پرسش و مسئله

۱ـ خط AB به طول 1cm به فاصلهٔ 15cm از یك عدسی همگرا واقع است . تصویر آن حقیقی به‌طول 3cm است. فاصلهٔ کانونی عدسی ومحل تصویر را پیدا کنید .

۲ـ در سؤال بالا ، هرگاه تصویر مجازی باشد ، محل تصویر و فاصلهٔ کانونی عدسی را بدست آورید .

۳ـ خطی نورانی را به‌چه فاصله ازیك عدسی همگرا ،که فاصلهٔ کانونی آن 20cm است قرار دهیم تا تصویر آن ۴ برابر شود ؟ (تصویر را یك بار حقیقی و بار دیگر مجازی فرض‌کنید) . **جواب : 25cm ، 15cm**

۴ـ با استفاده از خاصیت سطح کانونی به دو روش ترسیمی تصویر یك نقطه از شیء را که بر محور اصلی عدسی واقع است تعیین کنید .

۵ـ می‌خواهیم برپرده‌ای‌که به‌فاصلهٔ ۵ متری از شیء AB واقع است ، تصویری معکوس و ۴ برابر بزرگتر از شیء بدست آوریم . نوع ، مکان ، و فاصلهٔ‌کانونی عدسیی را که بکار می‌بریم تعیین کنید (به‌روش ترسیمی و به‌روش جبری) .

۶ـ شیء $AB=2cm$ در سطح کانونی شیء یك عدسی همگرا واقع است (نقطهٔ A برمحور اصلی است). به‌روش ترسیمی ، مشخصات تصویر وقطر ظاهری آن را تعیین‌کنید ؛ به‌فرض آنکه فاصلهٔ کانونی عدسی 50cm است .

جواب : تصویر در بینهایت ، $\alpha\neq 0/04rd$

۷ـ قطرظاهری‌کرهٔ ماه ′۳۳ است. عدسی همگرایی به‌فاصلهٔ کانونی ۲متر در مقابل آن قرار دارد. تعیین کنید قطر دایرهٔ تصویر ماه‌را در این عدسی .

۸ـ در یك سالن سینما فاصلهٔ پرده از نورافکن ۳۰ متر و بزرگنمایی دستگاه ۱۰۰ است . فاصلهٔ کانونی عدسی نورافکن سینما را بدست آورید .

۹ـ آیا یك عدسی همگرا می‌تواند :

الف ـ از یك شیء مجازی تصویری مجازی بدهد ؟

ب ـ از یك شیء حقیقی تصویری مجازی بدهد ؟

پاسخهای خودرا با استفاده ازفرمول عدسیها بیان‌کنید وبعد بادسم مسیر اشعه درستی پاسخها را تحقیق‌کنید .

۱۰ـ درمقابل یك عدسی واگراکه فاصلهٔ‌کانونی آن 12cm است شیئی قرارگرفته و تصویری حقیقی و سه برابر بزرگتر می‌دهد . محل ونوع شیء و نیز محل تصویر را تعیین‌کنید . **جواب : $p=-8cm$ ، $p'=24cm$**

۱۱ـ عدسی واگرایی یك دسته اشعهٔ استوانه‌ای شکل به قطر 4cm دریافت می‌کند، روی پرده‌ای‌که دریك متری پشت عدسی قراردارد لکه‌ای به‌قطر 20cm تشکیل می‌شود . فاصلهٔ کانونی عدسی و همگرایی آن را تعیین کنید.

۱۲ـ همگرایی عدسی واگرایی ۵ — دیوپتری‌است. جسمی دریك متری این عدسی قرار دارد. تصویر آن به‌چه فاصله ازعدسی تشکیل می‌شود؟ دراین حالت بزرگنمایی عدسی چقدر است ؟

۱۳ـ به‌یك عدسی همگرا که فاصلهٔ کانونی آن 20cm است یك عدسی دیگر می‌چسبانیم . همگرایی دستگاه برابر ۴ دیوپتری می‌شود . نوع عدسی دوم و فاصلهٔ کانونی آن را تعیین کنید . **جواب : $f=100cm$ ، واگرا**

۱۴ـ فاصلهٔ کانونی عدسی مسطح ـ محدبی را پیدا کنیدکه شعاع انحنای

سطح محدب آن ۷۰cm و ضریب شکست مادهٔ آن ۱/۳۵ است .

جواب : $f=2m$

۱۵ـ فاصلهٔ کانونی عدسی مقعرالطرفینی را پیدا کنید که شعاع انحنای طرفین آن بترتیب ۱۰cm و ۱۵cm است و ضریب شکست مادهٔ آن نسبت به هوا ۱/۵ است .

جواب : $f=-12cm$

۱۶ـ دو عدسی مسطح ـ محدب داریم . شعاع انحنای اولی ۳۰cm و ضریب‌شکست‌آن ۱/۵ است. شعاع انحنای دومی نیز ۳۰cm است؛ اما ضریب شکست آن ۱/۵۲ است . طرف مسطح این دو عدسی را به هم می‌چسبانیم . همگرایی و فاصلهٔ کانونی دستگاه دو عدسی را تعیین‌کنید .

۱۷ـ همگرایی یك عدسی مسطح ـ مقعر ۴ — دیوپتری وضریب شکست آن ۱/۵ است . شعاع انحنای طرف مقعر آن را تعیین‌کنید .

طرف مسطح این عدسی را روی یك میز قرار می‌دهیم وگودی عدسی‌را پر از آب می‌کنیم . ضریب شکست آب $\frac{۴}{۳}$ است . همگرایی دستگاه را تعیین کنید .

۱۸ـ فاصلهٔ کانونی یك عدسی $f=-10cm$ است . همگرایی آن چند دیوپتری است ؟

۱۹ـ فاصلهٔ جسم AB به‌طول ۲cm از یك‌پرده مساوی ۸۰cm است. یك عدسی همگرا ، دردو وضع، تصویرجسم را بر روی پرده می‌اندازد. فاصلهٔ این دو وضع عدسی ۴۰cm است، طول تصویررا درهردوحالت وفاصلهٔ کانونی عدسی‌را بدست آورید (این مسئله با استفاده ازاصل بازگشت نور بآسانی حل می‌شود، بدین طریق‌که ثابت می‌شودکه فاصلهٔ جسم تا وضع اول عدسی مساوی فاصلهٔ پرده تا وضع دوم آن است) .

جواب : $f=15cm$ ، طول تصویر $6cm$ و $\frac{۲}{۳}cm$

۲۰ـ فاصلهٔ شیء حقیقی AB ازپرده مساوی d است. یك عدسی همگرا تصویرجسم را برروی پرده می‌اندازد: ۱ـ محل عدسی را تعیین‌کنید. ۲ـ شرط امکان مسئله چیست ؟ ۳ ـ اگر $d=36cm$ و $f=8cm$ باشد ، جوابها را بدست آورده نتایج را با اصل بازگشت نور توجیه کنید .

۲۱ـ الف ـ دوعدسی همگرای L_1 و L_2 دارای یك‌محوراصلی و به‌فاصلهٔ ۳۰cm ازیکدیگرند. $f_1=8cm$ و $f_2=10cm$ است. جسم AB به‌فاصلهٔ

۱۲cm جلو عدسی L_1 قرار دارد . تعیین‌کنید محل ونوع آخرین تصویررا در دستگاه دو عدسی .

ب ـ به جای عدسی L_2 یك عدسی واگرا به فاصلهٔ کانونی ۱۰cm می‌گذاریم . محل و نوع آخرین تصویر را تعیین کنید .

۲۲ـ فاصلهٔ‌کانونی عدسی یك‌دستگاه عکاسی ۱۲cm است وهرگاه صفحهٔ حساس فیلم را یك میلیمتر تغییر محل دهند باز تصویر بر آن واضح می‌ماند . تعیین کنید برای این عدسی از چه فاصله‌ای به بالا بینهایت محسوب می‌شود .

راهنمایی ـ اول فرض‌کنیدکه جسم در ∞ وتصویر آن درکانون است. جسم را می‌توان چندان نزدیك کرد که تصویر فقط یك میلیمتر از کانون دور شود . دراین صورت فاصلهٔ تصویر ۱۲۱ میلیمتر می‌شود و ازآن‌رو فاصلهٔ جسم بدست می‌آید .

جواب : ۱۴/۵۲ متر

۲۳ـ نقطهٔ نورانی A بر روی محور اصلی یك عدسی به‌فاصلهٔ کانونی $f=10cm$ واقع است . فاصلهٔ آن نقطه تا عدسی ۱۵cm است . اولاً محل تصویر را تعیین‌کنید. ثانیاً یك تیغهٔ متوازی‌السطوح را یك بار بین عدسی و تصویر و باردیگر بین جسم و عدسی قرار می‌دهیم. تعیین‌کنید درهردو حالت تصویر چقدر تغییر محل می‌دهد . مسیر یك شعاع نور را که از نقطهٔ A خارج می‌شود در هر دو حالت رسم کنید . ضخامت تیغه ۱cm و ضریب شکست آن $\frac{۳}{۲}$ است .

۲۴ـ دو عدسی نازك یکی همگرا به همگرایی ۲۰ دیوپتری و دیگری واگرا به فاصلهٔ کانونی ۱۰cm به همدیگر چسبیده‌اند . در چه فاصله از دستگاه جسم روشنی قرار دهیم تا تصویر حقیقی چهار برابر بزرگتر از شیء بدست آید ؟

هنرسرای عالی تهران

۲۵ـ دوعدسی همگرا و واگرا راکه فاصلهٔ‌کانونی هرکدام ۱۰cm است به‌هم چسبانده و به‌طرف خورشید می‌گیریم، تصویری دیده نمی‌شود. عدسی واگرا را آنقدر ازعدسی همگرا دور می‌سازیم تا تصویرحقیقی خورشید در ده‌سانتیمتری عدسی واگرا تشکیل شود. فاصلهٔ دو عدسی را پیداکنید. عدسی همگرا به‌طرف خورشید است .

دانشکدهٔ فنی تهران

۲۶ـ شعاع نوری موازی محور اصلی به یك عدسی می‌تابد بطوری که

فاصلهٔ این شعاع تا محور اصلی $4cm$ است و زاویهٔ انحراف ۴۵ درجه است. حساب‌کنید همگرایی عدسی را .

انستیتو ناجی

۲۷ـ دوعدسی همگرای نازك متشابه ، که فاصلهٔ‌کانونی هریك از آنها $20cm$ است ، به‌فاصلهٔ $10cm$ از یکدیگر واقع شده‌اند و محور اصلی آنها دریك امتداد است . اشعهٔ نورانی موازی با محور روی یك عدسی می‌تابدوپس از عبور از دو عدسی در یك نقطه متمرکز می‌شود. فاصلهٔ نقطهٔ تمرکز اشعه را از نزدیکترین عدسی حساب‌کنید . و مسیر یك شعاع را رسم‌کنید .

دانشکدهٔ علوم تهران ــ رشتهٔ زیست شناسی

۲۸ـ عدسی محدب‌الطرفینی ، که شعاع انحنای طرفین آن $R_1 = R_2 = 12cm$ است ، از شیشه‌ای به ضریب شکست $n = 1/5$ ساخته شده است . اولاً ، همگرایی این عدسی چقدر است ؟ ثانیاً ، به‌چه فاصله ازاین عدسی باید عدسی واگرایی به فاصلهٔ کانونی $4cm$ قرار داد تا یك دسته اشعهٔ متوازی پس از عبور از دستگاه به‌موازات امتداد اولیهٔ خود خارج شود ؟

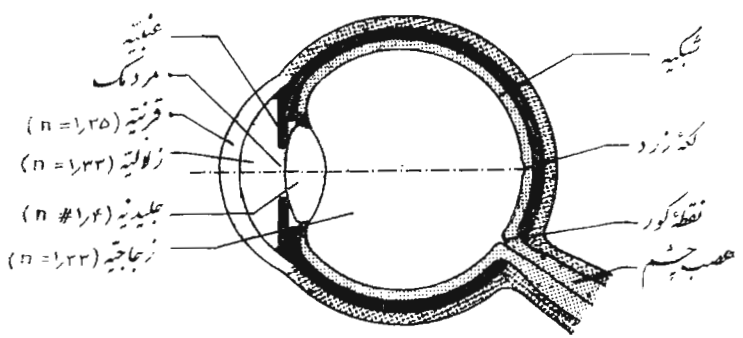
دانشکدهٔ فنی تهران

فصل پنجم

چشم

چشم و معایب آن

ساختمان چشم ــ جالبترین و مهمترین دستگاهی که خواص عدسیها را دارد، چشم است . چشم را می‌توان با یك دستگاه عکاسی مقایسه کرد که تصویر اجسام را بطور معکوس بر روی پردهٔ حساسی تشکیل می‌دهد (شکل ۱۲۸) .

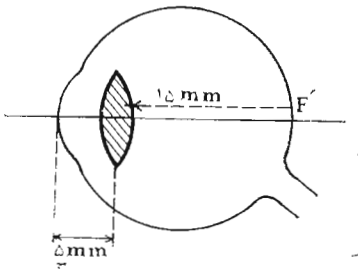


شکل ۱۲۸

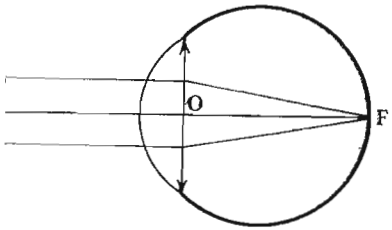
این پردهٔ حساس **شبکیهٔ** چشم است وانسان به‌حسب عادت وتجربه اجسام را مستقیم می‌بیند . اشعهٔ نور که از خارج به چشم می‌تابد اول از

پردهٔ محکم و مقاومی به نام **قرنیّه** که در قسمت جلو چشم و کاملاً شفاف است می‌گذرد . این اشعه ، پس از عبور از قرنیه ، از مایع زلالی موسوم به **زلالیّه** عبور کرده سپس به **عدسی** چشم می‌رسد . جلو این عدسی **مردمك** چشم ، به منظور تنظیم مقدار نوری که برای رؤیت لازم است ، قرار دارد . مردمك برحسب مقدار نور فراخ یا تنگ می‌شود. اشعهٔ نور پس از عبور از عدسی از مادهٔ شفاف دیگری عبور می‌کندکه به **زجاجیّه** (شیشه‌ای) موسوم است و بعد از آن به شبکیه می‌رسد و بدین ترتیب تصویر اجسام خارج بر روی قسمت حساستر شبکیه که به **لکهٔ زرد** موسوم است می‌افتد . دراین قسمت سلولهای عصبی چشم متأثر شده وحس رؤیت را در مغز ایجاد می‌کنند .

درچشم ،**قرنیه**، **عدسی**، **زلالیه**، و **زجاجیه** دستگاهی را تشکیل می‌دهند که جمعاً **تصویر اشیای خارج را برلکهٔ زرد می‌اندازند** . لیکن برای سهولت، چشم را با یك عدسی همگرای ساده و نازك نمایش می‌دهیم که محیط طرفین آن متفاوت است . کانون این عدسی درحال استراحت ،



شکل ۱۳۰

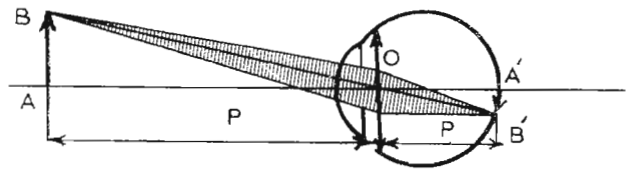


شکل ۱۲۹

یعنی هنگامی‌که تطابق انجام نگرفته ، روی لکهٔ زرد است (شکل ۱۲۹) وفاصلهٔ این عدسی تا لکهٔ زرد برای همه در حدود **۱۵mm** است (شکل

۱۳۰) . به عبارت دیگر کانون عدسی چشم سالم در حال استراحت روی لکهٔ زرد واقع است .

تطابق ـ در صورتی چشم یك جسم را واضح می‌بیند که تصویر جسم بر روی لکهٔ زرد شبکیه بیفتد . اکنون فرض‌کنیم‌که تصویر جسمی که در فاصلهٔ یك متری چشم است بر روی شبکیه افتاده باشد . آن وقت چشم آن را واضح می‌بیند (شکل ۱۳۱) . حال اگر آن جسم را جلوتر بیاوریم ، مطابق خواص عدسیها ، تصویر آن ازلکهٔ زرد دورتر و درپشت



شکل ۱۳۱

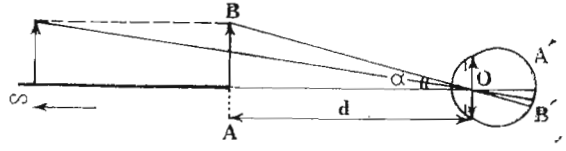
آن تشکیل می‌شود وبالعکس اگر جسم را دورتر ببریم تصویرآن جلوتر از لکهٔ زرد تشکیل می‌شود . بدیهی است در هر دو حالت ، چون تصویر بر روی شبکیه نیست ، چشم آن را بطور وضوح نخواهد دید درصورتی که عملاً می‌دانیم‌که چشم می‌تواند در هرسه حالت جسم را بطور وضوح رؤیت کند . علت این است که عدسی چشم تحدب (همگرایی) خودرا **خود بخود** ، چندان تغییر می‌دهد تاتصویرجسمی راکه می‌خواهد واضح ببیند بر روی شبکیه بیندازد. برای این‌منظور ماهیچه‌های قسمت داخلی اطراف عنبیه منقبض می‌شوند وتحدب عدسی را زیاد می‌کنند. بدین‌طریق وقتی که جسم را جلو می‌آوریم تحدب عدسی چشم زیاد می‌شود تا فاصلهٔ کانونیش‌کم شده تصویر بر روی شبکیه بیفتد ، بالعکس هنگامی‌که جسم

دورتر برود تحدب عدسی چندان کم می‌شود تا باز تصویر جسم برشبکیه تشکیل شود . این عمل چشم را **تطابق** می‌نامند .

بنا براین **درعمل تطابق ، چشم همگرایی خود را چندان تغییرمی‌دهد که تصویر جسمی‌که می‌خواهد آن را ببیند بر روی شبکیه بیفتد .**

چشم سالم ـ چشم سالم فواصل بسیار دور تا ۶۵ متر را بدون تطابق ، واضح می‌بیند . زیرا وقتی که جسم از بینهایت دور تا ۶۵ متری نزدیك شود تغییر محل تصویر از شبکیه چندان‌کم است‌که برای سلولهای عصبی چشم محسوس نیست . به‌عبارت دیگر، برای عدسی چشم ، ازفاصلهٔ ۶۵ متر به بالا بمنزلهٔ بینهایت دور محسوب می‌شود **این فاصله را فاصلهٔ حداکثر رؤیت (D) می‌نامند .**

برای فواصل‌کمتر از ۶۵ متر ، چشم تطابق می‌کند . لیکن عملاً تطابق تا حدود ۲۵cm بیشتر میسر نیست . **این فاصله را فاصلهٔ حداقل رؤیت (d) می‌نامند** (شکل ۱۳۲) . اگرفاصله از ۲۵cm کمتر شود، بازهم

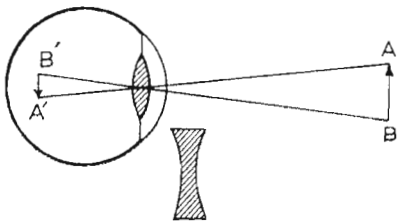


شکل ۱۳۲

چشم تا ۱۵cm را می‌تواند تطابق کند ، لیکن پس ازمدت کوتاهی خسته می‌شود. آشکار است‌که هرچه جسم نزدیکترباشد آن را بزرگتر می‌بینیم و درنتیجه جزئیات آن را بهترتشخیص می‌دهیم ، ولی براثر تطابق زودتر خسته می‌شویم . برای مطالعهٔ کتاب باید آن را در فاصلهٔ ۲۵ سانتیمتری

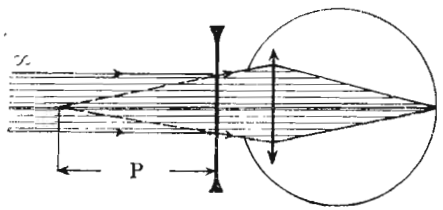
نگه داشت‌که هم حروف درشت‌تر دیده شود و هم چشم فوراً خسته نشود.

چشم نزدیك بین ـ درچشم نزدیك بین ، فاصلهٔ حداقل وحداکثر رؤیت کمتر از آن چشم سالم است ، زیرا در اشخاص نزدیك بین کانون عدسی چشم در حال استراحت (بدون تطابق) **جلوتر از لکهٔ زرد است** و از



شکل ۱۳۳

این‌رو تصویر اجسام دور بر روی شبکیه تشکیل نمی‌شود (شکل ۱۳۳) . به همین مناسبت شخص نزدیك‌بین اجسام دور را نمی‌تواند بوضوح ببیند. دراشخاص نزدیك‌بین فاصلهٔ حداکثر رؤیت درحدود متر است (به حسب درجهٔ نزدیك بینی اشخاص فرق می‌کند) . ازاین فاصله تا حدود ۱۰cm چشم تطابق می‌کند، این است‌که اشخاص نزدیك‌بین برای مطالعهٔ کتاب آن را بیشتر از معمول نزدیك به‌چشم می‌آورند. چون همگرایی عدسی چشم نزدیك‌بین زیاد است، برای رفع این عیب شخص نزدیك‌بین باید عینك واگرا به‌چشم بگذارد تا

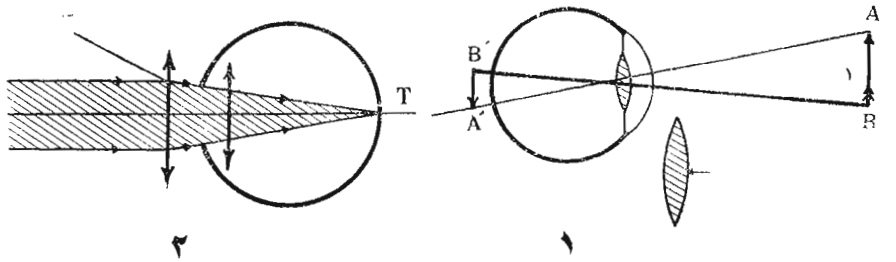


شکل ۱۳۴

همگرایی را بکاهد . این عدسی باید طوری باشد که دستگاه چشم بیمار و عینك جمعاً مانند یك چشم معمولی بشود، یعنی در حالت عادی (بدون تطابق) تصویر اجسام دور روی لکهٔ زرد بیفتد . پس باید تصویر اجسام دور در عدسی عینك ، که در کانون آن است ، در حداکثر رؤیت

چشم باشد یعنی **فاصلهٔ کانونی عدسی عینك باید برابر با فاصلهٔ حداکثر رؤیت چشم بیمار باشد** (شکل ۱۳۴) . دراین صورت چشم نزدیك‌بین اجسام دور را مانند چشم سالم بدون تطابق خواهد دید . مثلاً اگر حد اکثر رؤیت چشم نزدیك‌بین ۵۰cm باشد ، باید عینك واگرایی بکار برد که فاصلهٔ کانونی‌آن ۵۰cm باشد. همگرایی یك چنین عدسی (نمرهٔ عینك) $\frac{۱}{۰/۵}$ — یعنی ۲ — دیوپتری است .

چشم دوربین ـ در چشم دوربین کانون عدسی چشم در حال استراحت (بدون تطابق) **در پشت لکهٔ زرد** است. ازاین‌روشخص دوربین اشیای دور را نیز با تطابق می‌بیند . درنتیجه حد اقل رؤیت آن بیشتراز آن چشم سالم و در حدود ۵۰cm است (شکل ۱۳۵ — ۱) . در چشم دوربین تحدب یا همگرایی عدسی چشم‌کمتر ازتحدب چشم معمولی است



۲ ۱

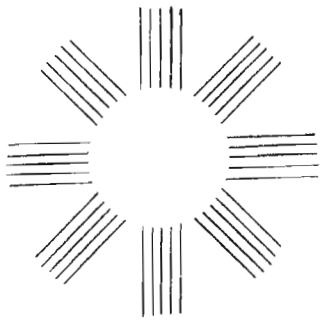
شکل ۱۳۵

و برای جبران آن باید عینك همگرا بکار برد تا همگرایی زیاد شود و تصویر اجسام دور بدون تطابق بر شبکیه بیفتد (شکل ۱۳۵ — ۲) .

پیر چشمی ـ پیر چشمی عیبی است که همهٔ اشخاص بدان دچار می‌شوند. براثر بالارفتن‌سن‌شخص، عدسی چشم تدریجاً قدرت تطابق‌خود را از دست می‌دهد . در نتیجه فاصلهٔ حداقل رؤیت زیاد می‌شود ، لیکن

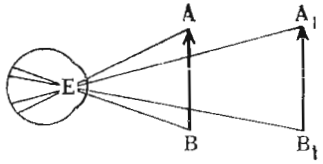
شخص می‌تواند فواصل دور را، بدون تطابق، واضح ببیند. بنابراین برای دیدن اشیای نزدیك باید عینك همگرا بکار برد .

آستیگماتیسم ـ عیب دیگری که برای چشم پیش می‌آید این است که کرهٔ چشم یا قرنیه یا عدسی آن از وضع متقارن و کروی خود خارج می‌شود و یك نوع بی‌نظمی درشکل آنها پدید می‌آید. دراین صورت چشم بعضی از امتدادها را واضح و بعضی دیگررا تار می‌بیند. مثلاً در شکل۱۳۶ چشم آستیگمات از صفحهٔ خط‌کشی شده پاره‌ای‌ازخطوط‌راواضح‌ترازدیگرخطوط می‌بیند (برای آزمایش باید یك چشم را بست) . برای اصلاح‌این‌عیب عینکهای غیرکروی (مثلاً استوانه‌ای) بکارمی‌برند.



شکل ۱۳۶

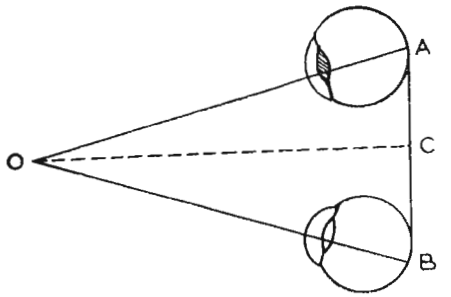
تشخیص فاصله و اندازهٔ اجسام ـ اشعه‌ای‌که از کناره‌های هر جسم به‌مرکزعدسی چشم می‌تابند زاویه‌ای با یکدیگر می‌سازندکه همان قطر ظاهری جسم‌است. بزرگی وکوچکی تصویر جسم بر روی شبکیه به این زاویه بستگی دارد و شك نیست که هرچه این زاویه بزرگتر باشد تصویرجسم برشبکیه بزرگتر است و ناظر جسم را بزرگتر می‌بیند (شکل ۱۳۷). دراین شکل جسم درفواصل مختلف نسبت به چشم قرار دارد . در وضع A_1B_1 چون قطر ظاهریش‌کوچکتر از قطرظاهری در وضع AB است ، تصویر آن بر



شکل ۱۳۷

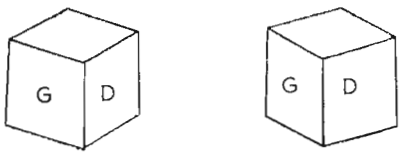
شبکیه کوچکتر است و در نتیجه جسم کوچکتر بنظر می‌رسد. به‌همین دلیل تصویر شخصی‌که به فاصلهٔ ده متر از ما ایستاده است تقریباً ۵ برابر بزرگتر از تصویر او درحالتی است‌که به‌فاصلهٔ پنجاه مترازما ایستاده است.

در تشخیص فاصله و دوری و نزدیکی اجسام، عقیدهٔ دانشمندان طبیعی براین است که انحراف کره‌های چشم به طرف هم و فشاری که بر ماهیچه‌های آن وارد می‌شود مؤثر است و البته مقدار این انحراف که هر دو چشم انجام می‌دهند بستگی به دوری و نزدیکی اجسام دارد و همین امر است که ما را در تشخیص فاصلهٔ اجسام یاری می‌کند (شکل ۱۳۸). به‌همین علت است‌که اگر یك چشم خود را ببندیم تشخیص فاصله مشکل می‌شود.



شکل ۱۳۸

علت تشخیص برجستگی اجسام این است که تصاویری که هریك از کره‌های چشم بر روی شبکیه می‌اندازد کمی با هم فرق دارند، مثلاً اگرمکعبی‌را یك دفعه باچشم راست وبار دیگر باچشم چپ نگاه کنید، مکعب یکسان دیده نمی‌شود

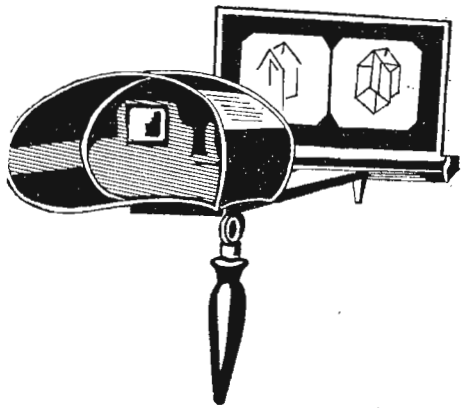


شکل ۱۳۹

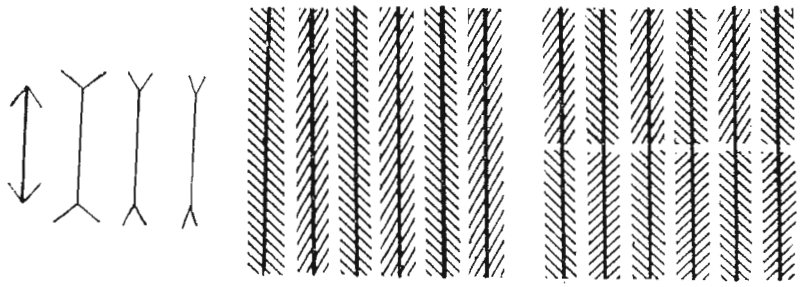
(شکل ۱۳۹) و مغز از ترکیب این دو تصویر برجستگی (حجم داشتن)

اجسام را احساس می‌کند.

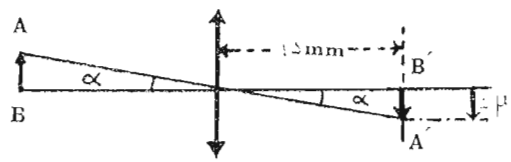
در اسبابهایی‌که تصاویر را حجم‌دار نشان می‌دهند از همین نظریه استفاده کرده‌اند. بدین طریق که به‌وسیلهٔ دو دوربین عکاسی که تقریباً به‌فاصلهٔ شش سانتیمترکنار هم و به وضع چشمها قرار دارند از یك منظره عکسبرداری می‌کنند. هرجفت این عکسها کمی با هم فرق دارد و چون آن‌دورا باهم‌دراسبابی به نام استرئوسکوپ (Stéréoscope) نگاه‌کنیم دوتصویر با هم ترکیب شده و احساس برجستگی می‌شود (شکل۱۴۰).


شکل ۱۴۰ - استرئوسکوپ

خطای چشم - چشم انسان نمی‌تواند همیشه درست قضاوت کند وحقیقت اشکال را تشخیص دهد. توجه به‌اشکال زیر این مطلب را اثبات می‌کند (شکل ۱۴۱).


شکل ۱۴۱

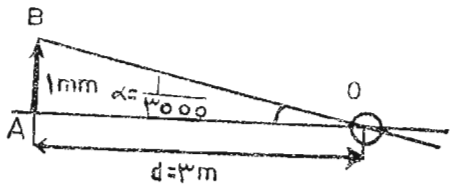
قدرت تفکیک چشم - با توجه به تعریف قطر ظاهری ، معلوم می‌شودکه هرچه جسم دورتر برود قطر ظاهریش کمتر و تشخیص جزئیات آن نیز رفته رفته غیرممکن می‌شود . مثلاً اگر جسم **AB** تدریجاً دور شود تصویر آن روی شبکیه کوچکتر می‌شود و اگر این تصویر چندان کوچك شودکه تصویر هردونقطهٔ **A** و **B** برروی یك سلول عصبی تشکیل گردد ، چشم آن دو نقطه را روی هم احساس می‌کند ، به عبارت دیگر **دو نقطه را از یکدیگر تفکیك نمی‌کند** و خط **AB** به نظر یك نقطه می‌آید. برای آنکه چشم بتواند دو نقطهٔ **A** و **B** را از یکدیگر تفکیك کند باید قطرظاهری خط **AB** از $\frac{۱}{۳۰۰۰}$ رادیان یا تقریباً یك دقیقه زیادتر باشد. **این زاویه را قدرت تفکیك یا حد تفکیك چشم می‌نامند** (شکل ۱۴۲) . محدود بودن قدرت تفکیك چشم برای این است‌که انتهای سلولهای حسی شبکیه نقطهٔ هندسی نیست، بلکه دایرهٔ‌کوچکی است‌که قطرآن درحدود ۵ میکرون (پنج هزارم میلیمتر) است . برای آنکه دو نقطهٔ **A** و **B** را چشم از هم تفکیك کند باید تصویر **A** روی یك سلول حسی و تصویر **B**



شکل ۱۴۲

روی سلول حسی دیگر بیفتد. پس باید فاصلهٔ تصویرهای **A´** و **B´** درچشم حداقل به اندازهٔ ۵ میکرون باشد (شکل ۱۴۲) و چون در چشم معمولی فاصلهٔ عدسی از شبکیه در حدود **۱۵mm** است ، حداقل قطر ظاهری

جسم (خط **AB**) باید $\frac{۱}{۳۰۰۰} = \frac{۵}{۱۵۰۰۰}$ رادیان باشد . آشکار است برای اینکه چشم بتواند جزئیات اشیارا تشخیص دهد، **قطرظاهری هرجزء** باید از این مقدار زیادتر باشد تا تصویر هر جزء بتنهایی اقلاً روی یك سلول عصبی بیفتد. مثلاً اگر دوخط موازی نازك کنار هم و به‌فاصلهٔ یك میلیمتر ازیکدیگر رسم شود، چشم سالم حداکثر تا فاصلهٔ سه متر آنهارا بطور مجزا می‌بیند. دراین فاصله $\alpha = \frac{AB}{d} = \frac{۱}{۳۰۰۰}$رادیان است (شکل ۱۴۳). لیکن اگر فاصله زیادترشود خطوط ازهم تفکیك نمی‌شود چه دراین صورت : $\alpha < \frac{۱}{۳۰۰۰}$ رادیان است .



شکل ۱۴۳

بنابراین، تشخیص جزئیات اشیا به‌قطر ظاهری آنها بستگی دارد و برای واضح دیدن هر جسم باید به آن نزدیکتر شد . لیکن اجسامی مانند خورشید و ستارگان چندان از ما دورند که نزدیك شدن چندین هزار کیلومتر هم تأثیری در کم کردن فاصله ندارد و اجسامی مانند میکروبها چندان کوچکندکه اگرآنها را درحداقل رؤیت هم قراردهیم، باز هم قطر ظاهریشان بسیار کم و از حد تفکیك چشم کوچکتر خواهد بود. مثلاً قطرظاهری یك‌گلبول قرمز بقطر۵ میکرون در ۱۵ سانتیمتری چشم مساوی است با $\alpha = \frac{۱}{۳۰۰۰۰} = \frac{۵}{۱۵۰۰۰۰}$ رادیان یعنی ده مرتبه ازحد تفکیك چشم کوچکتر . به همین مناسبت برای دیدن اینگونه اجسام

اسبابهایی بکار می‌برندکه بتواند قطر ظاهری آنها را ازحد تفکیك چشم بزرگتر کند .

درفصل آینده خواهیم دیدکه دوربین و میکروسکوپ و ذره‌بین که برای رؤیت اشیای دور یا ریز بکار می‌روند قطر ظاهری تصویر را زیادتر کرده آنها را قابل رؤیت می‌سازند .

پرسش و مسئله

۱ـ مرکز عدسی چشمی ۱۵mm از شبکیه‌اش فاصله دارد . اگر این چشم بتواند فواصل بین ۲ متر و ۲۰cm را رؤیت کند ، تعیین کنید فاصلهٔ کانونی عدسی بین چه مقادیری تغییر می‌کند .

۲ـ حد اکثر فاصلهٔ دید یك شخص نزدیك‌بین یك متر است ، یعنی در این فاصله شخص تطابق نمی‌کند، فاصلهٔ عدسی چشم تا شبکیه ۱۵mm است. تعیین‌کنید کانون عدسی چقدر جلوتر از شبکیه است .

۳ـ درمسئلهٔ فوق برای اصلاح چشم نمرهٔ عینك شخص چقدرباید باشد؟

۴ـ شخص نزدیك‌بینی از ۸۰cm تا ۱۲cm را خوب می‌بیند . اگر عینك واگرایی به‌همگرایی ۱/۲۵ دیوپتری به‌چشم بگذارد بین چه فواصلی را با عینك می‌تواند رؤیت‌کند ؟ جواب : از ∞ تا ۱۴/۱cm

۵ـ چرا اشخاص نزدیك‌بین برای دیدن اشیای خیلی‌کوچك عینك خود را از چشم برمی‌دارند ؟

۶ـ شخصی هنگام خواندن عینك می‌گذارد ولی برای دیدن اجسام دور عینك را برمی‌دارد . عیب چشم و نوع عینك او چیست ؟

۷ـ حد رؤیت شخصی بین ۲۴ و ۸ سانتیمتر است . تعیین کنید برای اینکه این شخص اجسامی را که در فاصلهٔ ۳۰ متری است بدون خستگی رؤیت کند چه عینکی باید به‌چشم بگذارد . حداقل رؤیت او با این عینك چقدر است (عینك چسبیده به‌چشم فرض شود) ؟

۸ـ برای تصحیح یك چشم نزدیك‌بین‌که حداکثر فاصلهٔ دیدآن ۵۰cm است ، چه نوع عینك و به‌چه قدرتی باید بکار برد ؟

دانشکدهٔ علوم ـ رشتهٔ فیزیك

۹ـ شخص دوربینی باید کتاب را در ۵۰ سانتیمتری از چشم خود قرار دهد تا بی‌عینك بخواند. چه نوع عینك و به‌چه فاصلهٔ کانونی بکار برد تا کتاب را در فاصلهٔ ۳۰ سانتیمتری از چشم به‌همان کیفیت بتواند بخواند ؟

دانشکدهٔ علوم

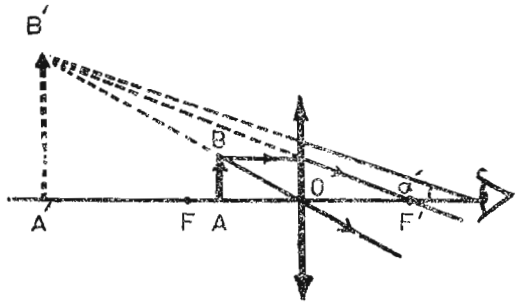
فصل ششم

دستگاههای نوری

ذره‌بین

چنانکه درفصل پیش اشاره‌شد، از ترکیب عدسیها وسایلی می‌سازند که بتواند قطر ظاهری اجسام را از حد اقل تفکیك چشم بزرگتر کند . یکی از این وسایل ذره‌بین ساده است .

ذره بین ـ ذره‌بین عدسی همگرایی است که فاصلهٔ کانونیش معمولاً درحدودچند سانتیمتر است و ، چنانکه در قسمت عدسیها بیان‌شد، چون جسم کوچکی را درفاصلهٔ کانونی آن قرار دهیم تصویری بزرگ، مجازی و مستقیم می‌دهد (شکل ۱۴۴) .

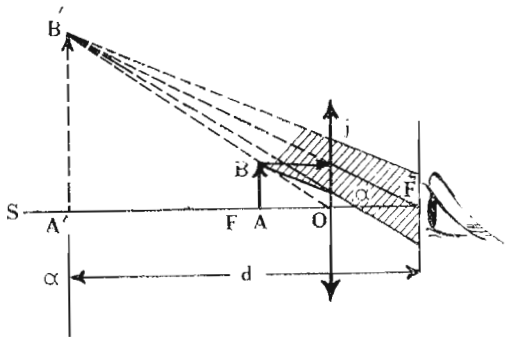


شکل ۱۴۴

این دستگاه قطر ظاهری جسم را بزرگتر می‌کند و در نتیجه تصویری

بزرگتر برشبکیه تشکیل می‌شودکه می‌توان جزئیات جسم را بر روی آن بهتر تشخیص داد .

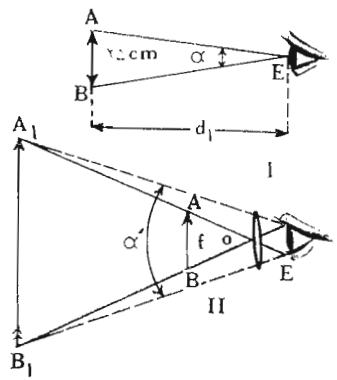
میزان کردن دستگاه ـ برای آنکه ناظر بتواند تصویر جسم را در ذره‌بین واضح ببیند ، باید این تصویر بین حداقل و حداکثر رؤیت وی واقع شود. بنابراین هرگاه جسم درسطح کانونی عدسی واقع باشد، تصویر در بینهایت دور تشکیل می‌شود و اگر ناظر بخواهد تصویر را در حداقل رؤیت خود بیاورد (در حدود ۲۵ سانتیمتری برای چشم سالم) باید جسم را به عدسی ، مثلاً به اندازهٔ $AF = l$ نزدیك کند (شکل ۱۴۵) . این مقدار l را **دامنهٔ تنظیم** دستگاه می‌نامند، زیرا اگرجسم در این فاصله تغییرجا دهد ، ناظر می‌تواند تصویر را بطور واضح ببیند . لیکن باید دانست که **همواره تصویررا باید درحداکثر رؤیت انداخت تا چشم بتواند بدون خستگی آن را مشاهده‌کند** . در این صورت جسم تقریباً در سطح کانونی ذره‌بین واقع می‌شود (برای چشم سالم) .



شکل ۱۴۵

درشتنمایی ـ می‌دانیم که دستگاههای نوری برای بزرگ‌کردن قطرظاهری اجسام بکار می‌رود . هرچه دستگاه نوری قطر ظاهری جسم را بزرگترکند قویتر است . فرض کنیم که جسم کوچك AB را در حد اقل رؤیت چشم قرار داده‌ایم (بهترین وضعیت از لحاظ قطر ظاهری) . این

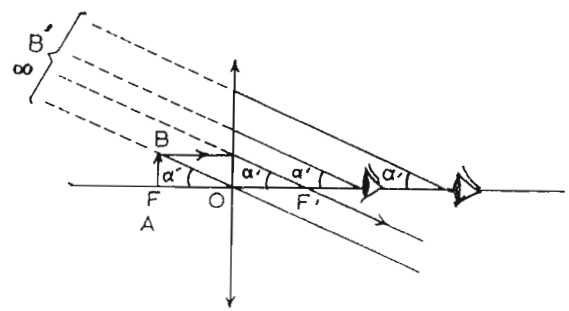
جسم تحت زاویهٔ α رؤیت خواهد شد (شکل I-۱۴۶) . همین جسم از پشت دستگاه ، مثلاً ذره‌بین ، تحت زاویهٔ α' رؤیت می‌شود که خیلی از α بزرگتر است (شکل II-۱۴۶) .



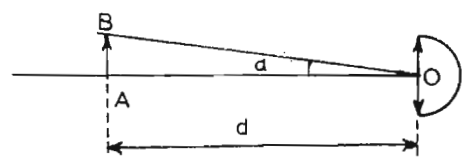
شکل ۱۴۶

بنا بر تعریف ، **نسبت** $G=\frac{\alpha'}{\alpha}$ **را درشتنمایی دستگاه می‌نامیم .**

محاسبهٔ درشتنمایی ـ می‌دانیم که ، برای آنکه چشم بدون خستگی بتواند با وسایل نوری اجسام ریز را مشاهده کند ، باید تصویر جسم در بینهایت و بنا براین جسم در کانون ذره بین قرار گیرد . اکنون برای محاسبهٔ درشتنمایی ، مقدار α' را از مثلث ABO (شکل ۱۴۷)



شکل ۱۴۷



شکل ۱۴۸

و مقدار α را از مثلث ABO (شکل ۱۴۸) حساب می‌کنیم :

$$tg\alpha' = \frac{AB}{f} \quad و \quad tg\alpha = \frac{AB}{d}$$

ذره‌بین را معمولاً برای دیدن اجسامی با ابعادکوچکتر ازمیلیمتر بکار می‌برند . یعنی AB معمولاً کمتر از یك میلیمتراست ، وحال آنکه d و f بیشتر از یك سانتیمتر است . بنابراین $\frac{AB}{f}$ و $\frac{AB}{d}$ یعنی $tg\alpha'$ و $tg\alpha$ بسیار کوچك است و می‌توان به جای آنها خود α' و α را برحسب رادیان قرار داد :

$$\alpha' = \frac{AB}{f} \quad و \quad \alpha = \frac{AB}{d}$$

از تقسیم این دو رابطه بر یکدیگر خواهیم داشت :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\frac{AB}{f}}{\frac{AB}{d}}$$

یا

$$\boxed{G = \frac{d}{f}}$$

d حداقل فاصلهٔ رؤیت و f فاصلهٔ کانونی ذره‌بین است .

مثال ـ فاصلهٔ کانونی یك ذره‌بین ۲cm و حداقل فاصلهٔ رؤیت ناظر ۲۰cm است . درشتنمایی ذره‌بین چقدر است ؟

$G = \frac{d}{f} = \frac{۲۰}{۲} = ۱۰$ یعنی این ذره‌بین قطرظاهری یك جسم کوچك را ۱۰ بار بزرگتر نشان می‌دهد .

توان دستگاه ـ آنچه در ذره‌بین یا هردستگاه دیگر اهمیت‌دارد مقدار درشتنمایی است‌که نشان می‌دهدکه یك دستگاه تا چه حد می‌تواند

قطر ظاهری جسم را بزرگ کند و آن را درشت‌تر نشان دهد ، لیکن در وسایل نوری کمیت دیگری به نام **توان دستگاه** نیز گاهی مورد استعمال پیدا می‌کند .

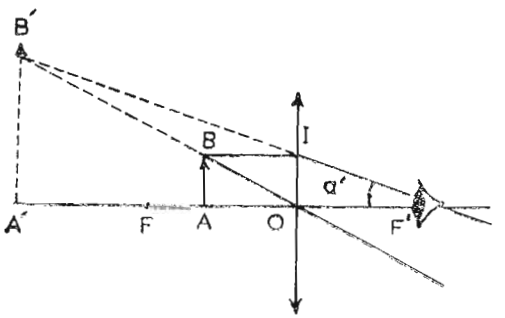
تعریف توان ـ هرگاه جسمی به طول AB با ذره‌بین یا هر اسباب دیگر تحت زاویهٔ α' دیده شود نسبت $\boxed{P=\frac{\alpha'}{AB}}$ را توان آن دستگاه می‌نامند . از رابطهٔ فوق معلوم است که توان دستگاه مساوی زاویه‌ای است که واحد طول ، تحت آن زاویه ، با اسباب دیده می‌شود ($AB=۱$ و $P=\alpha'$) .

محاسبهٔ توان ذره‌بین ـ معمولاً در ذره‌بین جسم را بسیار نزدیک کانون می‌گذارند بطوری که می‌توان فاصلهٔ آن را تا عدسی تقریباً مساوی فاصلهٔ کانونی گرفت . در این صورت چشم ناظر هر جا باشد تصویر را تحت زاویهٔ ثابت α' مشاهده می‌کند (شکل ۱۴۷) بطوری که :

$$\alpha'=\frac{AB}{f}$$

وچون این مقدار را در رابطهٔ توان ببریم خواهیم داشت :

$$P=\frac{\alpha'}{AB}=\frac{AB}{f\times AB}=\frac{۱}{f}$$ یعنی : $\boxed{P=\frac{۱}{f}}$



شکل ۱۴۹

لیکن هرگاه جسم نزدیک به‌کانون نباشد (شکل ۱۴۹) ، مقدار α' بستگی به وضع چشم خواهد داشت . اکنون فرض

کنیم که چشم درکانون تصویر ذره‌بین باشد. درمثلث IOF′ :

$$tg\alpha'=\frac{OI}{OF'}$$

ولی $OI=AB$ و $OF'=f$ ، پس $tg\alpha'\neq\alpha'=\frac{AB}{f}$

با محاسبه‌ای نظیر حالت پیش خواهیم داشت :

$$P=\frac{\alpha'}{AB}=\frac{AB}{f\times AB}$$

یا $\boxed{P=\frac{۱}{f}}$

بنابراین **اگر جسم درکانون شیء یا چشم درکانون تصویر** باشد، توان ذره‌بین مساوی $\frac{۱}{f}$ است .

در حالتهای دیگر که جسم درکانون شیء یا چشم در کانون تصویر نباشد ، مقدار توان چندان تفاوتی با مقدار $P=\frac{۱}{f}$ ندارد .

واحد توان ـ محاسبهٔ پیش نشان می‌دهد که توان ذره‌بین مساوی همگرایی آن ($P=\frac{۱}{f}$) وبنابراین واحد آن هم دیوپتری است .

$$P=\frac{۱}{f}\leftarrow \text{متر}\quad\quad \rightarrow \text{دیوپتری}$$

محاسبهٔ درشتنمایی بااستفاده ازفرمول توان ـ برای محاسبهٔ درشتنمایی $G=\frac{\alpha'}{\alpha}$ مقدار α' را از فرمول توان $P=\frac{\alpha'}{AB}$ حساب می‌کنیم .

$$\alpha'=P\times AB$$

درمثلث AOB (شکل ۱۴۸) $\alpha = \frac{AB}{d}$ و چون α' را بر α تقسیم کنیم خواهیم داشت :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{P \times AB}{\frac{AB}{d}} \quad \text{یا} \quad \boxed{G = P \times d}$$

و چون $P = \frac{1}{f}$ ، $\boxed{G = \frac{1}{f} \times d = \frac{d}{f}}$

این فرمول همان فرمولی است که مستقیماً بدست آورده‌ایم .

مثال ـ فاصلهٔ کانونی یك ذره‌بین ۴cm است . توان و درشتنمایی ان را برای ناظری‌که حداقل رؤیتش ۲۰cm است حساب کنید :

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{0/04} = ۲۵ \text{ دیوپتری}$$

درشتنمایی را می‌توان ازفرمول $G = P \times d$ یا $G = \frac{d}{f}$ بدست آورد .

$$G = P.d = ۲۵ \times 0/20 = ۵ \quad \text{یا} \quad G = \frac{d}{f} = \frac{20}{4} = ۵$$

باید متوجه بود که در محاسبهٔ G از روی P.d ، چون P بر حسب دیوپتری است ، d باید برحسب متر نوشته شود .

درشتنمایی تجارتی ـ نظر به اینکه d ، حداقل فاصلهٔ رؤیت ، در همهٔ چشمها یکی نیست ، برای مشخص کردن دستگاههای نوری ، سازندگان این وسایل مقدار d را بطور متوسط ۲۵cm اختیار کرده‌اند. با این فرض درشتنمایی ذره‌بین ،کدآن را **درشتنمایی تجارتی** می‌نامند و با G_c نشان می‌دهند ، برابر است با :

$$G_c = P.d = P \times 0/25 \quad \text{یا} \quad \boxed{G_c = \frac{P}{4}}$$

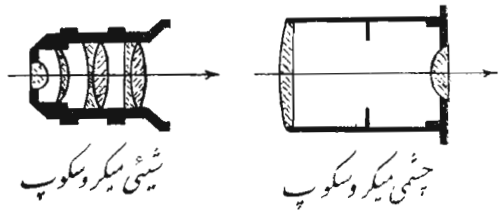
G_c را می‌توان بدین صورت نیزکه بیشتر معمول است نمایش داد

$$G_c = \frac{d}{f} \qquad : (d = ۲۵\text{cm})$$

پس $\boxed{G_c = \frac{25}{f}} \rightarrow \text{cm}$

میکروسکوپ

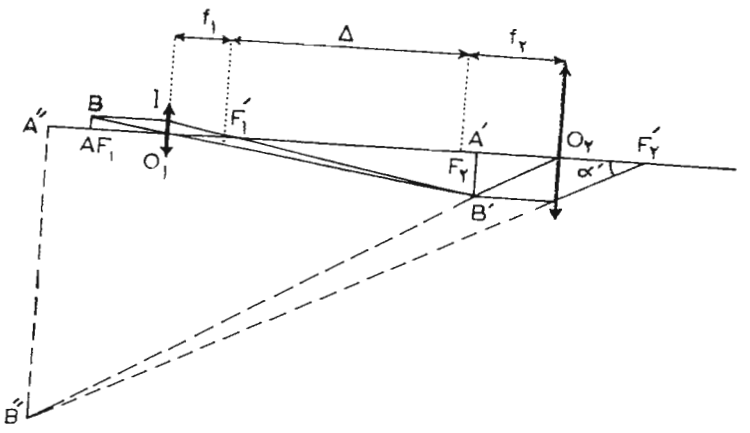
میکروسکوپ برای دیدن اجسام بسیار ریزی بکار می‌رودکه قطر ظاهری‌آنها خیلی کوچکتر از قدرت تفکیك چشم است . این اسباب از دو دستگاه عدسی تشکیل یافته است : یکی به نام **شیئی** یا **ابژکتیف**[1] که فاصلهٔ کانونیش درحدود چند میلیمتر است و دیگری به نام **چشمی** یا **اکولر**[2] که فاصلهٔ کانونی آن درحدود سانتیمتر است ومانند یك ذره‌بین قوی کار می‌کند(شکل۱۵۰).



شکل ۱۵۰

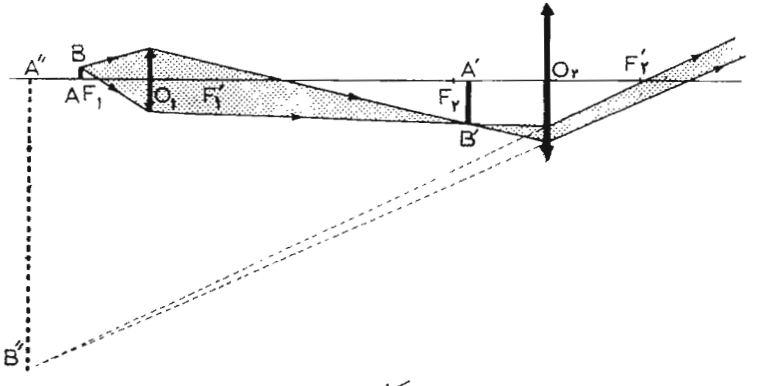
طرز تشکیل تصویر درمیکروسکوپ ـ جسم کوچك AB جایی است‌که شیئی ازآن تصویرحقیقی و بزرگی مانند $A'B'$ می‌دهد. چشمی چنان قرار دارد که این تصویر حقیقی در فاصلهٔ کانونی آن می‌افتد . در نتیجه این عدسی مانند یك ذره‌بین قوی از $A'B'$ تصویر بزرگتر ومجازی $A''B''$ را می‌دهدکه نسبت به‌جسم معکوس است (شکل۱۵۱) . چنانکه از شکل پیداست جسم ریز AB باید خیلی نزدیك به‌کانون دستگاه شیئی

۱- Objectif ۲- Oculaire



شکل ۱۵۱

(نرسیده به آن) باشد . شکل ۱۵۲ مسیر یك دسته اشعهٔ نورانی را که از **B** تابیده شده است نشان می‌دهد .



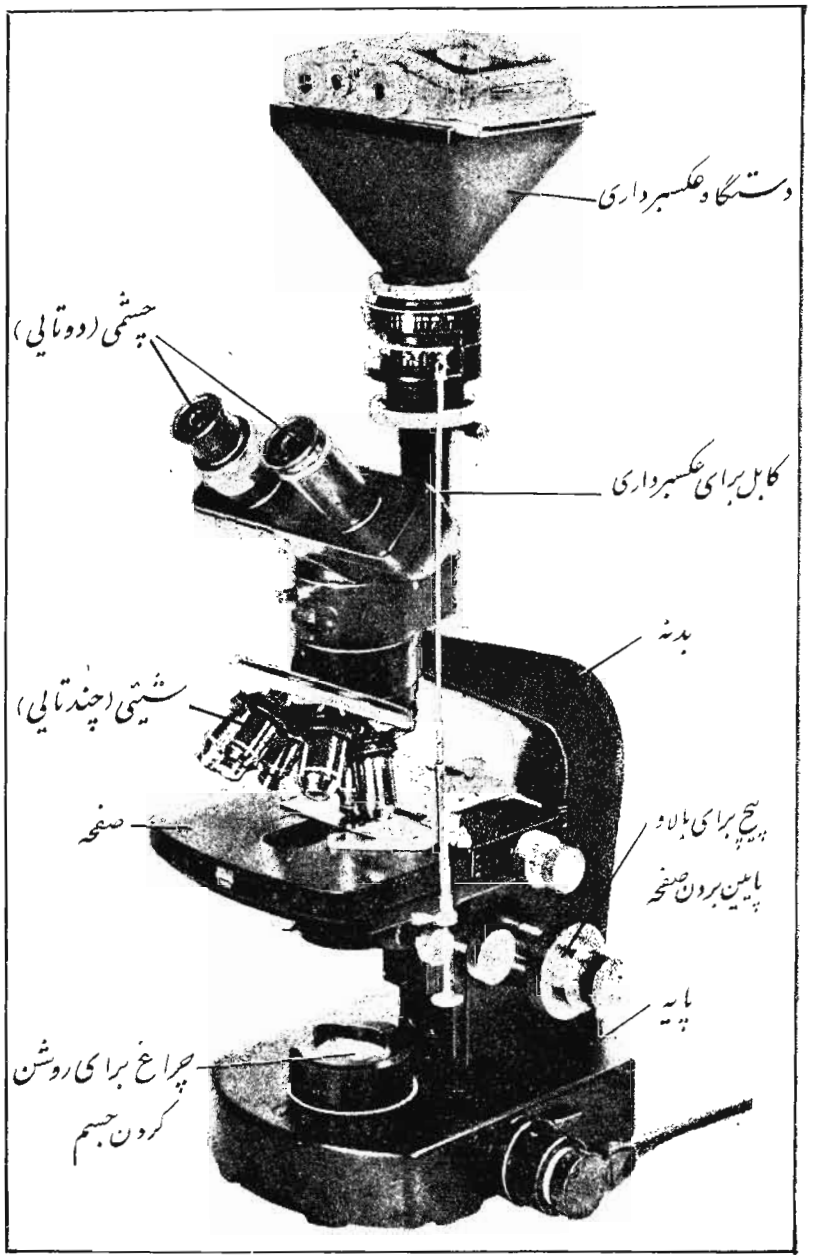
شکل ۱۵۲

میزان کردن میکروسکوپ ـ برای اینکه شخص بتواند بدون خستگی مدتی تصویر را مشاهده‌کند میکروسکوپ راچنان تنظیم می‌کنند

که‌آخرین تصویر **A″B″** در بینهایت تشکیل شود . در این صورت لازم است که اولین تصویر **A′B′** در سطح کانونی چشمی بیفتد . لیکن اگر ناظر بخواهد تصویر را در حداقل رؤیت خودکه مثلاً ۲۵ سانتیمتر است بیاورد ، باید اولین تصویر در فاصلهٔ کانونی چشمی تشکیل شود ، و چون وضع دوعدسی میکروسکوپ یعنی شیئی وچشمی نسبت به‌هم ثابت است ، باید جسم را به شیئی نزدیك نمود تا تصویر آن یعنی **A′B′** از $F_۲$ عقب‌تر برود (شکل۱۵۱) .

این فاصله را که جسم به شیئی نزدیك می‌شود دامنهٔ تنظیم میکروسکوپ می‌نامند . هرگاه جسم درطول این فاصله تغییر محل بدهد، ناظر می‌تواند تصویرآن را در میکروسکوپ واضح ببیند . لیکن چون این فاصله چند میکرون بیش نیست ، حرکات بسیارکوچك لولهٔ میکروسکوپ تصویر را از واضح بودن خارج می‌کند . به‌همین سبب است که در میکروسکوپ پیچی به‌نام **پیچ میکرومتری** تعبیه‌کرده‌اند که به‌توسط آن بتوان لولهٔ میکروسکوپ را به‌میزان‌بسیارکمی (درحدود یك میکرون) جابجاکرد.

شرح اسباب ـ در میکروسکوپ شیئی و چشمی در دو انتهای لوله‌ای ثابت شده‌اند . طول لولهٔ میکروسکوپ‌که از مرکزشیئی تا مرکز چشمی حساب می‌شود ، در حدود ۲۰cm است . لولهٔ میکروسکوپ به بدنهٔ آن سوار شده است ، و این بدنه بر روی پایهٔ سنگین و ثابتی قرار دارد . لولهٔ میکروسکوپ را می‌توان به وسیلهٔ دو پیچ بالا و پایین برد. با یکی از پیچها با حرکت سریع تصویر را پیدا می‌کنند و با دیگری‌که حرکات بسیار ریز دارد ، تصویر را کاملاً دقیق و واضح می‌سازند . این پیچ را پیچ میکرومتری می‌نامند. درشکل۱۵۳میکروسکوپی نشان داده



شکل ۱۵۳ - در این میکروسکوپ مدرن یك دستگاه عکسبرداری نیز ممکن است بر دهانهٔ میکروسکوپ سوار شود تا از تصویر اجسام عکس بردارد.

شده است که دارای دو چشمی و چند شیئی است .

جسم را بر روی یك تیغهٔ شیشه‌ای ثابت می‌کنند و تیغه را بر روی صفحهٔ سوراخ داری ، که درمقابل شیئی نصب شده است ، قرار می‌دهند. برای روشن کردن جسم ، در زیر این صفحه آینهٔ مقعری وصل است که می‌تواند نور یك چراغ را بر روی جسم متمرکز کند . لیکن در غالب میکروسکوپها ، نور این آینه از یك دستگاه عدسی به نام **کندانسور** یا **گردآور نور** عبور می‌کند و بر روی جسم می‌تابد . کندانسور اشعهٔ نور چراغ را بر روی جسم متمرکز می‌سازد و درنتیجه جسم کاملاً روشن می‌شود. آشکاراست که هرچه‌جسم روشن‌تر باشد تصویر روشن‌تر خواهدبود.

توان میکروسکوپ ـ همانطور که در ذره‌بین اشاره شد ، در میکروسکوپ نیز توان عبارت است از $P=\frac{\alpha'}{AB}$

AB طول‌جسم به‌حسب متر، α' قطرظاهری تصویر به‌حسب رادیان و P توان میکروسکوپ به‌حسب دیوپتری است .

محاسبهٔ توان ـ شیئی میکروسکوپ از جسم AB تصویرحقیقی $A'B'$ را ایجاد می‌کند و بزرگنمایی آن $\gamma_1=\frac{A'B'}{AB}$ (۱)

کار چشمی‌دراین دستگاه کار یك ذره‌بین است و از $A'B'$ تصویر بزرگی می‌دهدکه تحت زاویهٔ α' دیده می‌شود . اگر توان این عدسی P_2 باشد .

$$P_2=\frac{\alpha'}{A'B'} \quad (۲)$$

اکنون اگر در فرمول توان $P=\frac{\alpha'}{AB}$ صورت و مخرج را در $A'B'$ ضرب کنیم خواهیم داشت :

$$P=\frac{\alpha'}{AB}=\frac{\alpha'}{A'B'}\times\frac{A'B'}{AB}$$

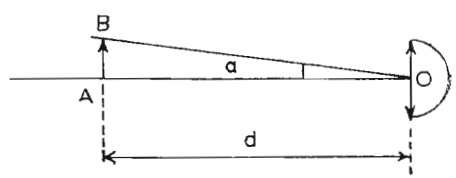
با توجه به روابط (۱) و (۲) نتیجه می‌شودکه : $\boxed{P=\gamma_1\times P_2}$

یعنی توان میکروسکوپ مساوی است با بزرگنمایی شیئی درتوان چشمی.

درشتنمایی ـ درمیکروسکوپ نیز نسبت $G=\frac{\alpha'}{\alpha}$ را درشتنمایی دستگاه می‌نامند . α' عبارت از قطرظاهری تصویر و α قطر ظاهری جسم در حداقل فاصلهٔ رؤیت چشم است .

محاسبهٔ درشتنمایی ـ از فرمول توان $\left(P=\frac{\alpha'}{AB}\right)$ مقدار α' را بدست می‌آوریم : $\alpha'=P\times AB$.

از طرف دیگر می‌دانیم که اگر جسم AB به فاصلهٔ d ، یعنی حداقل فاصلهٔ رؤیت ناظر باشد(شکل۱۵۴) قطرظاهری آن‌مساوی است با :



شکل ۱۵۴

$$\boxed{\alpha=\frac{AB}{d}}$$

از تقسیم α' بر α خواهیم داشت :

$$G=\frac{\alpha'}{\alpha}=\frac{P\times AB}{\frac{AB}{d}}$$

$\boxed{G=P\times d}$ یا متر

↓ دیوپتری

اگر $d=25cm$ فرض شود درشتنمایی تجارتی میکروسکوپ بدست می‌آید :

$$\boxed{G_c=\frac{P}{4}} \quad \text{یا} \quad G_c=P\times 0/25$$

صورت دیگر فرمول درشتنمایی ـ اگر در فرمول درشتنمایی به‌جای P مقدارش را از $P=\gamma_1\times P_2$ قرار دهیم :

$$G=P\times d=\gamma_1\times P_2\times d$$

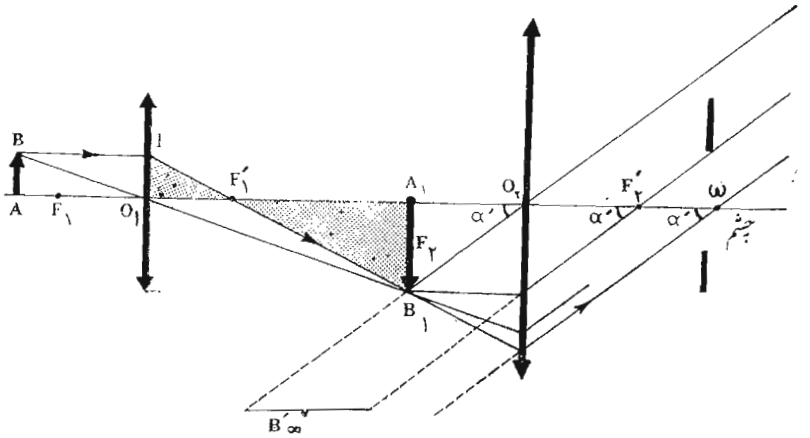
لیکن حاصلضرب $P_2\times d$ مساوی درشتنمایی چشمی است که اگر آن را با G_2 نمایش دهیم خواهیم داشت :

$$\boxed{G=\gamma_1\times G_2}$$

یعنی **درشتنمایی میکروسکوپ مساوی است با بزرگنمایی شیئی در درشتنمایی چشمی** . غالباً در میکروسکوپها بزرگنمایی شیئی و درشتنمایی چشمی را بر روی هر یك از آنها می‌نویسند . برای بدست آوردن درشتنمایی میکروسکوپ کافی است‌که این دو عدد را در هم ضرب‌کرد .

محاسبهٔ درشتنمایی میکروسکوپ بطورمستقیم ـ چون غالباً چشم سالم آخرین تصویر را در بینهایت دور می‌اندازد ، می‌توان α' را مطابق شکل ۱۵۵ از مثلث $A_1B_1O_2$ بدست آورد : $\alpha'=\frac{A_1B_1}{f_2}$ ، و چون α' را بر $\alpha=\frac{AB}{d}$ (شکل ۱۵۵) تقسیم کنیم :

$$\boxed{G=\frac{A_1B_1}{AB}\times\frac{d}{f_2}} \quad \text{یا} \quad \frac{\alpha'}{\alpha}=\frac{A_1B_1\times d}{f_2\times AB}$$



شکل ۱۵۵ ـ اگر اولین تصویر حقیقی در سطح کانونی چشمی بیفتد ، آخرین تصویر در ∞ خواهد بود .

لیکن می‌دانیم که $\gamma_1 = \frac{A_1B_1}{AB}$ بزرگنمایی شیئی و $\frac{d}{f_2}$ همان درشتنمایی چشمی است . بنا بر این :

$$G = \gamma_1 \times G_2$$

مثال ۱ ـ فاصله‌های کانونی شیئی و چشمی یك میکروسکوپ بترتیب ۵mm و ۲cm است . جسم کوچك AB به فاصلهٔ ۵/۱mm از شیئی میکروسکوپ قرار دادد و ناظر آخرین تصویر را درحداقل فاصلهٔ رؤیت خود یعنی در۲۲ سانتیمتری چشم می‌بیند . چشم درکانون تصویر چشمی است. توان و درشتنمایی و طول لولهٔ میکروسکوپ را حساب‌کنید .

حل ـ برای محاسبهٔ γ_1 باید جای اولین تصویر را حساب کرد :

$$\frac{1}{5/1} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{5} \quad \text{و از آنجا} \quad x' = 255\text{mm}$$

$$\text{پس} \quad \gamma_1 = \frac{A'B'}{AB} = \frac{x'}{x} = \frac{255}{5/1} = 50 \quad \text{(شکل ۱۵۱)}$$

اما چون توان هرعدسی مساوی $\frac{1}{f}$ است :

$$P_2 = \frac{1}{f_2} = \frac{1}{0/02} = 50 \text{ دیوپتری} \quad \text{(توان چشمی)}$$

و توان‌کل میکروسکوپ مساوی است با :

$$P = \gamma_1 \times P_2 = 50 \times 50 = 2500 \text{ دیوپتری}$$

درشتنمایی آن مساوی است با :

$$G = P \times d = 2500 \times 0/22 = 550$$

برای محاسبهٔ طول لولهٔ میکروسکوپ فاصلهٔ اولین تصویر A'B' را از چشمی حساب می‌کنیم . چون تصویر آخری در ۲۲ سانتیمتری چشم است، فاصله‌اش ازچشمی ۲۰cm می‌شود وچون آخرین تصویر مجازی است خواهیم داشت :

$$\frac{1}{x} - \frac{1}{20} = \frac{1}{2} \quad \text{و} \quad x = 1/81\text{cm}$$

و l طول لولهٔ میکروسکوپ ، یعنی فاصلهٔ دو عدسی آن :

$$l = 25/5 + 1/81 = 27/31\text{cm}$$

مثال ۲ ـ تعیین کنید با میکروسکوپ مسئلهٔ فوق ، یك گلبول قرمز به‌قطر ۵ میکرون تحت چه زاویه‌ای دیده می‌شود درصورتی‌که d = 22cm .

حل ـ قطر ظاهری گلبول بدون اسباب مساوی است با :

$$\alpha = \frac{5}{220000}$$

. چون درشتنمایی ۵۵۰ است ، خواهیم داشت

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = 550 \quad \text{و از آنجا : رادیان} \quad \alpha' = 550\alpha = \frac{5 \times 550}{220000} = \frac{1}{80}$$

یا

$$\alpha' \neq 43'$$

دوربینها

دوربین را برای دیدن اجسام دور بکار می‌برند . اجسامی که در فواصل دور قرار دارند ، مانند خورشید یا ماه یا دیگر ستارگان ، با اینکه ابعاد آنها بزرگ است ، به‌سبب بُعد مسافت قطرظاهریشان‌کوچك است . مثلاً قطر ظاهری خورشید ، با آن عظمت، در حدود $\frac{1}{100}$ رادیان

یا تقریباً نیم‌درجه است و این زاویه برای تشخیص جزئیات خورشید بهیچ‌وجه کافی نیست .

ساختمانی‌که مثلاً به ارتفاع ده متر است از فاصلهٔ یك کیلومتری تحت زاویهٔ $\alpha = \frac{۱}{۱۰۰}$ رادیان $(\alpha = \frac{۱۰}{۱۰۰۰} = \frac{۱}{۱۰۰})$ دیده می‌شود . البته ازاین فاصله جزئیات ساختمان را نمی‌توان تشخیص داد. درمورد ستارگان، که دارای قطرظاهری بسیارکوچك وتقریباً مانند نقطهٔ درخشانی هستند، دوربینها چندان تأثیری در بزرگ‌کردن قطر ظاهریشان ندارد ، اما در عوض تصویر را بمراتب روشن‌تر از خود جسم نشان می‌دهند .

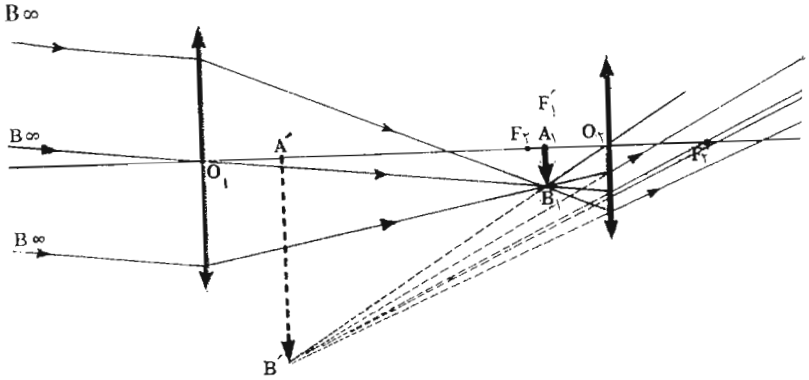
دوربینها بردوقسمند: آنهایی‌که برای رصدکردن ستارگان وکرات آسمانی بکارمی‌روند (دوربینهای نجومی یا تلسکوپ) ، وآنهایی‌که برای دیدن مناظر زمین بکار می‌روندکه دوربینهای زمینی نام دارند .

۱ ـ دوربین نجومی

دوربین نجومی دارای دو دستگاه عدسی همگراست . یکی شیئی است که در مقابل ستارگان قرار می‌گیرد و فاصلهٔ کانونیش در حدود متر است ، دیگری چشمی‌که چشم جلو آن قرار می‌گیرد و فاصلهٔ کانونیش در حدود چند سانتیمتر است وکار یك ذره‌بین قوی را می‌کند .

طرز تشکیل تصویر در دوربین نجومی ـ اشعهٔ نور از کنارهٔ بالایی جسم بینهایت دورتحت زاویهٔ α (قطرظاهری جسم) بشیئی می‌تابد (شکل۱۵۶) . این عدسی یك تصویرحقیقی وبزرگ ازجسم درسطح کانونی خود می‌اندازد. ناظرجای **چشمی** را بوسیلهٔ پیچ مخصوصی‌که در دوربین تعبیه شده است ، چنان تنظیم می‌کند که این تصویر حقیقی در کانون آن

یا بسیار نزدیك به‌آن قرارگیرد. در شکل ۱۵۶ چشمی مانند یك ذره‌بین تصویر مجازی و بزرگی از جسم در $A'B'$ داده است که تحت زاویهٔ α



شکل ۱۵۶

دیده می‌شود . این تصویر نهایی نسبت به‌جسم معکوس است ، لیکن این امر اشکالی در مطالعهٔ ستارگان ایجاد نمی‌کند .

میزان‌کردن دوربین ـ برای‌آنکه آخرین تصویرواضح و راحت دیده شود ، ناظر معمولاً آن را در بینهایت می‌اندازد. برای این منظور آنقدر جای چشمی را تغییر می‌دهد تا اولین تصویر درسطح کانونی چشمی قرارگیرد . بطورکلی هر ناظری آخرین تصویر را در حداکثر فاصلهٔ رؤیت خود تشکیل می‌دهد .

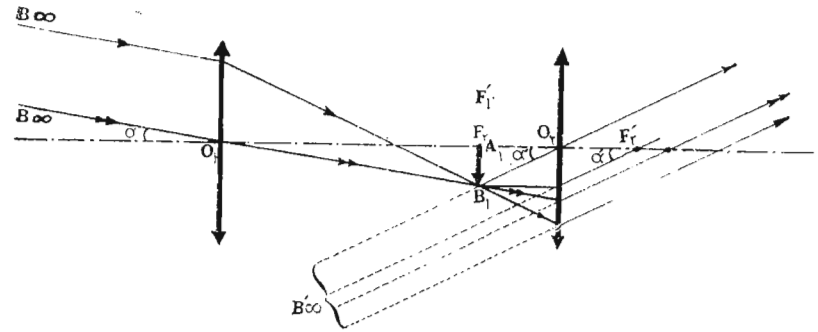
درشتنمایی دوربین ـ در دوربین نیز نسبت $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$ را درشت‌نمایی دوربین می‌نامند . α قطرظاهری جسم بدون دوربین و α' قطرظاهری تصویر آن است .

محاسبهٔ درشتنمایی ـ گفتیم که برای آنکه چشم سالم بتواند بدون خستگی نگاه کند ، تصویر باید در بینهایت تشکیل شود (شکل

۱۵۷) . در این حالت زاویهٔ α' را از مثلث $A_1B_1O_2$ و α را از مثلث $A_1B_1O_1$ بدست می‌آوریم . اگر فاصلهٔ کانونی شیئی f_2 فرض شود :

$$\alpha=\frac{A_1B_1}{f_1} \qquad \alpha'=\frac{A_1B_1}{f_2}$$

$$\boxed{G=\frac{f_1}{f_2}} \quad \text{پس} \quad G=\frac{\alpha'}{\alpha}=\frac{f_1}{f_2}\cdot\frac{A_1B_1}{A_1B_1}$$



شکل ۱۵۷

پس در دوربینها ، هرچه فاصلهٔ کانونی شیئی زیادتر و ازآن چشمی کمتر باشد ، درشتنمایی دستگاه بیشتر است . ضمناً برای آنکه نور زیادتری از یك ستاره در دستگاه وارد شود باید حتی‌المقدور **قطر دهانهٔ شیئی بزرگ باشد** . به علت معایبی که عدسیهای بزرگ دارند ، امروز در تلسکوپهای بزرگ ، به‌جای شیئی ، یك آینهٔ مقعر سهمی‌گون بکار می‌برند که دهانهٔ آن بزرگ است ولی معایبی را که در عدسیها و آینهٔ کروی گفتیم ندارد .

یادآوری ـ توان دوربینها تقریباً مساوی صفر است زیرا **AB** ، که عبارت از طول جسم بینهایت دور است ، بسیار بزرگ است و بالعکس

α' قطر ظاهری تصویر مقدارکوچکی است و از این‌رو نسبت $P=\frac{\alpha'}{AB}$ تقریباً صفر است .

مثال ـ فاصلهٔ کانونی شیئی و چشمی یك دوربین بترتیب ۱۲۰cm و ۴cm است . اولاً درشتنمایی این دوربین چقدر است (تصویر در بینهایت است) ؟ ثانیاً اگر این دوربین متوجه خورشید باشد ناظر خورشید را تحت چه زاویه‌ای می‌بیند؟ (قطرظاهری خورشید $\frac{1}{100}$ رادیان) .

حل ـ اولاً ـ درشتنمایی مساوی است با :

$$G=\frac{f_1}{f_2}=\frac{120}{4}=30$$

ثانیاً ـ α' از رابطهٔ $G=\frac{\alpha'}{\alpha}=30$ محاسبه می‌شود :

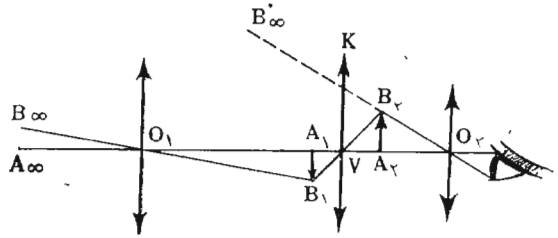
$$\alpha'=30\times\frac{1}{100}=\frac{3}{10}\text{ رادیان}=\frac{3}{10\times 2\pi}\times 360=17^\circ$$

معمولاً می‌گویند که **این دوربین ۳۰ مرتبه نزدیك می‌کند** ، چه قطر ظاهری را ۳۰ مرتبه بزرگ کرده است ($\alpha'=30\alpha$) .

۲ـ دوربینهای زمینی

نظر به اینکه دوربینهای زمینی برای مطالعه یا تماشای مناظر زمینی است ، باید آخرین تصویرمستقیم باشد. برای مستقیم‌کردن تصویر آخری راههای مختلف بکار برده‌اند :

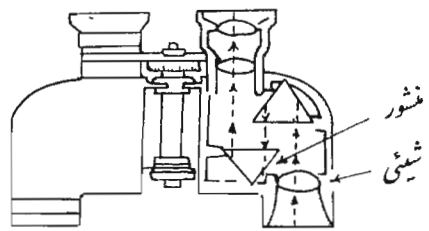
الف ـ **قرار دادن یك عدسی کمکی** ـ در این طریقه یك عدسی همگرا (K) بین A_1B_1 (اولین تصویر) و چشمی چنان قرار می‌دهند که



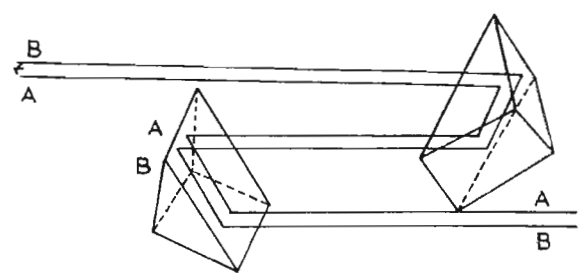
شکل ۱۵۸

از A_1B_1 تصویر معکوس A_2B_2 را درفاصلهٔ کانونی چشمی تشکیل دهد (شکل ۱۵۸). این تصویر یعنی A_2B_2 نسبت به جسم مستقیم است و بنابراین آخرین تصویر هم مستقیم خواهد بود.

ب ـ **دوربینهای منشوری** ـ دراین دوربینها بین شیئی و چشمی یك جفت منشور با انعکاس کلی چنان می‌گذارند که یالهای آنها بر هم عمود باشد. جفت منشورها تصویر معکوس را که از شیئی بدست می‌آید مستقیم می‌کند وآن را در فاصلهٔ کانونی چشمی می‌اندازد (شکلهای ۱۵۹ و ۱۶۰).



شکل ۱۵۹

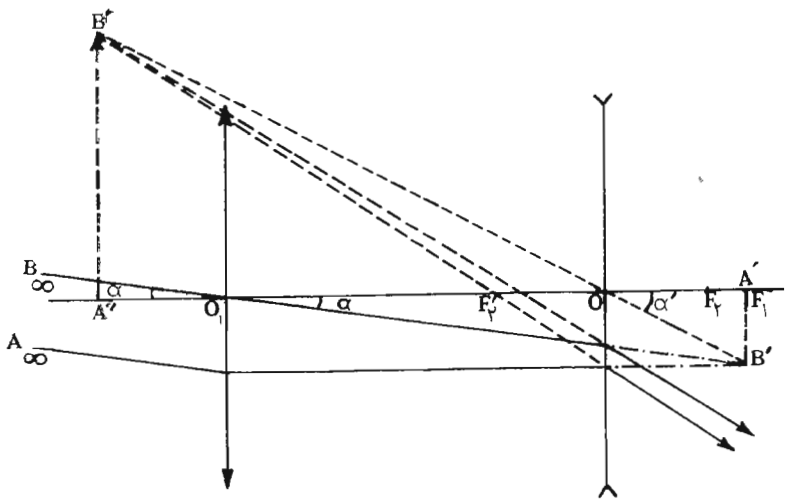


شکل ۱۶۰ ـ یکی از منشورها تصویر را از راست به چپ و دیگری آن را از بالا به پایین بر می‌گرداند و در نتیجه یك تصویر مستقیم در فاصلهٔ کانونی چشمی تشکیل می‌شود

ج ـ **دوربین گالیله** ـ گالیله دانشمند معروف ایتالیایی که اولین دوربین را، با استفاده از عدسیهای ساده، ساخته است برای مستقیم‌کردن تصویر به‌جای عدسی همگرای چشمی یك عدسی واگرا کارگذاشت. این

دوربین‌که به‌نام خود او معروف است اکنون هم مورد استعمال زیاد دارد.

طرز تشکیل تصویر در دوربین گالیله ـ شیئی این دوربین، که مانند سایر دوربینها عبارت از یك عدسی همگراست، تصویر اجسام دور را در سطح کانونی خود ($A'B'$) می‌اندازد. چشمی آن، که یك عدسی واگراست، جلو این تصویر را می‌گیرد، بطوری‌که این تصویر برای این



شکل ۱۶۱

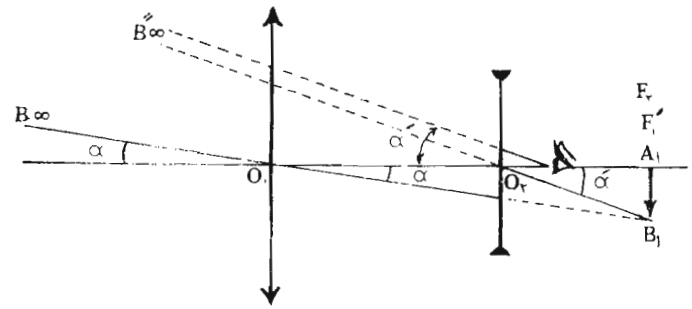
عدسی جسمی مجازی و خارج از فاصلهٔ کانونی‌آن می‌شود (شکل ۱۶۱).

در این صورت می‌دانیم که آخرین تصویر مجازی و نسبت به‌اولین تصویر یعنی $A'B'$ معکوس و نسبت به‌خود جسم مستقیم خواهد بود.

محاسبهٔ درشتنمایی دوربین ـ در این دستگاه نیز ناظر آخرین تصویر را در بینهایت یعنی در حداکثر رؤیت خود می‌اندازد تا بتواند بدون خستگی منظره‌ای را تماشا کند (شکل ۱۶۲).

برای محاسبهٔ نسبت $G=\frac{\alpha'}{\alpha}$ ، مقادیر α' و α را از مثلثهای $O_2A_1B_1$ و $O_1A_1B_1$ بدست می‌آوریم و بر هم تقسیم می‌کنیم (فواصل کانونی شیئی وچشمی بترتیب f_1 و f_2 فرض می‌شود). درمثلث $O_2A_1B_1$، چون A_1B_1 درسطح کانونی چشمی است ، $\alpha'=\frac{A_1B_1}{f_2}$ و در مثلث دوم

$$G=\frac{\alpha'}{\alpha}=\frac{\frac{A_1B_1}{f_2}}{\frac{A_1B_1}{f_1}} \quad \text{و از آنجا} \quad \alpha=\frac{A_1B_1}{f_1}$$



شکل ۱۶۲

پس :

$$G=\frac{f_1}{f_2}$$

بنا بر این در دوربین گالیله نیز درشتنمایی مساوی است با نسبت فاصلهٔ کانونی **شیئی** به فاصلهٔ کانونی چشمی .

یادآوری ـ می‌توان درشتنمایی دوربینها را بطورکلی از این راه نیز محاسبه کرد : شیئی تصویر $A'B'$ را درسطح کانونی خود می‌اندازد؛

بنا بر این $\alpha=\frac{A_1B_1}{f_1}$ (شکل ۱۶۱) . چشمی این تصویررا تحت زاویهٔ α' نشان می‌دهد . اگر توان آن P_2 باشد $\left(P_2=\frac{\alpha'}{A'B'}\right)$ مقدار α' چنین خواهد شد :

$$\alpha'=P_2\times A'B'$$

از تقسیم α' بد α خواهیم داشت : $G=\frac{\alpha'}{\alpha}=\frac{P_2\times A'B'}{\frac{A'B'}{f_1}}$

$$G=P_2\times f_1 \longrightarrow \text{متر}$$

$$\downarrow$$

دیوپتری

یعنی درشتنمایی دوربینها مساوی است با **حاصلضرب فاصلهٔ کانونی شیئی در توان چشمی** . درحالت خاص که توان چشمی $P_2=\frac{1}{f_2}$ باشد خواهیم داشت :

$$G=P_2\times f_1=\frac{1}{f_2}\times f_1=\frac{f_1}{f_2}$$

این همان فرمولی است که مستقیما بدست آوردیم .

یادآوری ـ در حالت دیگری که آخرین تصویر در بینهایت تشکیل نشود درشتنمایی دستگاه چندان تفاوتی با مقدار فوق ندارد .

پروژکتور و سینما

برای تهیهٔ فیلمهای سینما ، به توسط یك دستگاه عکاسی از مناظر یا اشیا و اشخاص متحرك عکسهای متوالی بر می‌دارند . بدین طریق که فیلم حساس بوسیلهٔ دستگاه مخصوصی با جهشهای منظم در مقابل عدسی دوربین قرار می‌گیرد . **هنگامی که فیلم در حرکت است دریچهٔ عدسی بسته**

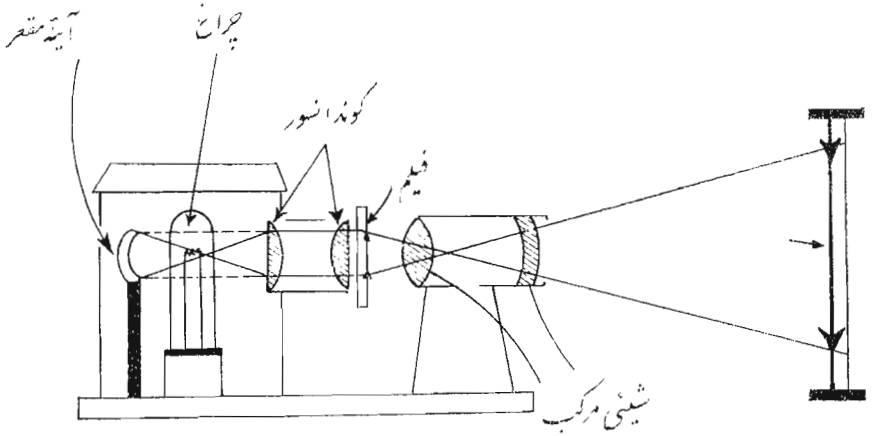
می‌شود وفقط هنگامی باز است‌که فیلم بیحرکت و آمادهٔ عکسبرداری است . بنابراین فیلم یك حرکت دائمی و یکنواخت ندارد ، بلکه زمانی ساکن و زمانی درحرکت است و دریچهٔ دوربین فقط در لحظاتی باز می‌شود که فیلم ساکن است . حرکت فیلم چنان است‌که در هر ثانیه درحدود شانزده عکس گرفته می‌شود . ضمناً فیلم از یك حلقه باز می‌شود و به دور حلقهٔ دیگر می‌پیچد . بنا براین از یك حرکت یا یك واقعه که مثلاً نیم ثانیه طول بکشد قریب ۸ عکس متوالی از اوضاع مختلف حرکت یا واقعه برداشته می‌شود .

فیلمهایی‌که بدین‌طریق تهیه‌می‌شود مانند فیلم معمولی ظاهر وثابت می‌شود و فیلمی منفی بدست می‌آیدکه از آن کپیهای مثبتی برای نمایش تهیه می‌کنند .

برای نمایش فیلم از پروژکتور مخصوصی استفاده می‌کنندکه بتواند فیلم را به‌همان ترتیبی که عکسبرداری شده در مقابل عدسی دستگاه بحرکت درآورد . بدین معنی که وقتی‌که یك صفحه از فیلم پشت عدسی دستگاه بیحرکت قرارگرفت دریچهٔ پروژکتور باز می‌شود و تصویر حقیقی فیلم را برروی پردهٔ سینما می‌اندازد و در فاصلهٔ زمانی‌که یك عکس جای خود را به‌عکس دیگر می‌دهد، دریچهٔ پروژکتور بسته می‌شود. بنابراین درهنگام نمایش نیزفیلم به‌صورت جهشهای متوالی ازجلو عدسی می‌گذرد (شکل ۱۶۳) .

بدین ترتیب در هر ثانیه در حدود شانزده صحنه از فیلم ، یکی پس از دیگری و به فاصلهٔ $\frac{۱}{۱۶}$ ثانیه ، بر روی پرده می‌افتد . لیکن چشم تصور می‌کندکه اشیا یا اشخاص بطور پیوسته حرکت می‌کنند . علت این

است‌که اثر هر تصویر در حدود $\frac{۱}{۱۰}$ ثانیه بر اعصاب چشم باقی می‌ماند ، به‌عبارت دیگر ، هرگاه فاصلهٔ زمانی دو تصویر از $\frac{۱}{۱۰}$ ثانیه‌کمتر باشد ، هنوز اثر تصویر اول از چشم زایل نشده که تصویر دیگر جای آن را



شکل ۱۶۳

می‌گیرد و از این رو چشم آن دو را بطور پیوسته ، دنبال هم احساس می‌کند و نظر به‌اینکه دو فیلم تصاویر پیاپی و به‌فاصلهٔ $\frac{۱}{۱۶}$ ثانیه از جلو چشم می‌گذرند ، چشم همهٔ تصاویر را به‌صورت یك واقعهٔ متوالی مشاهده می‌کند .

شکل ۱۶۳ جزئیات یك پروژکتور را نمایش می‌دهد . در این دستگاه فیلم نزدیك کانون ابژکتیف قرار می‌گیرد و این عدسیها تصویر حقیقی و بزرگی از فیلم را بر روی پرده می‌اندازند. عدسیهای کندانسور، نور یك چراغ بسیار قوی را بر روی فیلم متمرکز می‌سازند تا تصویر بقدر کافی روشن باشد .

پرسش و مسئله

۱ ـ ضریب شکست یك ذره‌بین «تخت ـ محدب» $\frac{3}{2}$ و شعاع انحنای طرف محدب آن ۱۰cm است . تعیین کنید جسم کوچکی را کجا باید قرار داد تا تصویر مجازی آن در ۳۰ سانتیمتری ذره‌بین تشکیل شود .

جواب : 12cm

۲ ـ اگر در مسئلهٔ ۱ حداقل فاصلهٔ رؤیت ناظر همان 30cm باشد درشتنمایی ذره‌بین چقدر است (چشم درکانون تصویر است) ؟

جواب : 1/5

۳ ـ فاصلهٔ کانونی یك ذره‌بین 2cm است . دامنهٔ تنظیم آن را برای یك چشم سالم که فاصلهٔ حد اقل رؤیتش 20cm و برای یك نزدیك‌بین که بین ۳۰ تا ۸ سانتیمتر را خوب می‌بیند ، حساب کنید (چشم در کانون تصویر) .

۴ ـ جسم کوچك AB را به چه فاصله از ذره‌بینی به همگرایی ۵۰ دیوپتری باید قرار داد تا تصویر آن در ۲۰ سانتیمتری چشم تشکیل شود (چشم در کانون تصویر است) ؟ جواب: 1/8 سانتیمتر

۵ ـ در مسئلهٔ ۴ اگر طول AB برابر 0/1mm باشد تعیین کنید ناظر جسم را تحت چه زاویه‌ای با ذره‌بین می‌بیند ؟

۶ ـ یك ذره‌بین از جسمی که در فاصلهٔ ۸ سانتیمتری آن است تصویری می‌دهد حقیقی و مساوی جسم . درشتنمایی تجارتی آن چقدر است ؟

جواب : 6/25

۷ ـ ساعت سازی که حداقل رؤیتش 15cm است ذره‌بینی به‌همگرایی ۲۰ دیوپتری بکار می‌برد . در صورتی که ذره‌بین به فاصلهٔ ۵ سانتیمتری چشم باشد و ناظر تا آخرین حد ممکن تطابق کند ، با چه درشتنمایی اشیا را می‌بیند ؟

۸ ـ دو عدسی L و L′ که فاصلهٔ کانونی هریك 32mm است به‌فاصلهٔ 12mm از هم قرار دارند . این دستگاه را همچون ذره‌بینی بکار می‌برند و می‌خواهند جسمی که جلو L واقع است از L′ در بینهایت دیده شود . ۱ ـ فاصلهٔ جسم را از L حساب‌کنید. ۲ ـ توان دستگاه را بدست آورید وآن را با توان یکی از عدسیها مقایسه کنید (تصویر همواره در بینهایت است) .

۹ ـ مشخصات میکروسکوپی از این قرار است : فواصل کانونی شیئی وچشمی بترتیب $f_1=5mm$ و $f_2=2cm$ ، طول میکروسکوپ 16cm ،

تعیین‌کنید : ۱ ـ توان دستگاه و درشتنمایی تجارتی آن را ؛ ۲ ـ دامنهٔ تنظیم میکروسکوپ را برای یك چشم سالم‌که درکانون تصویر چشمی و حداقل رؤیتش 20cm است .

جواب : ۱۳۵۰ دیوپتری ، $3\frac{1}{3}$

۱۰ ـ جسمی به طول ۰/۱ میلیمتر را با میکروسکوپی که درشتنمایی تجارتی آن ۲۵۰ است مشاهده می‌کنیم . تعیین کنید تحت چه زاویه‌ای دیده می‌شود .

۱۱ ـ درشتنمایی یك میکروسکوپ ۲۰۰ و قدرت تفکیك آن فقط با قدرت تفکیك چشم محدود می‌شود (یك دقیقه) . اگرحداقل رؤیت ناظر 15cm باشد ، حداقل فاصلهٔ دو نقطه‌ای را که این اسباب می‌تواند تفکیك کند حساب کنید .

جواب : $0/22\frac{1}{2}\mu$

راهنمایی ـ چون قدرت تفکیك میکروسکوپ با قدرت تفکیك چشم محدود می‌شود ، بنابراین α' درمیکروسکوپ باید یك دقیقه باشد ، چه کمتر از آن را میکروسکوپ می‌تواند تفکیك کند لیکن برای چشم فایده‌ای ندارد ($\alpha'=1'$) .

۱۲ ـ فواصل کانونی شیئی و چشمی میکروسکوپی بترتیب 6mm و 25mm وفاصلهٔ آنها 20cm است . ۱ ـ برای آنکه تصویر در ∞ تشکیل شود جسم را کجا باید قرار داد ؟ ۲ ـ در این حالت توان و درشتنمایی میکروسکوپ چقدر است ؟ ۳ـ طول جسمی که با این اسباب تحت زاویهٔ یك دقیقه رؤیت می‌شود چقدر است ؟ ۴ ـ اگر محل جسم و شیئی ثابت مانده و چشمی را بقدر 25mm عقب ببریم طول و محل تصویر جسمی به طول 0/02mm را حساب کنید . ۵ ـ از وضع جدید دستگاه چه استفاده‌ای می‌توان کرد ؟

۱۳ ـ میکروسکوپی برای دیدن جسم کوچکی تنظیم شده است . روی جسم یك تیغهٔ شیشه‌ای قرار می‌دهند. میزان میکروسکوپ بهم می‌خورد. برای تنظیم مجدد آن میکروسکوپ را ۲۵۰ میکرون حرکت می‌دهند. اولاً بگویید این حرکت در چه جهت است . ثانیاً اگر ضخامت تیغه 0/75mm باشد ضریب شکست آن چقدر است ؟

۱۴ ـ یك دوربین نجومی برای چشم سالم تنظیم شده و تصویر در ∞ است . اگر شخص نزدیك‌بینی بخواهد همان جسم را نگاه کند چشمی را چقدر و در چه جهت باید حرکت دهد ، در صورتی که حداکثر رؤیت او یك متر

باشد ؟ (چشم به‌چشمی چسبیده است . فاصلهٔ کانونی چشمی f متر است) .

۱۵ ـ فواصل کانونی عدسیهای یك دوربین بترتیب یك متر و 5cm است . درشتنمایی آن چقدر است (تصویر در ∞) ؟

۱۶ ـ در فاصلهٔ یك کیلومتری خطوطی متوازی به فاصلهٔ 5cm از یکدیگر رسم شده‌است . درشتنمایی یك دوربین چقدر باید باشد تا چشم بتواند آنها را تفکیك‌کند (قدرت تفکیك چشم $\frac{۱}{۳۰۰۰}$ رادیان فرض می‌شود) ؟

۱۷ ـ درصورتی‌که $f_۱$ فاصلهٔ‌کانونی شیئی و $P_۲$ توان چشمی یك دوربین باشد ثابت کنیدکه درشتنمایی دوربین مساوی است با : $G = f_۱ \times P_۲$.

۱۸ ـ دوربینی را که برای ∞ تنظیم شده‌است درمقابل یك قسمت روشن آسمان نگاه می‌دارند . اشعه‌ای‌که از دوربین خارج می‌شود استوانه‌ای به‌قطر ۵ میلیمتر تشکیل می‌دهد . در صورتی‌که قطر دهانهٔ باز شیئی 20cm باشد درشتنمایی دوربین چقدر است ؟

۱۹ ـ درشتنمایی یك دوربین گالیله ۲۰ است . تعیین کنید با این دوربین عمارتی به ارتفاع ۲۰ متر را که در ۴ کیلومتری واقع است تحت چه زاویه‌ای می‌توان رؤیت نمود و در صورتی که فاصلهٔ دو عدسی آن 63cm وتصویر در ∞ باشد فواصل‌کانونی عدسیهای آن را حساب‌کنید .

۲۰ ـ فاصلهٔ کانونی ابژکتیف یك دوربین نجومی ۱/۵ متر است . دوربین را متوجه خورشید نگاه داشته به‌فاصلهٔ ۲/۱ متری شیئی صفحهٔ حساسی قرار می‌دهیم . می‌خواهیم روی این صفحه تصویری از خورشید به قطر ۵ سانتیمتر تشکیل دهیم . تعیین کنید محل و فاصلهٔ کانونی چشمی را . قطر ظاهری خورشید ۰/۰۱ رادیان ست .

۲۱ ـ فواصل کانونی شیئی و چشمی یك دوربین‌گالیله بترتیب 40cm و 5cm است . درشتنمایی آن چقدر است ؟ اگر این دوربین متوجه عمارتی که در ۵ کیلومتری است باشد پنجره‌های به عرض یك متر تحت چه زاویه‌ای رؤیت می‌شوند (تصویر در ∞ است) . هرگاه چشمی را بقدر یك سانتیمتر عقب ببریم آخرین تصویر کجا تشکیل می‌شود و در صورتی که ارتفاع عمارت ۱۲ متر باشد طول تصویر چقدر است ؟

۲۲ ـ ذره‌بینی به‌فاصلهٔ کانونی 2cm مفروض است. چشم ناظری که در یك سانتیمتری ذره‌بین قرار دارد شیء را در حداقل رؤیت خود که 25cm است مشاهده می‌کند :

الف ـ توان ذره‌بین را حساب کنید .

ب ـ درشتنمایی ذره‌بین را حساب کنید .

دانشسرای عالی

۲۳ ـ فاصلهٔ کانونی شیئی یك میکروسکوپ 4mm و فاصلهٔ کانونی چشمی آن 2cm و فاصلهٔ این دو عدسی 20cm است :

الف ـ فاصلهٔ جسم از شیئی چقدر است ؟

ب ـ توان این میکروسکوپ را حساب‌کنید .

دو عدسی نازك فرض شود .

دانشکدهٔ علوم تهران ـ رشتهٔ مشترك فیزیك و ریاضی

۲۴ ـ دوربینی ازابژکتیف (شیئی) به‌فاصلهٔ کانونی ۳متر واکولر (چشمی) به‌فاصلهٔ کانونی ۵ سانتیمتردرست شده و به‌بینهایت نشانه‌گیری شده است. ستاره‌ای که به قطر ظاهری ۳ دقیقه است ، درتحت چه زاویه از پشت این دستگاه دیده می‌شود و سطح تصویر به‌وسیلهٔ ابژکتیف چقدر است ؟

دانشکدهٔ فنی

بخش دوم

الکتریسیته و مغناطیس

فرانکلین مخترع برقگیر (۱۷۰۶ - ۱۷۹۰) ، یکی از دانشمندان مشهور امریکایی قرن هیجدهم است که مطالعات دقیقی در بارهٔ الکتریسیتهٔ ساکن انجام داده است

فصل اول

الکتریسیتهٔ ساکن

تاریخچهٔ مختصر الکتریسیتهٔ ساکن - یونانیان قدیم ازمشاهدات خود چنین نتیجه گرفته بودند که هرگاه کهربا با پارچهٔ پشمی یا پوست مالش داده شود اجسام سبکی مانندکاه را جذب می‌کند . در زبان یونانی کهربا را الکترون گویند و لغت الکتریسیته از لغت الکترون گرفته شده است .

باید دانست که الکتریسیتهٔ حاصل از مالش کهربا ، به علت نارسانا بودن کهربا ، ساکن می‌ماند و از این جهت این نوع الکتریسیته را **الکتریسیتهٔ ساکن** نامند .

چنین بنظر می‌رسد که تولید الکتریسیتهٔ ساکن بر اثر مالش ، اولین بار به‌توسط **تالس**[۱] درشش‌صد سال قبل از میلاد انجام‌گرفته است . **ویلیام گیلبرت**[۲] در سال ۱۶۰۰ میلادی اولین یادداشت خود را دربارهٔ الکتریسیته‌دار شدن اجسام انتشار داد ، و در آن اجسام را به دو دستهٔ الکتریکی و غیر الکتریکی تقسیم کرد .

اجسام الکتریکی آنهایی را نامید که مانندکهربا ، بر اثرمالش ، اجسام ریز را جذب کنند و بقیهٔ اجسام را غیر الکتریکی نام گذاشت .

پس از گیلبرت دانشمندان دیگری مانند **استفن گری**[۳] و **شارل دوفی**[۴] مطالعات دقیق‌تری انجام دادند و به نوع الکتریسیته و جریان آن پی بردند . در قرن هیجدهم **فرانکلین** الکتریسیتهٔ اجسام را به دو نوع الکتریسیته‌های مثبت و منفی نامگذاری کرد ، بدین معنی‌که الکتریسیته‌ای را که بر اثر مالش شیشه حاصل می‌شود **مثبت** و آن را که

---

۱ - Thalès (۶۴۰ - ۵۴۷ قبل از میلاد) قدیمی‌ترین دانشمند یونان است . این دانشمند نخستین کسی است که در سال ۵۸۵ قبل از میلاد گرفتن خورشید را پیش‌بینی کرده بود .

۲ - William Gilbert (۱۶۰۳-۱۵۴۴) دانشمند انگلیسی .

۳ - Stephen Gray (۱۷۳۶-۱۶۷۰) دانشمند انگلیسی و کاشف قابلیت هدایت الکتریکی .

۴ - Charles Dufay (۱۷۳۹-۱۶۹۸) .

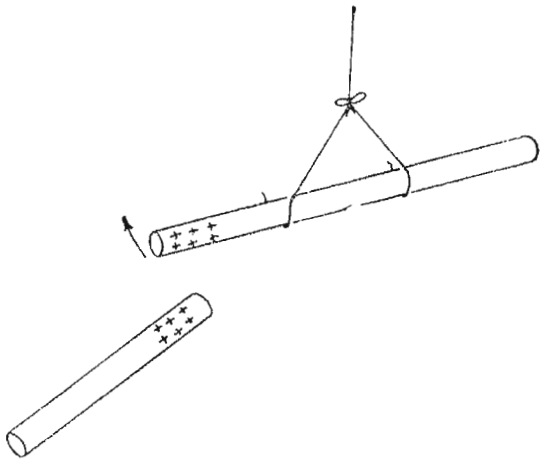
با مالش سقز یا رزین بدست می‌آید **منفی** نامید . اکنون نیز همین نامگذاری به یادبودکارهای او معمول است . در آن زمان فرانکلین معتقد بود که الکتریسیتهٔ اجسام ، گرچه ظاهراً از دو نوع است ، در حقیقت یك نوع بیش نیست‌که چون سیالی در هر جسم به‌میزان معین وجود دارد و از خود اثری بروز نمی‌دهد ، و فقط هنگامی یك جسم از خود آثار کهربایی بروز می‌دهد که این سیال در آن جسم از میزان معمولی کمتر یا بیشتر شود . مثلاً اگر دو جسم را برهم مالش دهیم مقداری از سیال یك جسم به جسم دیگر می‌رود و خاصیت کهربایی درهر دو ظاهر می‌شود، ولی این خاصیت در هردو یکسان نیست . فرانکلین الکتریسیتهٔ جسمی را که سیال آن به نظر او از مقدار عادی بیشتر شده است الکتریسیتهٔ مثبت (علامت اضافه شدن) و الکتریسیتهٔ جسمی را که سیال آن کمتر ازحالت عادی شده است الکتریسیتهٔ منفی نامید (علامت‌کاسته شدن) .

تولید الکتریسیتهٔ ساکن

جذب و دفع اجسام الکتریسیته‌دار ـ یك میلهٔ شیشه‌ای را با یك تکه ابریشم مالش می‌دهیم و سپس آن را توسط یك نخ ابریشم طوری آویزان می‌کنیم که افقی بایستد (شکل ۱۶۴) . سپس یك میلهٔ شیشه‌ای دیگر را مالش می‌دهیم و آن را به میلهٔ اولی نزدیك می‌کنیم ؛ دو میلهٔ شیشه‌ای یکدیگر را دفع می‌کنند . همین تجربه را با دو میلهٔ لاکی (یا پلاستیکی) که با پشم مالش داده شده است انجام می‌دهیم ؛ دو میلهٔ لاکی نیز یکدیگر را دفع می‌کنند .

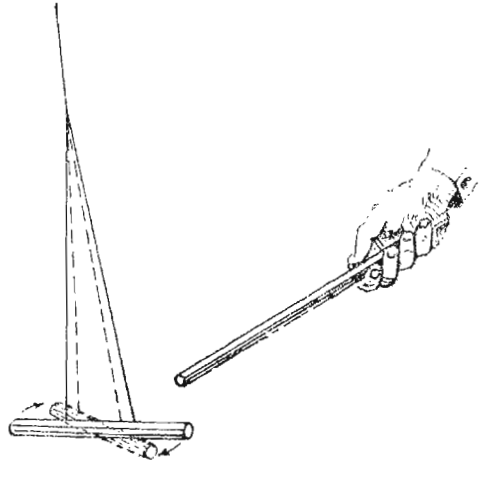
اکنون یك میلهٔ شیشه‌ای را با ابریشم و یك میلهٔ لاکی را با پشم

مالش می‌دهیم . یکی از دو میله را با نخ ابریشمی مطابق شکل ۱۶۵ آویزان می‌کنیم و میلهٔ دیگر را به آن نزدیك می‌کنیم ؛ این بار مشاهده می‌شودکه دو میله یکدیگر را جذب می‌کنند .



شکل ۱۶۴

می‌توان تجربیات بالا را با بسیاری از مواد دیگر تکرار کرد . اجسامی که از یك ماده هستند و با یك‌روش الکتریسیته‌دار شده‌اند همیشه یکدیگر را دفع می‌کنند . اجسامی‌که از یك ماده نیستند ، بسته به روشی که الکتریسیته‌دارشده‌اند، یکدیگر را جذب یا دفع می‌کنند .



شکل ۱۶۵

تجربیات متعدد نشان داده است که الکتریسیتهٔ اجسام بر دو نوع است : یکی شبیه الکتریسیتهٔ میلهٔ شیشه‌ای و دیگری شبیه الکتریسیتهٔ

میلهٔ لاکی . بر طبق نامگذاری بنیامین فرانکلین می‌گوییم که شیشه و اجسامی دیگر که الکتریسیته‌ای نظیر الکتریسیتهٔ شیشه دارند دارای **بار مثبت** هستند . همچنین لاك و اجسامی دیگر که الکتریسیته‌ای نظیر الکتریسیتهٔ لاك دارند دارای **بار منفی** هستند .

دو جسم که بار مثبت دارند ، مانند دو میلهٔ شیشه‌ای الکتریسیته‌دار ، یکدیگر را دفع می‌کنند . همچنین دو جسم که بارمنفی دارند ، مانند دومیلهٔ لاکی الکتریسیته‌دار ، یکدیگر را دفع می‌کنند . هرجسمی‌که بار مثبت دارد، جسمی را که دارای بار منفی است جذب می‌کند .

نیروهای الکتریکیی که بین عناصر تشکیل دهندهٔ ماده اعمال می‌شوند ـ می‌دانیم‌که ماده از اتمها ساخته شده است واتمها خود از ذرات کوچکتری تشکیل شده‌اند . بررسی الکتریسیتهٔ مواد اطلاعات سودمندی دربارهٔ ذرات متشکلهٔ اتمها به ما می‌دهد .

بدیهی است‌که نیروی دافعهٔ (یا جاذبه) بین دو جسم برابر است با برآیند نیروهای دافعه‌ای که ذرات مختلف آن دو جسم بر یکدیگر وارد می‌کنند . بنا بر این وقتی که دو جسم الکتریسیته‌دار یکدیگر را جذب یا دفع می‌کنند می‌توان تصور کرد که نیروهای دافعه یا جاذبهٔ کوچکتری بین بعضی از اجزای متشکلهٔ این دو جسم وجود دارد .

چون اجسام الکتریسیته‌دار مثبت و منفی وجود دارد ، می‌توان تصورکردکه در میان اجزای متشکلهٔ ماده دو نوع ذره وجود دارد : ذرات با **بار الکتریکی مثبت** و ذرات با **بار الکتریکی منفی** . دو ذره که حامل بارهای الکتریکی همنام باشند یکدیگر را دفع می‌کنند و دو ذره که حامل بارهای الکتریکی ناهمنام باشند یکدیگر را جذب می‌کنند . بعضی از ذرات تشکیل دهندهٔ ماده نظیر نوترونها نه حامل بار

الکتریکی مثبت هستند و نه حامل بار الکتریکی منفی .

اگر دو نمونهٔ مادی معمولی را (که فرض می‌کنیم الکتریسیته‌دار نیستند) کنار هم قرار بدهیم ، نیروهای الکتریکی قابل اندازه‌گیری بریکدیگر وارد نمی‌کنند . این بدان معنی نیست که بایستی این عقیده را که اجسام از ذرات مثبت و منفی تشکیل شده‌اند از دست بدهیم. وقتی که یك ذرهٔ مثبت و یك ذرهٔ منفی بر یك ذرهٔ الکتریسته‌دار دیگر نیروهایی وارد کنند که غیر همسو باشند ، بسادگی مشاهده می‌شود که نیروهای اعمال شده می‌توانند اثر یکدیگر را خنثی کنند . وقتی که آثار ذرات مثبت و منفی در داخل ماده صفر باشد ، می‌گوییم که آن ماده باردار نیست یا **از نظر الکتریکی خنثی است** . حتی می‌توان یك اتم خنثی را نیز تصور کرد .

اگر به‌جسمی که از نظر الکتریکی خنثی است ذرات مثبت اضافه کنیم ، تعادل الکتریکی به هم می‌خورد : اثر ذره‌های مثبت بیشتر از اثر ذره‌های منفی خواهد شد و می‌گوییم که جسم دارای الکتریسیتهٔ مثبت است . همچنین اگر از جسمی ذرات منفی بگیریم ، تعادل الکتریکی به هم می‌خورد و جسم دارای الکتریسیتهٔ مثبت خواهد شد (به‌طریق مشابه می‌توان جسمی را دارای الکتریسیتهٔ منفی کرد : با اضافه کردن ذرات منفی به آن ، یا باگرفتن ذرات مثبت از آن) .

قبلاً دیدیم که یك میلهٔ شیشه‌ای بر اثر مالش با ابریشم دارای الکتریسیتهٔ مثبت می‌شود . این پدیده چگونه اتفاق می‌افتد ؟

دوحالت می‌توان درنظرگرفت: یاذرات مثبت از ابریشم وارد شیشه شده است؛ یاذرات منفی ازشیشه وارد ابریشم شده است. درهرحال ابریشم

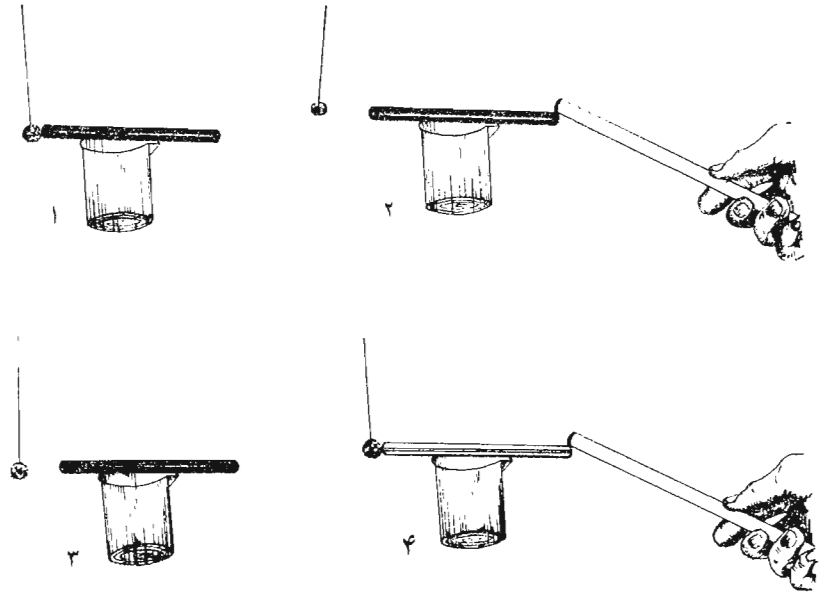
بایستی دارای الکتریسیتهٔ منفی بشود . درستی این نتیجه را می‌توان با نزدیك‌کردن ابریشم به‌یك میلهٔ شیشه‌ای‌آویزان شده تحقیق‌کرد. مشاهده می‌شود که ابریشم ، میلهٔ شیشه‌ای را جذب می‌کند ؛ همچنین یك میلهٔ پلاستیکی را که دارای الکتریسیتهٔ منفی است دفع می‌کند .

مواد رسانا و نارسانا ـ مواد را از نظر الکتریکی به‌دو دسته‌تقسیم می‌کنند : رسانا و نارسانا .

این تقسیم‌بندی نتیجهٔ تجربه‌های متعددی از نوع تجربه‌های زیر است :

گلوله‌ای فلزی وسبك را به نخی از ابریشم آویزان می‌کنیم . یك میلهٔ فلزی را بطور افقی روی لیوانی شیشه‌ای یا پلاستیکی طوری قرار می‌دهیم‌که یك انتهای آن با گلولهٔ فلزی درتماس باشد (شکل۱۶۶ـ۱) . اکنون یك میلهٔ شیشه‌ای را که بر اثر مالش الکتریسیته‌دار شده است به انتهای دیگر میلهٔ فلزی تماس می‌دهیم . بمحض اینکه شیشه را با میلهٔ فلزی تماس بدهیم گلولهٔ فلزی دفع می‌شود (شکل۱۶۶ـ۲) . اگر دراین هنگام میلهٔ شیشه‌ای را از میلهٔ فلزی جدا کنیم ، مشاهده می‌شودکه‌گلولهٔ فلزی دیگر به میلهٔ فلزی نمی‌چسبد و به حالت دفع باقی می‌ماند (شکل ۱۶۶ـ۳) . به جای میلهٔ فلزی یك میلهٔ پلاستیکی قرار می‌دهیم و تجربهٔ بالارا تکرارمی‌کنیم. این بارگلولهٔ فلزی حرکت‌نمی‌کند(شکل۱۶۶ـ۴). نتیجه می‌گیریم‌که رفتار میلهٔ فلزی با رفتار میلهٔ پلاستیکی متفاوت است.

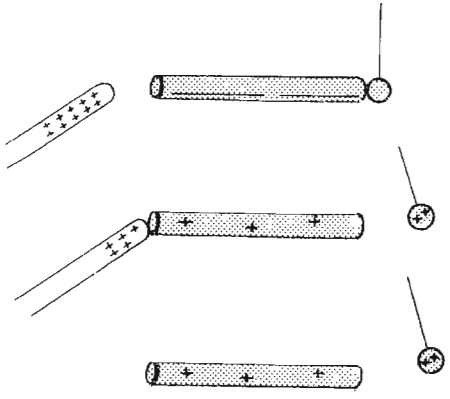
برای بیان علت این اختلاف فقط می‌توان گفت که در یك میلهٔ فلزی بعضی از ذرات الکتریکی آزادانه می‌توانند از یك نقطه به نقطهٔ دیگر جابجا شوند ، در حالی که در میلهٔ پلاستیکی هیچ ذرهٔ الکتریکی



شکل ۱۶۶

نمی‌تواند آزادانه جابجا شود. فرض می‌کنیم‌که ذرات آزاد درمیلهٔ فلزی منفی باشند . وقتی‌که شیشه ، که دارای بار مثبت است، با میلهٔ فلزی،که از نظر الکتریکی خنثی است ، تماس پیدا می‌کند ، ذرات منفی‌آزاد در میله‌وگلوله‌راجذب می‌کند. بنابراین گلوله و میله دارای بارمثبت می‌شوندو یکدیگر رادفع‌می‌کنند (شکل۱۶۷).

همچنین می‌توان تصور کرد که ذرات آزاد در میلهٔ فلزی مثبت هستند . وقتی که



شکل ۱۶۷

شیشه ، که دارای بار مثبت است، با میلهٔ فلزی تماس پیدا می‌کند، ذرات مثبت از شیشه وارد میلهٔ فلزی می‌شوند و تا گلولهٔ فلزی پخش می‌شوند . اکنون گلوله و میلهٔ فلزی که هر دو دارای بار مثبت هستند یکدیگر را دفع می‌کنند (شکل ۱۶۷) .

حالا سعی می‌کنیم که تجربه‌های بالا را به‌جای میلهٔ فلزی با یك میلهٔ پلاستیکی انجام دهیم . در میلهٔ پلاستیکی بارهای مثبت و منفی نمی‌توانند آزادانه جابجا شوند . فقط در این حالت انتهای میله که با میلهٔ شیشه‌ای در تماس است دارای مختصری بارمثبت می‌شود . بقیهٔ میله، و بنابراین گلولهٔ فلزی، ازنظر الکتریکی خنثی باقی می‌مانند. بنابراین گلوله از میله دفع نمی‌شود .

موادی را که مانند فلز رفتار کنند **هادی** یا **رسانا** می‌گوییم و موادی را که مانند پلاستیك رفتارکنند **عایق** یا **نارسانا** می‌گوییم. ذرات الکتریکی در مواد رسانا می‌توانند آزادانه جابجا شوند ، ولی در مواد نارسانا نمی‌توانند آزادانه جابجا شوند .

در گازها و مایعات رسانا ، هم ذرات مثبت (یونهای مثبت) و هم ذرات منفی (یونهای منفی) آزادانه حرکت می‌کنند ؛ در حالی که در فلزات عموماً خاصیت رسانایی ناشی از حرکت ذرات منفی (الکترونها) است . از نظر سهولت بررسی ، در فصول بعدی ، چنین فرض می‌کنیم که فقط ذرات منفی حرکت می‌کنند .

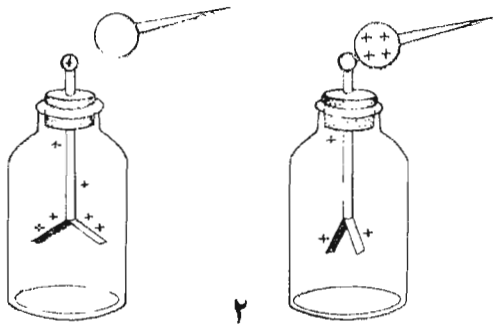
الکتروسکوپ یا **برقنما** ـ برقنما دستگاه بسیارساده‌ای است که وجود بارهای الکتریکی را ظاهر می‌سازد . ساده ترین آن برقنما با ورقه‌های طلاست که تشکیل شده است از دو ورقهٔ بسیار نازك طلا که

به‌یك میلهٔ فلزی آویزان است ومجموعاً دریك ظرف شیشه‌ای قرار دارند. در انتهای میلهٔ فلزی که خارج از ظرف شیشه‌ای است معمولاً صفحه یا گلوله‌ای فلزی نصب شده است (شکل ۱۶۸) .

اگر یك میلهٔ لاکی باردار با گلولهٔ فلزی تماس پیدا کند ورقه‌های طلا بسرعت از یکدیگر جدا می‌شوند . چه اتفاقی می‌افتد ؟ ذرات منفی از میلهٔ لاکی وارد میلهٔ فلزی می‌شوند و فوراً تا انتهای ورقه‌های طلا پخش می‌شوند . اکنون این دو ورقه که حامل بارالکتریکی منفی شده‌اند یکدیگر را دفع می‌کنند . چون این ورقه‌ها بسیارسبك هستند بارالکتریکی بسیارکمی نیزمی‌تواند آنها را ، باندازه‌ای‌که قابل دیدن باشد ، ازیکدیگر جدا کند (اگر آزمایش را به‌جای میلهٔ لاکی با یك میلهٔ شیشه‌ای ، که با ابریشم مالش داده شده است ، تکرار کنیم ، مشاهده می‌شود که باز هم ورقه‌های طلا از یکدیگر جدا می‌شوند . این ورقه‌های طلا حامل بار الکتریکی مثبت شده‌اند)

شکل ۱۶۸

به یك برقنما مقداری بار الکتریکی می‌دهیم(شکل۱۶۹ـ۱). سپس یك کرهٔ فلزی کوچك راکه دارای دستهٔ نارسانایی است ، به گلولهٔ برقنما تماس می‌دهیم (شکل ۱۶۹ـ۲) ؛ ورقه‌ها کمی می‌افتند (به یکدیگر نزدیك

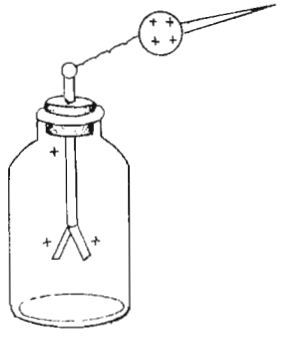


۱ ۲

شکل ۱۶۹

می‌شوند) ، زیرا بر اثر تماس مقداری از بار الکتریکی وارد کرهٔ فلزی می‌شود و در نتیجه مقدار بار الکتریکی ورقه‌ها کم می‌شود . در حقیقت بار الکتریکی بین کرهٔ فلزی و برقنما توزیع می‌شود. اکنون سعی می‌کنیم که همین تجربه را با یك کرهٔ فلزی بزرگ تکرار کنیم ؛ مشاهده می‌شود که ورقه‌های طلا کاملاً می‌افتند ، زیرا در این حالت قسمت اعظم بار الکتریکی وارد کرهٔ فلزی می‌شود .

تجربه‌های بالا را می‌توان به طریق زیر نیز انجام داد . کرهٔ فلزی را به توسط سیمی به گلولهٔ فلزی برقنما وصل می‌کنیم (شکل ۱۷۰) .



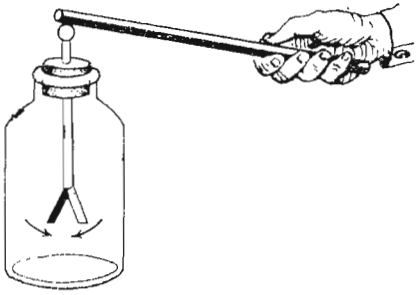
شکل ۱۷۰

مقداری از بارالکتریکی ازراه سیم وارد کرهٔ فلزی می‌شود و اگر کرهٔ فلزی بزرگ باشد ، ورقه‌ها کاملاً می‌افتند . اگر یك برقنمای باردار را به زمین وصل کنیم عملاً برقنما تمام بارالکتریکی خودرا از دست می‌دهد .

بدن انسان از نظر الکتریکی رسانا ست. اگر گلولهٔ فلزی یك برقنمای باردار را با انگشت خود لمس کنید، ورقه‌های طلا می‌افتند. اگر در ابتدا روی میلهٔ فلزی و ورقه‌های طلا ذرات منفی باشد، تعدادی از آن ذرات از بدن عبور می‌کند و وارد زمین می‌شود. حتی اگر کفشهایی که شخص پوشیده است نارسانا باشد ، بازهم ورقه‌های طلا می‌افتند، زیرا بار الکتریکی برقنما بین برقنما و بدن شخص توزیع می‌شود . اگر در ابتدا برقنما دارای بار مثبت باشد ، باز هم می‌توان بار

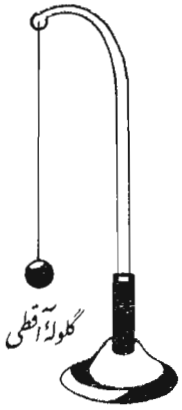
آن را ، با لمس کردن گلوله توسط انگشت ، تخلیه کرد . مقداری ذرات منفی از بدن وارد برقنما می‌شود و بار برقنما را خنثی می‌کند . در هر حالت از این تجربه‌ها نتیجه می‌شود که بدن انسان یك رسانای الکتریکی است .

ما می‌توانیم تعیین کنیم که چه مواد دیگری رسانا هستند . مثلاً یك برقنمای باردار را با یك میلهٔ گرافیت ، مثلاً مغز مداد، لمس می‌دهیم. ورقه‌ها فوراً می‌افتد ؛ و این نشان می‌دهد که گرافیت نیز رساناست (شکل ۱۷۱). از طرف دیگر اگر گلولهٔ فلزی یك برقنمای باردار را با یك میلهٔ شیشه‌ای غیر بار- دار یا یك قطعه لاستیك یا



شکل ۱۷۱

یك جسم پلاستیکی لمس بدهیم ورقه‌های طلا نمی‌افتند، پس این مواد نارسانا هستند . اگر گلولهٔ فلزی را با یك چوب کبریت لمس دهیم ، ورقه‌ها بکندی می‌افتند . در حقیقت در چوب بعضی از ذرات باردار می‌توانند آزادانه حرکت کنند ، اما نه به‌آزادی ذراتی که در فلز وجود دارد . به عبارت دیگر چوب در مقابل حرکت ذرات الکتریکی بیشتر از فلزات مقاومت می‌کند .



شکل ۱۷۲

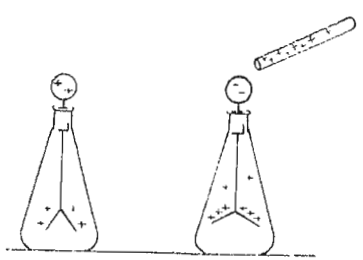
آونگ الکتریکی ـ گلوله‌ای از مغز آقطی را به توسط نخ ابریشمی بر پایهٔ عایقی بیاویزید (شکل ۱۷۲) ؛ آونگی

به نام **آونگ** الکتریکی ساخته می‌شود .

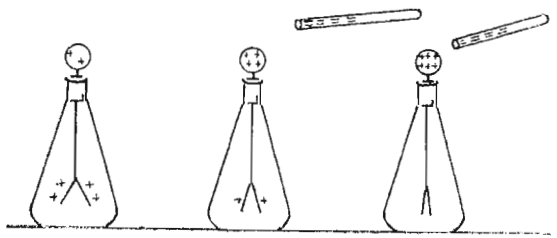
تولید الکتریسیته براثر مجاورت ـ اگر یك میلهٔ شیشه‌ای را، که بر اثر مالش بار الکتریکی یافته است ، به صفحهٔ برقنمایی نزدیك کنیم ، بی‌آنکه با آن تماس یابد، ورقه‌های برقنما ازهم بازمی‌شوند. علت این امر آن است که بواسطهٔ نزدیك شدن میلهٔ شیشه‌ای به‌صفحهٔ برقنما ، الکتریسیتهٔ مثبت میلهٔ شیشه‌ای الکترونهای آزادصفحه ومیلهٔ فلزی برقنما را جذب و در قسمت فوقانی صفحه متمرکز می‌کند و درنتیجه **ورقه‌های برقنما ، براثرکم شدن الکترون ، دارای بار مثبت می‌شوند وهمدیگررا دفع می‌کنند** . اگرهمین آزمایش را بامیلهٔ لاکی انجام‌دهیم، مشاهده خواهیم‌کرد که این بارنیز، بی‌آنکه میلهٔ لاکی با صفحهٔ برقنما تماس یابد، فقط براثر نزدیك شدن آن، ورقه‌های برقنما ازهم دور می‌شوند ، زیرا براثر نزدیك بودن میلهٔ لاکی وصفحه ، بارمنفی میله الکترونهای آزاد صفحه را ازخود می‌راند و برروی ورقه‌های طلامتمرکز می‌کند، درنتیجه ورقه‌ها هردودارای بارمنفی می‌شوند و یکدیگر را دفع می‌کنند . باید متوجه بودکه دراین آزمایشها هیچ الکترونی نه وارد برقنما ونه ازآن خارج می‌شود، بلکه برحسب نوع الکتریسیتهٔ میله‌ای‌که نزدیك برقنما می‌شود ، الکترونهای آزاد صفحه دربالا یادرپایین برقنما جمع می‌شوند. پس چنین نتیجه می‌شود که براثرمجاورت یك جسم الکتریسیته‌دار با یك جسم خنثی ، بی‌آنکه الکترونهای جسم دوم کم یا زیاد شود ، براثر دور شدن الکترونها از یك منطقه یا نزدیك شدن آنها به‌منطقهٔ دیگر جسم ، یك قسمت ازجسم دارای بار مثبت و قسمت دیگر آن دارای بار منفی می‌شود . جداکردن

بارهای مثبت ومنفی یك رسانا را با نزدیك‌کردن یك جسم باردار به‌آن، **القای الکتریسیتهٔ ساکن**گویند. بارهای الکتریکیی‌که براثرمجاورت جسم رسانا با یك‌جسم الکتریسیته‌دار درنواحی مختلف جسم رسانا ظاهر شده‌اند **بارهای القاشده** نامیده می‌شوند .

به کمك القای الکتریسیتهٔ ساکن نه تنها می‌توان به‌وجود بار الکتریکی دریك جسم پی برد، بلکه می‌توان نوع آن را هم تعیین‌کرد. برای این منظور ابتدا به‌برقنما مقداری بار الکتریکی ، مثلا بار مثبت، می‌دهیم . سپس بار الکتریکی غیر مشخصی را به‌گلولهٔ برقنما نزدیك می‌کنیم . اگر بار ، مثبت باشد ، درگلولهٔ برقنما بارمنفی القامی‌شود وبنابراین بارمثبت ورقه‌های برقنما افزایش پیدا می‌کند ؛ در نتیجه ورقه‌های برقنما بازترمی‌شوند (شکل ۱۷۳) . اگر بارالکتریکی مجهول منفی باشد، درگلولهٔ برقنما بارمثبت القامی‌شود وبنابراین بارمثبت ورقه‌های برقنماکم می‌شود ؛ درنتیجه ورقه‌های برقنماکمی می‌افتند (شکل ۱۷۴) .

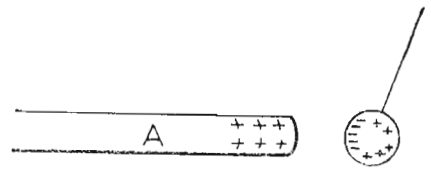


شکل ۱۷۳



شکل ۱۷۴

به‌کمك القای الکتریسیتهٔ ساکن حتی می‌توان نیروی جاذبه‌ای را که اجسام الکتریسیته‌دار بریك رسانای خنثی اعمال می‌کنند توجیه‌کرد. فرض می‌کنیم که **A** جسم الکتریسیته‌داری است که بار آن مثبت است (شکل ۱۷۵) . اگر آن‌را به یك رسانا نزدیك کنیم در قسمتی از رسانا



شکل ۱۷۵

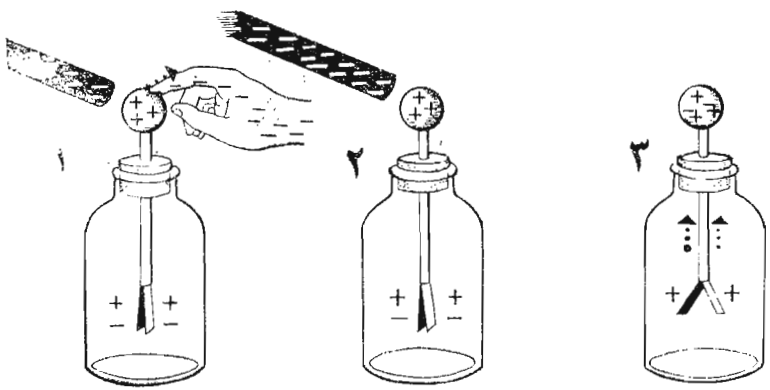
که به‌آن نزدیك است بارمنفی و درقسمت دیگر آن بارمثبت القا می‌کند. بارمثبت **A** ، بارمنفی القاشده را جذب و بارمثبت القاشده را دفع می‌کند. اما نیروی دافعه‌کمتر ازنیروی جاذبه‌است ، زیرا فاصلهٔ بار مثبت القاشده تا جسم **A** بیشتر از فاصلهٔ بار منفی القاشده تا جسم **A** است وبدیهی است که هرچه فاصلهٔ دو بار الکتریکی بیشتر باشد نیرویی که بر هم اعمال می‌کنند کمتر است ؛ در نتیجه نیروی جاذبه بزرگتر از نیروی دافعه می‌شود و رسانا به‌طرف جسم **A** کشیده می‌شود .

الکتریسیته دار کردن یك جسم خنثی به توسط یك جسم الکتریسیته‌دار ـ هرگاه جسم الکتریسیته‌داری داشته باشیم ، با آن می‌توان دیگر اجسام را ، یا با **تماس** یا بر اثر **مجاورت (القا)** ، الکتریسیته‌دار کرد .

آزمایش۱ـ هرگاه یك میلهٔ لاکی‌را به‌وسیلهٔ مالش الکتریسیته‌دار کنیم و آن‌را به‌یك‌آونگ الکتریکی نزدیك سازیم ، ابتدا گلوله جذب

و پس از تماس با میله ، ازآن دفع می‌شود ، زیرا چنانکه در پیش گفته شد ، ابتدا آن قسمت ازگلوله‌که نزدیك میلهٔ لاکی است، براثرمجاورت، دارای بارمثبت شده و به‌توسط میله‌که دارای بارمنفی است جذب می‌شود. پس ازتماس ، بار مثبت‌گلوله با الکترونهای میله خنثی می‌شود ومقداری بار منفی در گلوله اضافه می‌ماند ، یعنی گلوله الکتریسیته‌دار می‌شود و نوع الکتریسیتهٔ آن از همان نوع الکتریسیتهٔ میله است . با این ترتیب می‌توان مقداری از بار جسمی را از راه تماس به جسم دیگرمنتقل‌کرد.

آزمایش۲ـ انگشت خود را با گلولهٔ برقنما تماس دهید و در همان حال میلهٔ باردار را (با بار مثبت یا منفی) به‌گلولهٔ برقنما نزدیك کنید ، بدون آنکه با آن **تماس پیدا کند** (شکل ۱۷۶ـ۱) . پس از آن ، نخست انگشت خود و سپس میله را از گلوله دورکنید . مشاهده می‌کنید که ورقهای برقنما باز می‌مانند و وجود باری الکتریکی را در خودنشان می‌دهند .

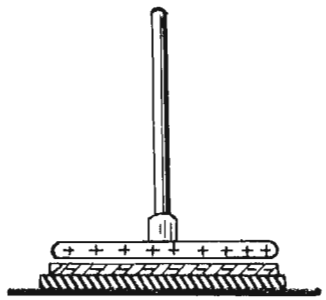


شکل ۱۷۶

اگر بار الکتریکی میله منفی باشد ، الکترونهای گلولهٔ فلزی از راه انگشت در بدن وارد می‌شوند و به این ترتیب گلولهٔ برقنما بار مثبت پیدا می‌کند. وقتی که انگشت را از گلوله دور می‌کنید، دیگر الکترونهایی که در بدن شما وارد شده‌اند نمی‌توانند به گلوله باز گردند ، حتی اگر میله را از برقنما دور کنید (شکل ۱۷۶ـ۳) . در نتیجه برقنما بار مثبت پیدا می‌کند و ورقهای آن از هم دور می‌مانند .

اگر بار الکتریکی میله مثبت باشد ، الکترونها از راه انگشت در گلوله وارد می‌شوند، و وقتی که انگشت را دور می‌کنید، مقداری الکترون اضافی ، یا بار منفی ، در گلوله باقی می‌ماند . به‌این ترتیب ، می‌بینید که اگر بار الکتریکی میله منفی باشد ، براثر القا بار مثبت در ورقهای برقنما تولید می‌شود و اگر بار الکتریکی میله مثبت باشد ، بار منفی در ورقهای برقنما پدید می‌آید .

الکتروفور ـ الکتروفور دستگاه ساده‌ای است که به توسط آن می‌توان درجسمی ، براثر مجاورت ، الکتریسیتهٔ ساکن تولید کرد. اساس آن همان آزمایشی است که در بالا گفته شد .



شکل ۱۷۷

الکتروفور از دو صفحهٔ هادی تشکیل یافته است که میان آنها یک صفحهٔ نارسانای پارافینی وجود دارد . درشکل ۱۷۷ ، صفحهٔ زیرین که روی زمین قرار می‌گیرد ، دارای میخ کوچکی است که به‌توسط آن با صفحهٔ بالایی اتصال می‌یابد.

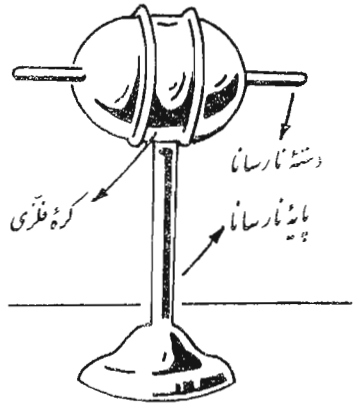
ابتدا در صفحهٔ نارسانا ، به توسط مالش با پارچه ، الکتریسیتهٔ منفی تولید می‌کنیم . سپس صفحهٔ بالایی را که دستهٔ نارسانایی دارد بر روی آن می‌گذاریم . دراین صفحه ، براثر مجاورت ، تولید الکتریسیتهٔ مثبت می‌شود، ولی چون صفحهٔ بالایی ، به توسط میخ کوچک ، با صفحهٔ پایینی و زمین ارتباط دارد، مقداری از الکترونهای آن، براثر رانش الکترونهای صفحهٔ پارافین ، به‌زمین رانده می‌شوند . حال اگر صفحهٔ بالایی را برداریم اتصال آن با زمین قطع خواهد شد و الکترونهای خارج شده دیگر نمی‌توانند به جای خود بازگردند . در نتیجه این صفحه دارای الکتریسیتهٔ مثبت می‌شود . اگر این صفحه را به جسم رسانای دیگری که مربوط به زمین است نزدیک کنیم ، الکتریسیتهٔ موجود در آن به صورت جرقه تخلید خواهد شد .

دراین عمل ، درمقدار الکتریسیتهٔ صفحهٔ پارافینی تغییری حاصل نمی‌شود . بنا بر این می‌توان آزمایش را مرتباً تکرار کرد و دستگاه را مانند یک ماشین مولد الکتریکی بکار برد .

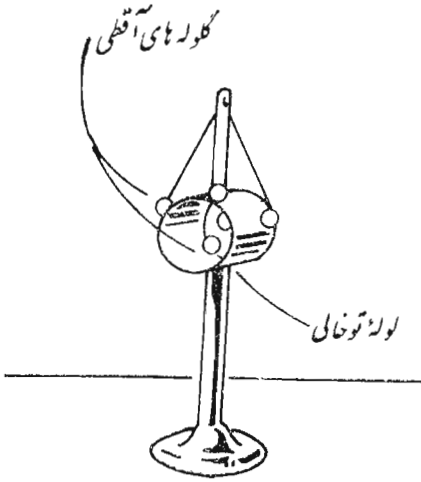
توزیع الکتریسیته بر سطح اجسام

آزمایش ـ کره‌ای فلزی را که دارای پایهٔ نارسانایی است بشدت الکتریسیته‌دار می‌کنیم . سپس دو نیمکرهٔ توخالی فلزی با دسته‌های نارسانا اختیار کرده آنها را مانند شکل ۱۷۸ روی کره می‌گذاریم. با یک برقنما می‌توان تحقیق کرد که هیچ بار الکتریکی روی کره باقی نمانده است و همه به سطح خارجی نیمکره‌ها منتقل شده است .

در آزمایش دیگر لولهٔ فلزی گشادی که دارای پایهٔ نارسانایی است اختیار کنید ، چندگلولهٔ مغز آقطی درخارج و داخل آن بیاویزید (شکل ۱۷۹) . مشاهده می‌کنید که فقط گلوله‌های خارج همدیگر را دفع می‌کنند و در داخل این لوله هیچ اثری از الکتریسیته مشاهده نمی‌شود . از این



شکل ۱۷۸

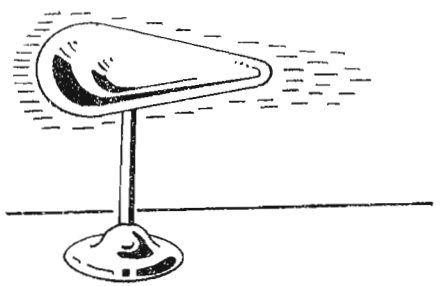


شکل ۱۷۹

دو آزمایش نتیجه می‌شود که **بار الکتریکی اجسام رسانا همواره بر سطح خارجی آنها پخش می‌شود .**

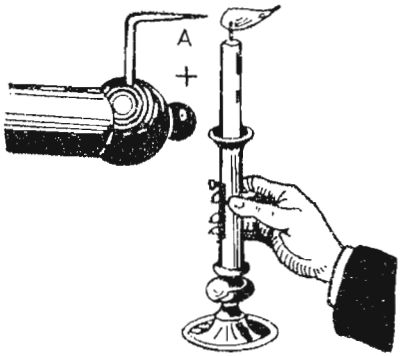
تجمع الکتریسیته در نوکهای تیز ـ هرگاه یك کرهٔ فلزی را الکتریسیته‌دار کنیم ، بارهای الکتریکی یکنواخت بر روی آن پخش می‌شوند . ولی اگر ، به جای کره ، جسم نوکداری ، مثلا به شکل تخم مرغ ، انتخاب شود ، پخش الکتریسیته یکنواخت نخواهد بود ، بلکه قسمت اعظم بارها در نواحی نوکدار جسم جمع می‌شود (شکل ۱۸۰) و براثر نیروی دافعهٔ شدید بارها ، الکتریسیتهٔ جسم در این نواحی تخلیه

می‌شود . الکترونها در حین خروج به مولکولهای هوا برخورد کرده آنها را نیز به‌جلو می‌رانند و در نتیجه جریان هوای ضعیفی ایجاد می‌شود، چنانکه اگر شمع روشنی را درمجاورت قسمت نوکدار جسم الکتریسیته‌داری بگذاریم،

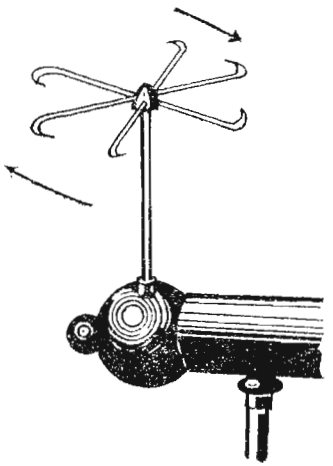


شکل ۱۸۰

مشاهده خواهد شد که شعلهٔ شمع منحرف می‌شود (شکل۱۸۱)، واگر قسمت نوکدار جسم بتواند بچرخد (شکل ۱۸۲) ، براثر فشار الکتریکی ، جسم



شکل ۱۸۱



شکل ۱۸۲

شروع به دوران می‌کند (درست مانند فشفشه ، و فوارهٔ آبی‌گردان) .

الکتریسیته ، به همان ترتیب که بیشتر از نوکهای تیز جسم خارج می‌شود ، از خارج نیز بیشتر از نوکهای تیز داخل جسم می‌شود .

در ساختمان برقگیر که بعداً شرح داده خواهد شد از این خاصیت استفاده می‌شود .

الکتریسیتهٔ جوی

برق ، صاعقه ، رعد - آزمایشهای متعدد نشان داده است که هوا، اعم از اینکه طوفانی ، بارانی یا خشك باشد، کمابیش بار الکتریکی مثبت یا منفی دارد . الکترونها و یونهای موجود در هوا ، هنگام ایجاد ابر که درحقیقت قطرات ریز آب معلق در هواست ، مراکز تجمع ذرات آب را تشکیل می‌دهند . ابرها ممکن است بار الکتریکی مثبت یا منفی داشته باشند . باردار شدن یك پارچه ابر ممکن است براثر مالش با هوا یا براثر القا توسط یك پارچه ابر باردار دیگر حاصل شود. اگر دو پارچه ابر که بارهای ناهمنام دارند به هم نزدیك شوند ، عمل تخلیهٔ الکتریکی انجام می‌گیرد و این تخلید بصورت جرقهٔ بسیارشدید و دراز ظاهر می‌شود که همان **برق** است ، درازای برق ممکن است به ۱۵ تا ۲۰ کیلومتر برسد . این جرقهٔ دراز بر اثر وجود قطرات آب بین دو قطعه ابر حاصل می‌شود . یعنی تخلیهٔ الکتریکی بین دو قطرهٔ آب صورت می‌گیرد .

اگر تخلیهٔ الکتریکی بین یك قطعه ابر و زمین انجام‌گیرد ، برق حاصل را **صاعقه** گویند . صاعقه معمولاً روی نقاطی که نسبت به نقاط مجاور دیگر بلندتر باشد می‌افتد ، مانند تك درخت وسط بیابان یا ساختمانهای بلند. بدین جهت در مواقع طوفانی هرگز نباید زیردرختها ایستاد . تولید برق معمولاً با صدای شدیدی همراه است که **رعد** نامیده می‌شود . این صدا بر اثر تخلیهٔ الکتریکی ، همچنین بر اثر انعکاس صدا

در اشیای مجاور ، ایجاد می‌شود . غرش طولانی رعد به واسطهٔ تخلیه‌های متوالی است که در قطعات مختلف ابر صورت می‌گیرد .

برقگیر - چنانکه دیدیم تخلیهٔ الکتریکی میان ابر باردار وزمین، معمولاً درنقاط مرتفع و نوکدارانجام می‌گیرد. بدین ترتیب ساختمانهای بلند دائماً در معرض خطر برق هستند . برای جلوگیری از خطر برق از برقگیر استفاده می‌کنند .

برقگیر میله‌ای است فلزی به‌بلندی ۵ تا ۶ متر که بالای ساختمان نصب می‌شود . قسمت بالای آن به‌میلهٔ مسی نوك‌تیزی‌که مطلا شده (برای جلوگیری از اکسیداسیون مس) منتهی شده‌است . قسمت پایین‌آن به‌وسیلهٔ یك سیم مسی به زمین مربوط می‌شود . برای اینکه ارتباط سیم با زمین کامل باشد، سیم را دور ورقهٔ مسی بزرگی پیچانده وآن را داخل چاه‌آب می‌کنند . درساختمانهای معمولی داخل شهر، احتیاجی به برقگیر نیست ولی بهتر است که در مواقع طوفانی سیم آنتن رادیو را مستقیماً به سیم زمین متصل‌کرد . چرا ؟

برقگیراولین دفعه در اواخرقرن هیجدهم به‌توسط فرانکلین اختراع و بکار برده شد .

آلکساندر ولتا (۱۸۲۷ ــ ۱۷۴۵) یکی از دانشمندان ایتالیاست که نخستین پیل را اختراع کرد .

فصل دوم

الکتریسیتهٔ جاری

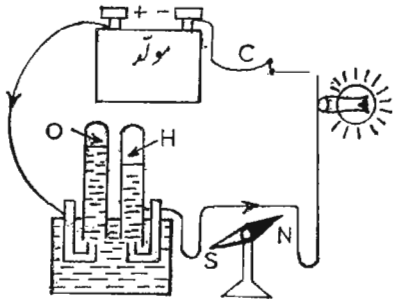
تاریخچه ــ درسال ۱۷۸۹ ، هنگامی که گالوانی (۱۷۹۸ـ۱۷۳۷) ، پزشك ایتالیایی ، به مطالعهٔ دستگاه عصبی قورباغه مشغول بود و پس از تشریح آن را به وسیلهٔ چنگالهای مسی به یك سیم آهنی آویزان کرده بود ، مشاهده کرد که هروقت چنگال مسی با بند آهنی تماس پیدا می‌کند،

انقباض شدیدی در ماهیچه‌های قورباغه رخ می‌دهد . گالوانی در آن زمان چنین پنداشت که این کیفیت بر اثر جریان سیال مجهولی است که در بدن قورباغه وجود دارد .

ولتا در سال ۱۸۰۰ این آزمایش را با دقت بیشتری انجام داد و چنین اظهارنظر کرد که انقباض ماهیچهٔ قورباغه نتیجهٔ عبور جریان الکتریسیته‌ای است که به واسطهٔ وجود دو فلز مختلف مس و آهن ومایع داخل بدن قورباغه حاصل می‌شود . ولتا برای اثبات نظریهٔ خود مولد الکتریسیته‌ای ساخت که به نام خود او به **پیل ولتا** مشهور است .

گذشته از پیل ولتا ، مولدهای دیگری نیز بعداً ساخته شده است که امروز در صنعت و آزمایشگاهها مورد استفاده‌اند . طرز کار پیل ولتا و بعضی دیگر از مولدها بعداً شرح داده خواهد شد .

آثار جریان الکتریسیته ــ آزمایش ــ دو قطب مولدی را به توسط سیمی به‌یك ظرف تجزیهٔ آب اسیددار (ولتامتر) و یك لامپ کوچك وصل می‌کنیم و در زیر سیم یك عقربهٔ مغناطیسی NS قرار می‌دهیم . مادامی که کلید C باز است اتفاقی مشهود نمی‌شود ولی ، بمحض اینکه کلید بسته شد (شکل ۱۸۳) ، مشاهده می‌شود که :



شکل ۱۸۳

اولاً ــ آب به‌عناصر تشکیل‌دهندهٔ خودیعنی اکسیژن و ئیدروژن تجزیه می‌شودکه در لوله‌های امتحانی جمع می‌شوند ؛

ثانیاً ـ سیم چراغ گرم وسرخ می‌شود ، یعنی گرما پدید می‌آید ؛

ثالثاً ـ عقربهٔ NS ازوضع اولیهٔ خود منحرف یعنی تولید میدان مغناطیسی می‌شود .

ازاین آزمایش نتیجه می‌شودکه جریان الکتریسیته دارای سه اثر **شیمیایی** ، **گرمایی** و **مغناطیسی** است. البته تجزیهٔ شیمیایی درصورتی رخ می‌دهد که درمدار یك محلول هادی الکتریسیته یعنی **الکترولیت** وجود داشته باشد .

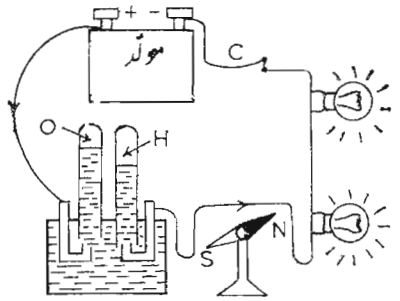
مقدار الکتریسیته

چنانکه درآزمایش بالا دیدیم ، براثر عبور جریان الکتریسیته ، آب تجزیه شده و ئیدروژن و اکسیژن حاصل در دو لولهٔ امتحان جمع می‌شوند . آشکار است که این پدیده بر اثر عبور مقداری الکتریسیته ظاهر می‌شود . با توجه به مطالبی‌که در بارهٔ الکتریسیتهٔ ساکن گفته شد، چون جریان الکتریسیته همان جریان الکترونها در مدار است، می‌توان گفت‌که مقدار الکتریسیته‌ای‌که در مدت معینی از یك مدار عبورمی‌کند متناسب است با عدهٔ الکترونهایی‌که در این مدت در سیم جری می‌شود. امروز می‌دانیم‌که مقدار مواد تجزیه شده ، مثلاً ئیدروژن و اکسیژن در تجزیهٔ آب ، متناسب با عدهٔ این الکترونهاست . پس می‌توان گفت که **مقدار ئیدروژن یا اکسیژن حاصل‌شده متناسب است با مقدار الکتریسیته‌ای‌که از مدار عبورکرده است .**

مقدار الکتریسیته را با واحدی به نام **کولن (C)** می‌سنجند . **برای تهیهٔ یك گرم ئیدروژن (۱۱/۲ لیتر در شرایط متعارفی)، ۹۶۵۰۰**

کولن الکتریسیته لازم است .

شدت جریان ـ در آزمایش بالا به جای یك چراغ ، دو چراغ که بطور توالی به یکدیگر وصل شده‌اند قرار می‌دهیم (شکل ۱۸۴).



شکل ۱۸۴

مشاهده می‌کنیم‌که همان آثار ، ولی باشدت‌کمتر ، ظاهر می‌شود، بدین معنی‌که حبابهای گازهای ئیدروژن‌واکسیژن‌کمترمتصاعد می‌شود ، شدت نور چراغ نیز کمترازحالت پیش است وعقربهٔ مغناطیسی کمتر منحرف می‌شود . در این صورت می‌گویند که شدت جریان ازحالت پیش‌کمتر است یعنی ، درمدت معین ، مقدار الکتریسیتهٔ کمتری عبور کرده است .

بنا بر تعریف **شدت جریان در یك مدار مقدار الکتریسیته‌ای است که دریك ثانیه از آن عبور می‌کند .**

بنا بر این هرچه شدت جریان زیادتر باشد مقدار الکتریسیته‌ای که در واحد زمان از مدار عبور می‌کند بیشتر و در نتیجه آثار جریان شدیدتر است .

با توجه به آنچه در بارهٔ الکتریسیته ذکر کردیم ، می‌توان گفت که شدت جریان متناسب است با عدهٔ الکترونهایی که در هر ثانیه از مداری جاری می‌شود .

شدت جریان را با واحدی به نام **آمپر (A)** می‌سنجند . **اگر از**

مداری در هر ثانیه یك کولن الکتریسیته جاری شود شدت جریان درمدار یك آمپر است .

رابطهٔ شدت جریان و مقدار الکتریسیته ـ دانستیم که اگر جریانی به شدت یك آمپر در مدت یك ثانیه از مداری عبور کند ، یك کولن الکتریسیته در مدار جاری شده است . پس اگر جریانی به شدت I آمپر در t ثانیه از مدار بگذرد ، مقدار الکتریسیتهٔ جاری شده عبارت خواهد بود از :

$$\underset{\text{کولن}}{Q} = \underset{\text{آمپر}}{I} \times \underset{\text{ثانیه}}{t}$$

در صنعت ، مقدار الکتریسیته را با واحد دیگری نیز می‌سنجند به نام **آمپرساعت** که با Ah نشان می‌دهند .

اگر جریانی به شدت یك آمپر به‌مدت یك ساعت از مداری عبور کند ، مقدار الکتریسیتهٔ جاری شده معادل یك **آمپرساعت** است . طبق فرمول $Q=It$:

یك ساعت × یك آمپر = یك آمپرساعت

بنابراین یك آمپر ساعت معادل ۳۶۰۰ کولن است .

مثال ۱ ـ جریانی به‌شدت ۲A در مدت ۱۵دقیقه از ولتامتری عبور کرده است . چند کولن الکتریسیته از آن گذشته و در شرایط معمولی چند سانتیمتر مکعب ئیدروژن بدست آمده است ؟

حل: $Q=It$

$t=۱۵\times۶۰=۹۰۰$ ثانیه

پس : $Q=۲\times۹۰۰=۱۸۰۰C$

وچون ۹۶۵۰۰کولن الکتریسیته $۱۱۲۰۰cm^3$ ئیدروژن (درشرایط متعارفی) ازاد می‌کند ، حجم V ئیدروژن حاصل عبارت خواهد بود از :

$$V=\frac{۱۸۰۰\times۱۱۲۰۰}{۹۶۵۰۰}\#۲۰۹cm^3$$

مثال۲ـ برای پرکردن یك باتری اتوموبیل، جریانی به‌شدت ۰/۵A به مدت ۲۴ ساعت ازآن عبور می‌دهند . تعیین‌کنید چند آمپر ساعت از باتری عبورکرده است ؟

حل : $Q=It$

یعنی $Q=۰/۵\times۲۴=۱۲$ آمپرساعت

این مقدار الکتریسیته برحسب‌کولن عبارت خواهد بود از :

$$Q=۱۲\times۳۶۰۰=۴۳۲۰۰C$$

تمرین

۱ ـ ازمداری درمدت ۱۰ دقیقه ۰/۱Ah الکتریسیته عبورکرده‌است. شدت جریان را حساب‌کنید . **جواب :** ۰/۶A

۲ ـ از یك ولتامتر جریانی به‌شدت یك‌آمپر عبورکرده وپس از مدتی $۱cm^3$ اکسیژن حاصل شده است. اگربخواهیم که در نصف همان مدت زمان $۳cm^3$ اکسیژن بدست آید ، شدت جریان چقدر باید باشد ؟

جواب : ۶A

۳ ـ جریانی به‌شدت یك میکروآمپر (۶−۱۰ آمپر) به مدت۲۴ ساعت ازمداری عبورمی‌کند . مقدار الکتریسیتهٔ جاری شده دراین مدت چقدراست ؟

جواب : ۰/۰۸۶۴C

۴ ـ یك آکومولاتور می‌تواند ۹۰Ah الکتریسیته بدهد . اگر این مولد در مدت ۱۰ ساعت در مداری تخلیه شود شدت جریان چقدر است ؟

جواب : ۹A

۵ ـ از یك چراغ الکتریکی جریان ۰/۲۵A عبور می‌کند . اگر چراغ دو ساعت روشن باشد مقدار الکتریسیته‌ای‌که از لامپ عبور کرده چقدر است ؟ **جواب :** ۰/۵Ah

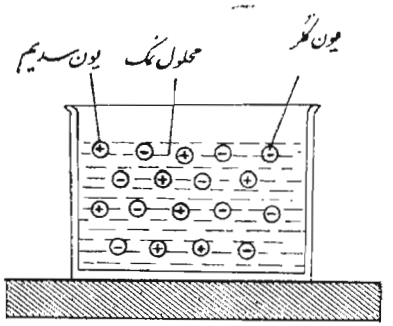
فصل سوم

آثار شیمیایی جریان الکتریسیته

الکترولیز

الکترولیت ـ بعضی از محلولها و ترکیبات مذاب هادی جریان الکتریسیته‌اند، و اگرجریان الکتریسیته از داخل آنها عبورکند تجزیه می‌شوند ، این اجسام را **الکترولیت** و عمل تجزیهٔ الکتریکی را **الکترولیز** می‌نامند . اسیدها ، بازها و نمکهای محلول در آب ، از مهمترین الکترولیتها هستند . برای فهم عمل تجزیهٔ الکتریکی باید فرضیهٔ **آرنیوس**[1] را یادآور شویم .

بنابرفرضیهٔ آرنیوس ، در هرمحلول الکترولیت ، بی‌آنکه جریان الکتریسیته از آن بگذرد وفقط براثر حل شدن جسم درمایع ، تمام یا قسمتی از مولکولهای آن یونیزه می‌شوند یعنی به ذره‌هایی که الکتریسیتهٔ مثبت یا منفی دارند تفکیک می‌شوند (شکل ۱۸۵) . هریك از این ذره‌های الکتریسیته‌دار را **یون** می‌نامند . مثلا بر اثر حل کردن نمك

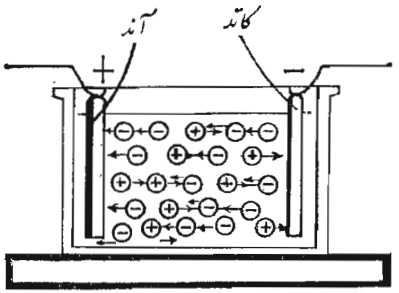


شکل ۱۸۵

۱ ـ Svante Arrhénius (۱۹۲۷–۱۸۵۹) دانشمند سوئدی، تحقیقات پرارزشی دربارهٔ تجزیهٔ الکترولیتها انجام داده است .

طعام در آب ، قسمتی از مولکولهای آن هریك به دو یون Na^+ و Cl^- تفکیك می‌شود .

عبورجریان از یك الکترولیت ـ اگرمحلول الکترولیت‌را در مداری که دو سر آن به یك مولد وصل شده است بگذاریم یونها به سوی قطبهای (الکترودها) ناهمنام رهسپار می‌شوند . مثلاً در محلول نمك طعام یون سدیم ، چون بار مثبت دارد ، به سوی قطب منفی یا **کاتد** ویون کلر ، چون بار منفی دارد ، به‌سوی قطب مثبت یا **آند** رهسپار می‌شود (شکل ۱۸۶) . بنا بر این دو جریان یونی در دو جهت معکوس بوجود می‌آید . یونهای مثبت چون به طرف کاتد می‌روند



شکل ۱۸۶

کاتیون ویونهای منفی چون به‌طرف آند می‌روند **آنیون** نام یافته‌اند .

در آند یونهای منفی الکترونهای خود را از دست می‌دهند ، در حالی‌که در کاتد ، یونهای مثبت الکترون می‌گیرند . این عمل مانندآن است‌که الکترونها ازکاتد به‌آند برده شوند. بنابراین جریان الکتریسیته، که جهت آن مخالف جهت جریان الکترونهاست ، در داخل الکترولیت از آند به‌کاتد است .

یادآوری ـ دستگاهی را که در آن تجزیهٔ الکتریکی صورت می‌گیرد **ولتامتر** می‌نامند .

قوانین کیفی الکترولیز

از آزمایش با الکترولیتهای مختلف نتایجی بدست می‌آید که به **قوانین کیفی الکترولیز** موسوم است و به این صورت بیان می‌شود :

۱ ـ محصولات تجزیهٔ الکتریکی جز در قطبها ظاهر نمی‌شود ؛
۲ ـ در یك تجزیهٔ الکتریکی ساده ، ئیدروژن یا فلزات همواره در قطب منفی ظاهر می‌شوند .

اکنون به ذکر چند مثال از تجزیهٔ الکتریکی می‌پردازیم :

۱ـ **تجزیهٔ آب درمحلول اسید سولفوریك ـ** آب خالص‌هادی برق نیست ، زیرا در آب خالص عدهٔ یونهای H^+ و $(OH)^-$ بسیار ناچیز است و از این سبب برای رساناکردن آب و تجزیهٔ آن باید کمی اسیدسولفوریك یا سود بدان افزود .

اگر به آب خالص مقداری اسید سولفوریك بیفزاییم ، محلول دارای یونهای H^+ و SO_4^{--} خواهد شد وچون این محلول را درمدار یك مولد بگذاریم ، یونها به‌طرف قطبهای ناهمنام خود جذب می‌شوند و جریان برقرار می‌شود . یون H^+ پس از خنثی شدن به صورت گاز ئیدروژن از قطب منفی متصاعد می‌شود و یون SO_4^{--} پس از آنکه دو الکترون در قطب مثبت از دست داد به صورت رادیکال بی‌ثبات SO_4 درمی‌آید. این رادیکال آناً باآب محلول ترکیب می‌شود واسیدسولفوریك وگاز اکسیژن تولید می‌کند[1] . اسید درآب حل شده و اکسیژن از قطب مثبت متصاعد می‌شود . این فعل و انفعالات را می‌توان چنین خلاصه‌کرد:

$$H_2 \quad SO_4$$
$$\swarrow \qquad \searrow$$
$$2H^+ \qquad SO_4^{--}$$
$$\swarrow \qquad \searrow$$
کاتد — آند

$$SO_4^{--} \longrightarrow SO_4 + 2e^-$$
$$2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2\uparrow \qquad SO_4 + H_2O \longrightarrow SO_4H_2 + \tfrac{1}{2}O_2\uparrow$$

۱ ـ درآغاز رادیکال SO_4 به‌صورت $SO_3 \times O$ درآمده SO_3 با آب ترکیب و تولید جوهر گوگرد می‌کند و اکسیژن متصاعد می‌شود .

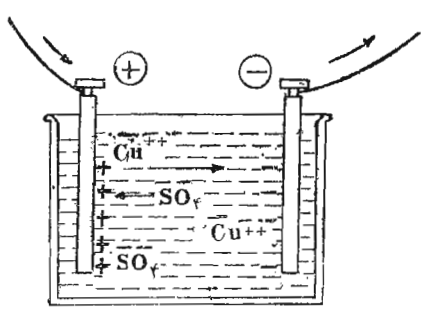
چنانکه مشاهده می‌شود ، اسیدی که تجزیه شده بود دوباره تولید می‌شود ونتیجهٔ نهایی عمل تجزیهٔ آب‌است. درفرمولهای بالا e^- علامت الکترون است .

۲ ـ **تجزیهٔ آب در محلول سود** ـ سود، براثر حل‌شدن درآب، به دو یون Na^+ و $(OH)^-$ تجزیه می‌شود و براثر عبور جریان فعل و انفعالهای زیر رخ می‌دهد :

$$2Na \quad OH$$
$$\swarrow \qquad \searrow$$
$$2Na^+ \qquad 2(OH)^-$$
$$\swarrow \qquad \searrow$$
$$2Na^+ + 2e^- \text{(ازکاتد)} \rightarrow 2Na \qquad 2(OH)^- \rightarrow 2(OH) + 2e^- \text{(به‌آند)}$$
$$2Na + 2H_2O \rightarrow 2NaOH + H_2\uparrow \qquad 2(OH) \rightarrow H_2O + \tfrac{1}{2}O_2\uparrow$$

چنانکه مشاهده می‌شود ، سود تجزیه شده دوباره حاصل می‌شود ونتیجه تجزیهٔ آب است .

۳ ـ **تجزیهٔ سولفات مس ـ آب فلزکاری** ـ در ولتامتری که دارای قطبهای مسی است، محلول سولفات مس ریخته وجریان الکتریسیته را ازآن عبور می‌دهیم . براثر حل‌شدن سولفات درآب،مولکول سولفات مس به دو یون Cu^{++} و SO_4^{--} تبدیل می‌شود.هنگام عبور جریان ، یون مس به‌سوی قطب منفی رفته و پس از تخلیهٔ بار الکتریکی خود به صورت اتم مس دراین‌قطب‌ظاهر می‌شود (شکل۱۸۷) . یون سولفات در



شکل ۱۸۷

قطب مثبت دو الکترون از دست داده و به رادیکال بی‌ثبات SO_4 تبدیل می‌شود. این رادیکال با قطب مثبت (مس) ترکیب شده وسولفات مس تولید می‌کند. سولفات حاصل در آب حل شده و دوباره به دویون SO_4^{--} و Cu^{++} تجزیه می‌گردد و عمل تکرار می‌شود. این فعل و انفعالات را می‌توان چنین خلاصه نمود:

$$SO_4 \rightarrow SO_4^{--} \rightarrow SO_4^{--} \rightarrow SO_4 + 2e^- \text{(به آند)}$$

$$Cu \rightarrow Cu^{++} \rightarrow Cu^{++} + 2e^- \text{(از کاتد)} \rightarrow Cu$$

$$SO_4 + Cu \rightarrow SO_4Cu$$

چنانکه مشاهده می‌شود، مقدار سولفات مس حل شده در محلول ثابت می‌ماند و نتیجهٔ نهایی عمل، انتقال مس از قطب مثبت به‌قطب منفی است. یعنی انرژی الکتریکی فقط صرف حمل اتمهای مس آند به‌سوی کاتد می‌شود.

این آزمایش اساس آب فلزکاری است. چنانکه اگر درآزمایش بالا به جای قطب منفی یك جسم هادی مثلاً قاشق یا چنگال بگذاریم، پس از مدتی روی آن از یك ورقهٔ مس پوشیده می‌شود. این آزمایش را می‌توان تعمیم داده و برای آب فلز کاری با فلزات دیگر نیز بکار برد. مثلاً برای آب نقره، قطب مثبت را یك ورقهٔ نقره و الکترولیت را یك محلول نمك نقره (بهتر است از سیانورهای مضاعف نقره استفاده شود) اختیار می‌کنند.

برای آب فلزکاری باید این سه نکتهٔ اساسی مراعات شود:

۱ـ جسمی‌که باید بر آن آب فلز داده شودکاملا تمیز باشد و به‌قطب منفی وصل شود. اگر جسم کاملاً تمیز نباشد، آب فلز یکنواخت ومحکم نخواهد بود؛

۲ ـ الکترولیت یکی از نمکهای محلول فلز روپوش باشد؛

۳ ـ آند از فلزی باشدکه منظور دادن آب آن فلز است.

موارد استعمال آب فلزکاری ـ آب فلزکاری موارد استعمال فراوان دارد. درتهیهٔ فلز خالص از فلز ناخالص بکار می‌رود، بدین‌ترتیب که در ظرف تجزیهٔ الکتریکی، یك قطعهٔ نازك وخالص از فلزرا به‌جای کاتد می‌گذاریم، سپس ظرف را از محلول نمك همان فلز پر می‌کنیم و به جای آند قطعهٔ بزرگی از همان فلزکه خالص نیست اختیار می‌کنیم. براثر عبورجریان، مرتباً اتمهای فلز از قطعهٔ ناخالص جدا شده برروی قطعهٔ خالص می‌نشینند و ناخالصیها در ته ظرف جمع می‌شود. با ادامهٔ این عمل، می‌توان قطعات بزرگ فلز خیلی خالص بدست آورد.

آب فلزکاری در تهیهٔ قالبهای فلزی، حروف چاپ، و نیز برای جلوگیری از فساد بعضی از فلزات مانند آهن (روی آهن از یك ورقه نیکل یاکروم پوشیده می‌شود) و برای تزیین (آب نقره و آب طلا) بکار برده می‌شود.

فعل وانفعالهای ثانوی ـ از مثالهایی‌که ذکر شد معلوم می‌شود که غالباً اتمها و رادیکالهایی‌که پس ازخنثی شدن یونها درظروف تجزیه حاصل می‌شود، فعل و انفعالهای دیگری را موجب می‌شوند که به **فعل و انفعالهای ثانوی** موسوم است. بطورکلی این فعل وانفعالها را می‌توان به این سه دسته تقسیم‌کرد:

۱ ـ اثر اتمها یا رادیکالها بر آب ، مانند رادیکال SO_4 بر آب در تجزیهٔ آب اسیددار ؛

۲ـ تجزیه و ترکیب یك رادیکال بی‌ثبات، مانند رادیکال اکسیدریل OH در تجزیهٔ سود ؛

۳ـ اثر اتمها و رادیکالها برقطبهای ولتامتر ، مانند ترکیب رادیکال سولفات با فلز آند در تجزیهٔ سولفات مس .

با دقت درفعل وانفعالهای ثانوی می‌توان نتیجهٔ تجزیهٔ الکتریکی یك الکترولیت را پیش‌بینی‌کرد .

تمرین۱ـ نتایج تجزیهٔ الکتریکی محلول سولفات مس‌را در ولتامتری که دارای قطبهای پلاتینی است معلوم کنید .

فعل و انفعالها به‌شرح زیر است :

SO_4^{--} ↓ آند SO_4 — Cu^{++} ↓ کاتد $Cu\downarrow$

$$SO_4 + H_2O \rightarrow SO_4H_2 + \frac{1}{2}O_2\uparrow$$

یعنی مس در قطب منفی رسوب می‌کند و اکسیژن در قطب مثبت متصاعد می‌شود (اسید سولفوریك بر پلاتین تأثیر ندارد) .

تمرین۲ـ نتایج تجزیهٔ الکتریکی محلول سولفات‌سدیم را درولتامتری که دارای قطبهای پلاتینی است معلوم‌کنید .

فعل و انفعالها به شرح زیر است :

SO_4^{--} ↓ آند — $2Na^{+}$ ↓ کاتد

$$SO_4 + H_2O \rightarrow SO_4H_2 + \frac{1}{2}O_2\uparrow \qquad 2Na + 2H_2O \rightarrow 2NaOH + H_2\uparrow$$

یعنی در قطب مثبت اسید سولفوریك و در قطب منفی سود محرق ایجاد می‌شود. اگر دوقطب نزدیك همدیگر باشند فعل و انفعال زیر انجام می‌گیرد :

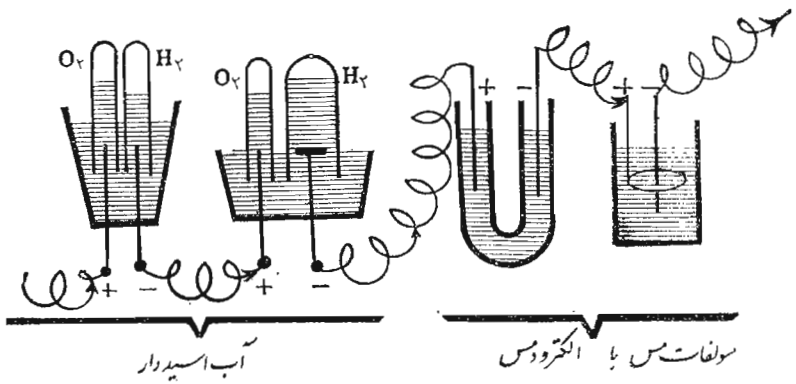
$$SO_4H_2 + 2NaOH \rightarrow SO_4Na_2 + 2H_2O$$

در این حال نتیجهٔ عمل فقط تجزیهٔ آب است .

یادآوری ـ برای اینکه جسم‌حاصل درنتیجهٔ تجزیهٔ الکتریکی روی قطبهای ولتامتر تأثیر نکند ، معمولا قطبها را از پلاتین یا از زغال قرع می‌سازند .

قوانین کمّی الکترولیز ـ قوانین فاراده[1]

آزمایش ۱ ـ چهار ولتامتر اختیارمی‌کنیم که ازحیث شکل‌ظروف وسطح مایع ووضع‌قرارگرفتن الکترودها باهم متفاوتند وآنهارا بطورسری



شکل ۱۸۸

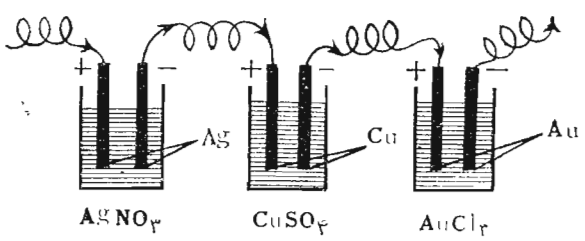
درمدارمولدی قرار می‌دهیم (شکل۱۸۸) . در دو ظرف اول آب‌اسیددار

---

۱ - Michael Faraday (۱۷۹۱-۱۸۶۷) از دانشمندان انگلیسی است‌که علاوه برمطالعاتی‌که در بارهٔ قوانین تجزیهٔ الکترولیتها انجام داده است ، در مباحث دیگر فیزیك نیز (مانند القای الکترومانیتیك و مایع کردن گازها) آثار گرانبهایی از خود به یادگار گذاشته است . کلمات الکترود ، آند و کاتد را نخستین بار این دانشمند بکار برده است .

و در دو ظرف دیگر محلول سولفات مس می‌ریزیم . پس از عبور جریان مشاهده می‌شود که حجم ئیدروژن حاصل از تجزیهٔ آب در ولتامترهای آب اسیددار باهم برابرند و همچنین جرم مس رسوب یافته در ظرفهای سولفات مس با هم مساویند . بنابراین چنین نتیجه می‌گیریم که شکل ولتامتر و وضع الکترودها تأثیری در مقدار جسم حاصل از تجزیه ندارد ، لیکن اگر شدت جریان یا مدت عبور جریان را زیادتر کنیم ، مشاهده می‌کنیم که مقدار ئیدروژن حاصل یا مس آزاد شده نیز به‌همان نسبت زیاد می‌شود. یعنی مقدار جسم آزادشده در یك تجزیهٔ الکتریکی متناسب است با شدت جریان ومدت عبور جریان ، یعنی متناسب است با مقدار الکتریسیته‌ای که از مدار عبور کرده است .

آزمایش ۲ ـ در مداری سه ولتامتر بطور متوالی می‌گذاریم . در اولی محلول نیترات نقره با قطبهای نقره ، در دومی محلول سولفات مس



شکل ۱۸۹

با قطبهای مس و در سومی محلول کلرور طلا با قطبهای طلا می‌گذاریم (شکل ۱۸۹) . اگر آزمایش را آنقدر ادامه دهیم تا ۱۰۸ گرم نقره (یك اتم گرم) بر کاتد بنشیند ، مشاهده می‌شود که در همان مدت $\frac{۶۴}{۳}$ گرم مس و $\frac{۱۹۷}{۳}$ گرم طلا در دو ولتامتر دیگر بر کاتد نشسته است. باکمی توجه پیداست که صورت این کسرها جرم اتمی و مخرج آنها ظرفیت یا

والانس فلز مربوط است . این نسبت را **والانس‌گرم** گویند .

مقدار الکتریسیتهٔ ثابتی که یك والانس گرم از جسم را آزاد می‌کند **عدد فاراده** نامیده می‌شود وآن‌را با F نشان می‌دهند. آزمایشهای دقیق نشان می‌دهدکه هر کولن الکتریسیته ۱/۱۱۸ میلیگرم نقره ازمحلول نمك نقره آزاد می‌کند . بنا بر این برای آنکه یك اتم‌گرم نقره ، یعنی ۱۰۷/۸۸ گرم نقره آزاد شود مقدار الکتریسیتهٔ لازم برابرخواهدبود با :

$$\frac{۱۰۷/۸۸ \times ۱۰۰۰}{۱/۱۱۸} = ۹۶۵۰۰ C$$

F را در مسائل عموماً برابر عدد ۹۶۵۰۰ منظور می‌کنند ، اما ممکن است در بعضی از مسائل ، برای سادگی محاسبات . آن را برابر عددی دیگرکه نزدیك به این عدد باشد بحساب آورد .

از آزمایشهای ۱ و ۲ قوانین فاراده در الکترولیز نتیجه می‌شود:

جرم ماده‌ای‌که براثر عبور جریان از یك الکترولیت آزاد می‌شود به مقدارالکتریسیته‌ای‌که از محلول می‌گذرد بستگی دارد. اگر ازچند الکترولیت مختلف مقدارمعینی الکتریسیته عبورکند جرم ماده‌ای‌که‌آزاد می‌شودباوالانس گرم آن متناسب است .

فرمول کلی الکترولیز ـ اگر جرم اتمی یك فلز (یا ئیدروژن) A و ظرفیت آن n باشد ، والانس گرم آن $\frac{A}{n}$ خواهد بود . چون ۹۶۵۰۰ کولن $\frac{A}{n}$ گرم از آن فلز را آزاد می‌کند ، هرگاه Q کولن الکتریسیته از محلول نمك آن عبور کند جرم فلز آزاد شده (m) طبق تناسب

گرم $\frac{A}{n}$	۹۶۵۰۰ کولن
گرم m	Q کولن

عبارت خواهد بود از :

$$m=\frac{Q}{۹۶۵۰۰}\times\frac{A}{n}$$

یا

$$m=\frac{A}{n}\times\frac{It}{۹۶۵۰۰}$$

در این فرمولها m بر حسب‌گرم ، Q برحسب کولن ، I برحسب آمپر و t برحسب ثانیه بیان می‌شود .

یادآوری ـ مقدار عناصری را که به شکل گاز (مانند ئیدروژن واکسیژن) براثر تجزیهٔ الکتریکی بدست می‌آیند برحسب حجم آنها بیان می‌کنند و چون هراتم‌گرم از این اجسام درشرایط معمولی $۱۱۲۰۰cm^۳$ حجم اشغال می‌کند ، می‌توان فرمول جرمی بالا را به صورت حجمی و به شکل زیر نوشت :

$$V=\frac{۱}{۹۶۵۰۰}\times\frac{۱۱۲۰۰}{n}It$$

که در آن V حجم‌گاز بر حسب $cm^۳$ است .

مثال ـ با جریان ۵ آمپری ، آب اسیدداری را تجزیه می‌کنیم . جرم و حجم اکسیژن حاصل را پس از ۱۰ ثانیه در شرایط معمولی معلوم‌کنید.

حل : گرم $A=۱۶$ ، $n=۲$ ، آمپر $I=۵$ و ثانیه $t=۱۰$

$$m=\frac{۱۶\times۵\times۱۰}{۹۶۵۰۰\times۲}=۰/۰۰۴۱۴۵ \text{ گرم}$$

چون۳۲گرم اکسیژن ، در شرایط متعارفی، $۲۲۴۰۰cm^۳$ حجم اشغال می‌کند ، حجم اکسیژن حاصل مساوی خواهد بود با :

$$V=\frac{۲۲۴۰۰\times۰/۰۰۴۱۴۵}{۳۲}=۲/۹cm^۳$$

البته ممکن بود که حجم اکسیژن را مستقیماً از فرمول حجمی فاراده بدست آورد .

تعریف کولن ـ بنا به‌تعریف، یك‌کولن مقدار الکتریسیته‌ای است که ۱/۱۱۸ میلیگرم نقره را درکاتد یك ولتامتر نیترات نقره بنشاند .

تعریف آمپر ـ یك آمپر شدت جریانی است‌که بتواند ۱/۱۱۸ میلیگرم نقره را **درمدت یك ثانیه** درکاتد یك ولتامتر نیترات نقره بنشاند.

بارالکتریکی الکترون ـ چون یك اتم گرم از هر عنصر $N=۶/۰۲\times۱۰^{۲۳}$ (عدد آووگادرو) اتم دارد ، یك اتم گرم از هر عنصر در حین تجزیه $N.ne$ کولن و یك والانس گرم آن عنصر $Ne=\frac{Nne}{n}$ کولن بارالکتریکی حمل خواهد کرد . پس مطابق تعریف فاراده می‌توان چنین نوشت :

$$F=Ne\Rightarrow e=\frac{F}{N}=\frac{۹۶۵۰۰}{۶/۰۲\times۱۰^{۲۳}}=۱/۶\times۱۰^{-۱۹}C$$

یعنی بار الکتریکی الکترون $۱/۶\times۱۰^{-۱۹}$ کولن است[۱] .

تمرین

۱ ـ از ولتامتری که دارای الکترودهای مسی و محلول سولفات مس است جریانی عبور می‌دهیم . پس از یك ساعت و بیست دقیقه بر جرم کاتد ۲/۰۴گرم افزوده می‌شود . شدت جریان را حساب‌کنید ($Cu=۶۴$) .

جواب : ۱/۲۹ آمپر

۲ـ برای تهیهٔ کلر از محلول نمك طعام جریانی به‌شدت ۸۰۰ آمپر به

---

۱ ـ اگراز مداری یك‌کولن الکتریسیته بگذرد عدهٔ الکترونهای جاری شده مساوی خواهد بود با : $n=\frac{۱}{۱/۶\times۱۰^{-۱۹}}=۶۲۵\times۱۰^{۱۶}$. پس اگر در هر ثانیه از مداری ۶۲۵×۱۰^{۱۶} الکترون عبور کند ، گویند شدت جریان در مدار یك آمپر است .

مدت ده ساعت عبور می‌دهیم. حجم گاز حاصل را درشرایط متعارفی حساب کنید.

۳ـ هردو روی یك صفحهٔ نازك فلزی را آب نقره می‌دهیم ومی‌خواهیم که در هرساعت برضخامت قشر نقره ۰/۲mm اضافه شود. شدت جریان لازم برای هر dm^2 ازصفحه چقدرباید باشد؟ جرم مخصوص نقره $10/7 g/cm^3$ و جرم اتمی آن ۱۰۸ است .

۴ـ دو ولتامتر که یکی دارای محلول نیترات نقره و دیگری سولفات مس است بطور سری در مداری قرارگرفته‌اند . در هر ساعت ۲/۶۴ گرم مس جابجا می‌شود . جرم نقرهٔ رسوب شده دراین مدت چقدر است (Cu = ۶۴ ، Ag = ۱۰۸) ؟

جواب : ۸/۹۱ گرم

۵ـ برای تهیهٔ آلومینیم با طریقهٔ الکتریکی ، جریانی به‌شدت ۳۲۰۰۰ آمپرمصرف می‌شود. محصول روزانهٔ آلومینیم چقدراست ؟ اگر درهرروز ۲۲۰ کیلوگرم آلومینیم تهیه شود ، بازده عمل را حساب کنید (Al = ۲۷) .

۶ـ می‌خواهیم با تجزیهٔ الکتریکی محلول سود، ئیدروژن تهیه کنیم . فعل وانفعالات مربوط را بنویسید وحساب کنیدکه درهرساعت چندلیتر ئیدروژن بدست می‌آید درصورتی‌که شدت جریان ۳۰۰ آمپر باشد .

جواب : ۱۳۵ لیتر (در شرایط متعارفی)

۷ـ می‌خواهیم روی ورقهٔ فلزی ۲۵۴/۸۸ گرم نقره باطریقهٔ الکتریکی بنشانیم ، اگر شدت جریان ثابت و برابر $\frac{1}{10}$ A باشدچه‌مدت زمان‌لازم است؟

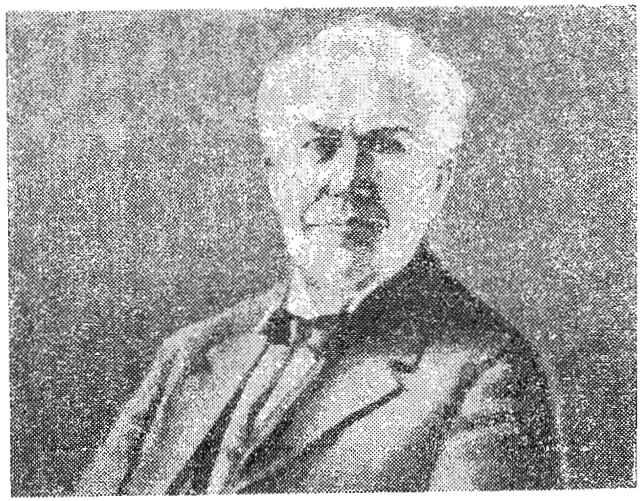
۸ـ ازآب اسیدداری جریان الکتریسیته عبور داده واکسیژن وئیدروژن حاصل را دریك ظرف جمع می‌کنیم . مشاهده می‌شود که حجم مخلوط گازها که در ۱۶ دقیقه و ۵ ثانیه بدست می‌آید $168 cm^3$ است . شدت جریان چقدر است ؟

جواب : یك آمپر

۹ـ یك سیم نقره به‌طول ۱۰cm و به‌قطر ۱mm ، آند یك‌ظرف تجزیهٔ الکتریکی را ،که محتوی نیترات نقره است، تشکیل می‌دهد. اگرشدت جریان ۰/۵ آمپرباشد، پس ازچه مدت قطرسیم ۰/۵mm می‌شود (Ag = ۱۰۸ ، جرم مخصوص نقره $10/5 g/cm^3$) ؟

جواب : ۱۸ دقیقه و ۲۵ ثانیه

۱۰ ـ می‌خواهیم روی یك ورقهٔ فلزی قشری از مس به ضخامت ۲۰۰ میکرون بنشانیم . شدت جریان ۲۶۰ میلی آمپر در هر dm^2 است. چه مدت باید جریان را عبور داد (جرم مخصوص مس $8 g/cm^3$ و جرم اتمی آن ۶۴ است) ؟



توماس ادیسون (۱۹۳۱ـ۱۸۴۷) مخترع بزرگ امریکایی

فصل چهارم

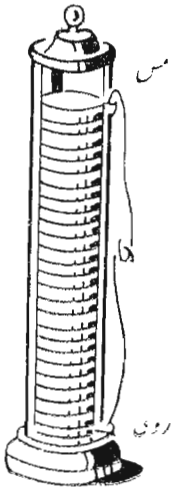
مولدهای شیمیایی

پیلها

پیلها مولدهایی هستند که در آنها انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود . اصولاً هر پیل از دو قطعه فلز از جنسهای مختلف (یا یك قطعه فلز و یك قطعه زغال) که داخل الکترولیتی قرار دارند تشکیل یافته است .

اولین پیل در آغاز قرن نوزدهم توسط **ولتا** ساخته شد ، سپس

پیلهای دیگری‌که شبیه پیل ولتا بوده است توسط دانشمندان دیگر تهیه شده و در صنعت و لابراتوارها مورد استفاده قرار گرفته است . امروز ، گذشته از پیلها ، از آکومولاتورها و بیشتر از دیناموها و آلترناتورها برای تولید برق استفاده می‌کنند . پیلها و آکومولاتورها ، که در آنها در نتیجهٔ تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی الکتریسیته تولید می‌شود ، **مولدهای شیمیایی** نامیده می‌شوند .

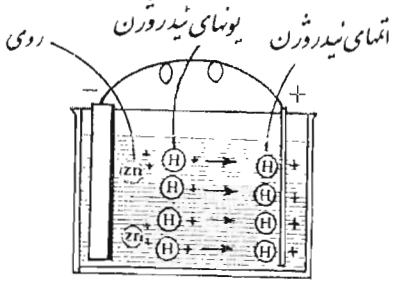


شکل ۱۹۰

پیل ولتا ـ اولین پیل ولتا از قرصهای مسی و رویی تشکیل یافته بود که یك در میان قرار گرفته و به توسط قرصهای نمدی ، که در محلول اسید سولفوریك خیس شده بود ، از هم جدا شده بودند (شکل ۱۹۰) . در این پیلها ، قرصهای مس قطب مثبت و قرصهای روی قطب منفی پیل را تشکیل می‌دهند و الکترولیت پیل همان محلول اسید سولفوریك است (کلمهٔ پیل به معنی ستون یا چیزهایی است که برروی هم انباشته شوند) .

طرز کار پیل ولتا ـ درظرفی پر از محلول اسید سولفوریك یك تیغهٔ مس و یك تیغهٔ روی می‌گذاریم. براثر حل شدن اسید درآب، قسمتی از مولکولهای آن به یونهای H^+ و SO_4^{--} تبدیل می‌شود . اسید سولفوریك در ورقهٔ روی تأثیر می‌کند و ذرات روی از تیغهٔ روی جدا شده و داخل محلول می‌شود . هر اتم‌که از این تیغه جدا می‌شود دو الکترون

از دست می‌دهد و به‌یون مثبت Zn^{++} تبدیل می‌شود . الکترونهایی‌که اتمهای روی از دست می‌دهند بر روی تیغه می‌مانند و آن را به قطب منفی تبدیل می‌کنند (شکل ۱۹۱) . یونهای Zn^{++} بشدت یونهای H^+ را ازخود می‌رانند وآنها را رو به‌قطب دیگر (مس) می‌فرستند. هر یون H^+ ، یك الکترون ازتیغهٔ مسی جذب می‌کند و به‌اتم خنثی (H) تبدیل می‌شودکه بعداً به‌صورت مولکول H_2 ازاین قطب متصاعد می‌شود. ضمناً تیغهٔ مسی‌که عده‌ای ازالکترونهای خود را از دست داده است به‌قطب مثبت تبدیل می‌شود . یونهای Zn^{++} و SO_4^{--} یکدیگر را جذب کرده سولفات روی تولید می‌کنند .



شکل ۱۹۱

در نتیجهٔ این فعل و انفعالات ، قطب روی آنقدر بار الکتریسیتهٔ منفی (الکترون) می‌گیردکه دیگر الکترون قبول نمی‌کند و فعل وانفعال پایان می‌یابد . **حال** اگر دو قطب را به وسیلهٔ سیمی از خارج به هم مربوط سازیم، الکترونهای زیادی ازقطب روی به‌سوی قطب مس می‌آیند وبارقطبها بدین ترتیب خنثی وفعل و انفعالات فوق دوباره شروع می‌شود. چنانکه می‌دانیم **جریان الکترونها ازقطب روی به‌سوی قطب مس درحقیقت همان جریان الکتریسیته است** (برخلاف سوی قراردادی جریان) .

این جریان در داخل پیل به وسیلهٔ حرکت یونها تأمین می‌شود .

معلوم است که در صورت بسته بودن مدار (اگر روی الکترودها

حبابهای گاز جمع نشده باشد) ، فعل و انفعالات هنگامی پایان می‌پذیرد که تمام روی به وسیلهٔ اسید خورده شود و به صورت سولفات روی داخل محلول گردد . این فعل و انفعالات را می‌توان با روابط زیر نشان داد :

$$Zn + 2H^+ + SO_4^{--} \rightarrow SO_4^{--} + Zn^{++} + H_2\uparrow$$

$$SO_4^{--} + Zn^{++} \rightarrow SO_4Zn$$

نیروی محرکهٔ پیل ولتا در حدود یك ولت است .

تعبیر پیدایش انرژی الکتریکی در پیل - فعل و انفعالات بالا را می‌توان چنین خلاصه کرد :

$$SO_4H_2 + Zn \rightarrow SO_4Zn + H_2$$

چنانکه می‌دانیم ، در این فعل و انفعال گرما تولید می‌شود . از آزمایشهای دقیق چنین معلوم شده است که به ازای هر گرم ئیدروژن آزاد شده ۲۴۸۰۰ کالری گرما ایجاد می‌شود ، درصورتی‌که در پیل ولتا با تولید یك‌گرم ئیدروژن فقط در حدود ۵۰۰۰ کالری‌گرما تولید می‌شود، یعنی تقریباً یك پنجم گرمای این فعل و انفعال به شکل گرما و بقیه به صورت انرژی الکتریکی درمی‌آید .

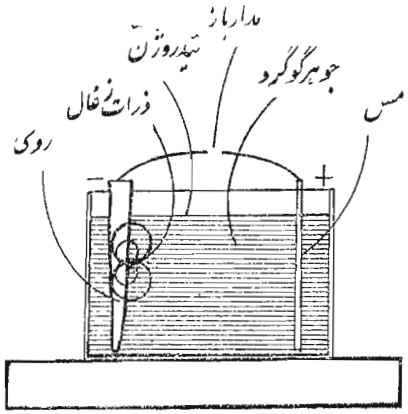
سوی جریان برق - از آنچه گفته شد نتیجه می‌شود که جریان الکتریسیته ، که همان جریان الکترونها در مدار است ، از قطب منفی به‌سوی قطب مثبت انجام می‌گیرد .

ولی قبل از آشنایی با ساختمان اتمی ، چون سوی جریان را بطور قرارداد در خارج پیل از قطب مثبت به طرف قطب منفی اختیار کرده بودند ، امروز نیز همین قرارداد را پذیرفته و سوی جریان را از

قطب مثبت به طرف منفی اختیار کرده‌اند . ضمناً باید متوجه بود که انتخاب سوی جریان هیچ تأثیری در قوانین الکتریسیته و استفاده‌هایی که از آنها می‌شود ندارد .

معایب پیل ولتا - پیل ولتا دو عیب اساسی دارد و به همین علت به جای آن ، پیلهای دیگری بکار می‌برند . عیب اول آن است‌که درحین عمل حبابهای ئیدروژن دور قطب مثبت پیل را می‌گیرند و تماس محلول اسیدسولفوریك با مس قطع می‌شود و در نتیجه شدت جریان بسیارضعیف می‌شود و پیل ازکارمی‌افتد. این‌کیفیت را فاسدشدن پیل یا پولاریزاسیون (Polarisation) نامند . این عیب با قرار دادن مادهٔ اکسیدکننده‌ای (مانند MnO_2) دراطراف قطب مثبت مرتفع می‌شود . این ماده را دافع فساد یا دپولاریزان (Depolarisant) می‌نامند .

عیب دوم پیل ولتا مربوط است به‌ذرات زغال یا ناخالصیهای دیگر که معمولاً در ورقه‌های روی تجارتی موجود است، یعنی محلول جوهر گوگرد در ناخالصی موجود اثر می‌کند و در نتیجه از شدت جریان‌کاسته می‌شود(شکل ۱۹۲). این عیب نیز با ملغمه‌کردن روی برطرف می‌شود .

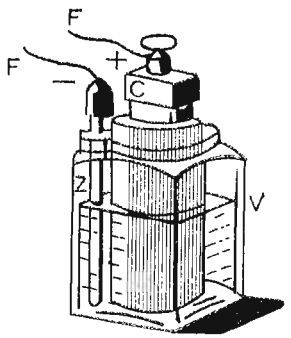


شکل ۱۹۲

اقسام پیلها - به علت معایب فوق ، به جای پیل ولتا ، پیلهای

دیگری بکار برده می‌شود . انواع پیلها زیاد است ، در زیر فقط چندنوع مهم آن شرح داده می‌شود :

پیل لکلانشه ـ این پیل توسط ژرژ **لکلانشه**[1] ساخته شده است . قطب مثبت آن زغال قرع ، قطب منفی آن یك ورقهٔ روی ، و الکترولیت پیل محلول اشباع شدهٔ نوشادر است (شکل ۱۹۳) .



شکل ۱۹۳

برای جلوگیری از فساد پیل ، چنانکه در شکل دیده می‌شود ، قطب مثبت آن (قطب زغالی) را درکیسه یا ظرف متخلخلی‌که پر از بی‌اکسید منگنز است می‌گذارند .

طرز کار پیل لکلانشه ـ قسمتی از مولکولهای نوشادر، درنتیجهٔ حل‌شدن درآب ، تجزیه می‌شود وبه‌صورت Cl^- و $(NH_4)^+$ درمی‌آید. یون کار به طرف ورقهٔ روی می‌رود و با روی ترکیب شده کلرور روی می‌دهد ($Cl_2+Zn\rightarrow ZnCl_2$) . بدین طریق تدریجاً ورقهٔ روی خورده می‌شود . یون $(NH_4)^+$ به سوی قطب زغال رفته ، پس ازتخلیهٔ بار الکتریکی خود ، به صورت رادیکال بی‌ثبات امونیم در می‌آید . این رادیکال ، بمحض تولید ، تجزیه می‌شود و امونیاك و ئیدروژن می‌دهد

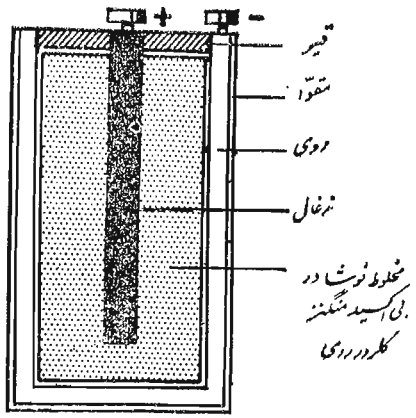
$$NH_4\rightarrow NH_3+H\uparrow$$

ئیدروژن حاصل بی‌اکسید منگنز را احیا می‌کند .

۱ ـ George Leclanché (۱۸۳۹-۱۸۸۲) .

این فعل و انفعالات نشان می‌دهد که تدریجاً از مقدار نوشادر محلول داخل پیل کاسته می‌شود ، لذا باید گاه گاهی مقداری نوشادر در آن ریخت . گذشته از این ، چون عمل دپولاریزاسیون بکندی انجام می‌گیرد، بهتراست‌که این پیل را درمواردی بکاربردکه مصرف الکتریسیته گاه بگاه باشد (مانند زنگ اخبار) . نیروی محرکهٔ این مولد درحدود ۱/۵ ولت است .

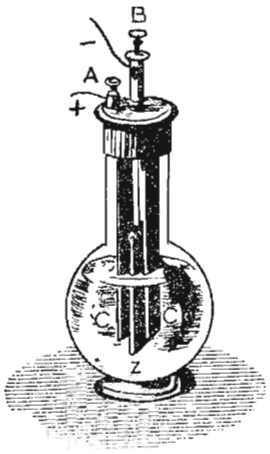
پیل خشك ـ جابجاکردن پیل لکلانشه، به‌علت وجود الکترولیت مایع ، بی‌اشکال نیست . این است که به جای آن پیل خشك ، که در حقیقت همان پیل لکلانشه است ، بکار برده می‌شود . در پیلهای خشك ، به جای محلول نوشادر ، **خمیر مرطوبی** از آن را بکار می‌برند (شکل ۱۹۴) . پیل خشك برای بکار انداختن زنگ اخبار ، رادیو ، چراغ جیبی و غیره مصرف می‌شود .



شکل ۱۹۴

پیل بیکرومات ـ دراین پیل قطب مثبت زغال قرع ، قطب منفی ملقمهٔ روی و الکترولیت مخلوط اسید سولفوریك و بیکرومات پتاسیم است[1] (شکل ۱۹۵) .

۱ـ الکترولیت این پیل ۲۵۰ گرم اسید و ۱۲۰ گرم بیکرومات درهر لیتر محلول دارد .



شکل ۱۹۵

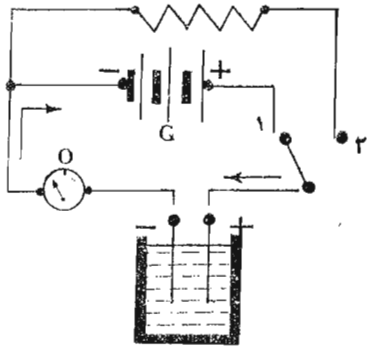
بیکرومات پتاسیم که جسم اکسیدکننده‌ای است ، برای جذب ئیدروژن حاصل یعنی به‌عنوان دافع فساد بکار برده شده است . نیروی محرکهٔ این پیل در حدود ۱/۹ ولت است و عمل دپولاریزاسیون سریع انجام می‌گیرد . اگر الکترودهای آن نزدیك هم باشند، مقاومت داخلی آن کم است و می‌توان جریان شدیدی از آن گرفت . هنگامی که از این پیل استفاده نمی‌شود ، لازم است که ورقهٔ روی از داخل محلول خارج شود تا اسید بر آن اثر نکند .

آکومولاتور یا انباره

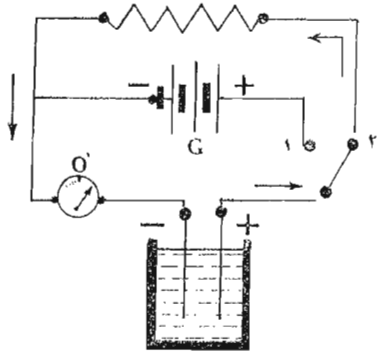
انباره دستگاهی است که می‌تواند انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کند و به هنگام لزوم همان انرژی را باز دهد . بدین ترتیب که اگر به‌این دستگاه انرژی الکتریکی داده شود، آن را به‌صورت انرژی شیمیایی ذخیره خواهدکرد ، و اگر قطبهای این دستگاه به مداری وصل شود انرژی شیمیایی ذخیره شده به انرژی الکتریکی تبدیل و به صورت جریان الکتریکی ظاهر می‌شود .

آزمایش - با دو تیغهٔ سربی پوشیده از ورقهٔ PbO و محلول اسیدسولفوریك ولتامتری تشکیل می‌دهیم. سپس مداری مانند شکل ۱۹۶ تشکیل می‌دهیم . با یك کلید دو طرفی می‌توان ولتامتر را یا به مولدی

که از چند پیل تشکیل شده است وصل کرد (اتصال ۱) یا رابطهٔ آن را از مولد قطع و مستقیماً به مدار خارج وصل کرد (اتصال ۲) . ابتدا کلید



شکل ۱۹۶



شکل ۱۹۷

را در وضعیت (۱) قرار می‌دهیم . جریانی از داخل ولتامتر عبور می‌کند و عقربهٔ آمپرسنج را منحرف می‌سازد . پس از مدتی کلید را در وضعیت (۲) می‌گذاریم (شکل ۱۹۷) . با اینکه مولد از مدار خارج می‌شود و ظاهراً نباید جریان از آمپرسنج عبورکند ، مشاهده می‌شودکه آمپرسنج عبورجریانی را خلاف سوی جریان اولی نشان می‌دهد، یعنی خود ولتامتر تبدیل به یك مولد شده است . در قسمت اول آزمایش ، دستگاه مانندیك ولتامتر عمل می‌کند و در نتیجهٔ تجزیهٔ محلول اسید ، اکسیژن در قطب مثبت و ئیدروژن در قطب منفی جمع می‌شود . این گازها در قطبها تأثیر می‌کنند و باعث فعل و انفعالات زیر می‌شوند :

در قطب مثبت $PbO + O \rightarrow PbO_2$

در قطب منفی $PbO + 2H \rightarrow Pb + H_2O$

پس تدریجاً قطب مثبت به PbO_2 و قطب منفی به Pb تبدیل می‌شود. بنابر این قطبها دیگر همجنس نیستند و براثر این اختلاف جنس قطبها ، دستگاه به صورت پیلی در می‌آید که قطب مثبت آن PbO_2 و قطب منفی آن Pb و الکترولیت آن محلول اسید سولفوریك است .

درقسمت دوم آزمایش ، هنگامی که کلید در وضعیت (۲) قرار می‌گیرد ، از دستگاه جریانی در خلاف سوی اولی عبور می‌کند ، یعنی آند ولتامتر قطب مثبت و کاتد آن قطب منفی مولد را تشکیل می‌دهد . در این حال ، بر اثر عبور جریان و تجزیهٔ اسید ، ئیدروژن و اکسیژن دور قطب مثبت و منفی جمع گشته و فعل و انفعالات زیر رخ می‌دهد :

درقطب مثبت $PbO_2+2H\rightarrow PbO+H_2O$

در قطب منفی $Pb+O\rightarrow PbO$

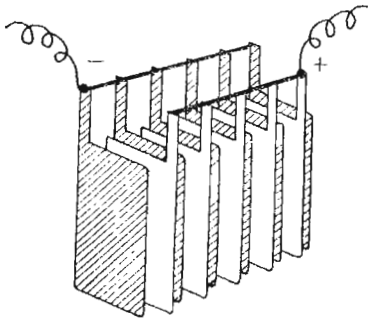
چنانکه دیده می‌شود دو قطب دوباره همجنس‌گشته و جریان قطع می‌شود . این آزمایش اساس انباره‌های سربی را معلوم می‌کند .

درانباره‌های سربی ، برای اینکه از ابتدا قطبها ناهمجنس باشند، قطب مثبت از ورقه‌های سربی که دارای حفره‌های زیادی است و در آنها قطعات Pb_3O_4 و Pb_2O_5 قرار داده شده است ، تشکیل یافته و قطب منفی ورقهٔ سربی است که از اکسید سرب (PbO) پوشیده شده است . الکترولیت انباره‌ها محلول ۲۵ در صد اسید سولفوریك خالص است (به جرم مخصوص ۱/۲۷) .

چون انرژی الکتریکی ذخیره شده در یك انباره متناسب است با سطح قطبهای آن ، هر یك از الکترودها را از چند صفحهٔ متشابه

(پلاك) می‌سازندکه به‌همدیگر متصلند (شکل ۱۹۸) .

شارژ یا پر کردن انباره - پس از اینکه انباره را ، تا بالای صفحه‌ها ، از محلول خالص ۲۵٪ اسید سولفوریك پر کردیم ، قطب مثبت آن‌را (که معمولا سرخ رنگ است) به‌قطب مثبت وقطب منفی آن را (که معمولا به‌رنگ خاکستری است) به قطب منفی مولدی وصل می‌کنیم (شکل ۱۹۹-I) . براثر عبور جریان ، ئیدروژن در قطب منفی اکسید سرب را به سرب تبدیل می‌کند :



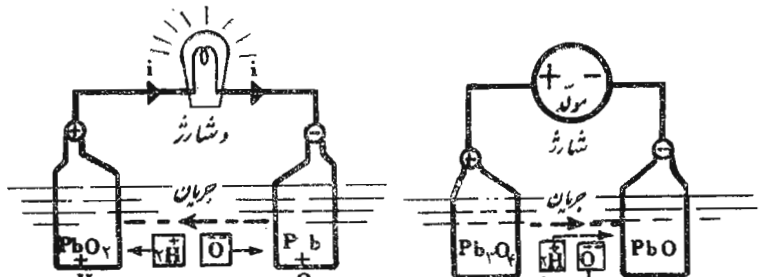
شکل ۱۹۸

$$PbO+2H\rightarrow Pb+H_2O$$

و اکسیژن در قطب مثبت صفحهٔ الکترود را اکسیده می‌کند :

$$Pb_3O_4+2O\rightarrow 3PbO_2$$

هنگامی که عمل احیا و اکسیداسیون در قطبها پایان یافت ،



شکل ۱۹۹

می‌گویندکه انباره پر شده است . اگرعبورجریان ادامه یابد ، الکترولیت تجزیه شده ، ئیدروژن و اکسیژن حاصل، درفضای بالای انباره ، بصورت مخلوط انفجارپذیری جمع می‌شود و اگر منافذی که در دهانهٔ انباره ، بخصوص برای جلوگیری ازجمع شدن‌گاز است ، باز نباشد، ممکن است بر اثر ازدیاد فشار ظرف انباره منفجر شود .

دشارژ یا تخلیهٔ انباره ـ هنگام تخلیهٔ انباره ، سوی جریان در خارج ، از قطب مثبت بدقطب منفی ، و در داخل محلول ، از قطب منفی بدقطب مثبت است (شکل ۱۹۹ـII) . **یونهای H^+ که همواره در سوی جریان حرکت می‌کنند** بدطرف قطب مثبت می‌روند و به H تبدیل می‌شوند و اکسید سرب قطب مثبت را احیا می‌کنند :

$$۳PbO_۲ + ۴H \rightarrow Pb_۳O_۴ + ۲H_۲O$$

همچنین اکسیژن حاصل ، قطب منفی را اکسید و بدPbO تبدیل می‌کند :

$$Pb + O \rightarrow PbO$$

بنابراین قطبها بتدریج بحالت اولیه باز می‌گردند .

مشخصات انباره‌های سربی ـ نیروی محرکهٔ هر انباره در رژیم عادی ۲ ولت است ، و هنگامی که کاملاً پر باشد ۲٫۲ ولت و موقعی‌که تخلیه شده و باید دوباره پر شود به ۱٫۸ ولت تنزل می‌کند[1] .

۱ ـ باید متوجه بود که اگر تخلیهٔ انباره ادامه یابد ، ئیدروژن حاصل شدیداً قطب مثبت را احیا وآن را به‌سرب تبدیل می‌کند . برای جلوگیری از این امر ، هنگامی‌که نیروی محرکهٔ انباره بر اثر تخلیه به ۱٫۸ ولت رسید ، عمل تخلیه را متوقف ساخته و آن را مجدداً پرمی‌کنند .

مقاومت داخلی انباره‌های سربی بسیارکم است (حدود $\frac{۱}{۱۰۰}$ اهم) . به همین علت اگر قطبین آنها اتصال پیدا کنند ، جریان شدیدی (توأم با جرقه) از دستگاه می‌گذرد و اگر این عمل ، ولو مدتی‌کوتاه ، تکرار شود عایق بین صفحات می‌سوزد و باتری دیگر بکار نمی‌خورد .

ظرفیت انباره ـ ظرفیت هر انباره مقدار الکتریسیته‌ای است‌که انباره می‌تواند در هنگام تخلیه پس دهد . ظرفیت انباره‌ها با آمپرساعت سنجیده می‌شود . مثلاً یك انبارهٔ ۴۰آمپرساعت می‌تواند چهار آمپر در مدت ۱۰ ساعت بدهد . باید دانست‌که در پرکردن و تخلیهٔ یك انباره ، هرگز نباید شدت جریانی‌که از داخل آن عبورمی‌کند عدداً بیش از $\frac{۱}{۱۰}$ ظرفیت‌آن باشد. مثلاً دریك انباره ۴۰آمپرساعت، حداکثرشدت جریانی کهازآن باید عبورکند۴۰ × $\frac{۱}{۱۰}$ یا ۴آمپراست، زیرا اگرجریان شدیدتری عبور کند ، صفحات داخل خراب شده به یکدیگر اتصال پیدا می‌کنند .

ضمناً متذکر می‌شویم‌که بازده یك انباره(نسبت مقدار الکتریسیتهٔ گرفته شده ازانباره هنگام تخلیه بهالکتریسیتهٔ داده شده هنگام پرکردن) بین ۸۵٪ و ۹۰٪ است .

اقسام دیگر انباره‌ها ـ معایب اساسی انباره‌های سربی عبارتند از: زیادی وزن ؛ خطراتصالی قطبها ؛ تأثیر شدید محلول اسیدسولفوریك در اعضای بدن و لباس .

برای احتراز از این معایب باتریهای دیگر ساخته شده است که در برخی از موارد جانشین انباره‌های سربی شده‌اند .

انباره‌های قلیایی ـ این انباره‌ها نخستین بار توسط ادیسون ساخته شد . الکترودهای آنها از آهن ونیکل یا ازکادمیم ونیکل است.

قطبهای انبارهٔ اولی از Ni (قطب مثبت) و Fe (قطب منفی) و الکترولیت آن محلول ۲۰ درصد پتاس است . قطب مثبت انبارهٔ دومی Ni و قطب منفی آن Cd والکترولیت آن محلول ۲۰ درصد پتاس است. نیروی محرکهٔ این انباره‌ها در حدود ۱٫۴ ولت و مقاومت داخلی آنها ۰٫۵ اهم است (به علت زیاد بودن مقاومت داخلی این انباره‌ها ، خطر خراب شدن آنها بر اثر اتصالی قطبها کمتر است) .

نوع دیگر ، انباره‌ای است که قطبهای آن از نقره (قطب مثبت) و روی (قطب‌منفی) و الکترولیت آن محلول زنکات پتاسیم (K_2ZnO_2) است .

موارد استعمال ـ از انباره‌ها برای روشن‌کردن چراغ معادن ، بکار انداختن موتورهای اتوموبیل ، به عنوان مولد برق در زیر دریاییها (هنگامی‌که زیردریایی زیر آب است) و بالاخره به عنوان مولد برق در لابراتوارها استفاده می‌شود . یکی از موارد استعمال دیگر انباره‌ها، در شبکه‌های جریان دائمی است، بدین معنی‌که در مواقعی از روزکه انرژی کمتری از یك مولد برق (دینامو)گرفته می‌شود ، مازاد انرژی آن صرف پرکردن عده‌ای باتری‌آکومولاتور می‌شود و درساعاتی‌که احتیاج به‌جریان زیادتری باشد ، از انرژی ذخیره شده در باتری استفاده می‌شود .

اُهْم (۱۸۵۴–۱۷۸۹) دانشمند آلمانی

فصل پنجم

مقاومت الکتریکی

گرمایی‌که بر اثر عبور جریان برق در مداری ظاهر می‌شود، ولو شدت جریان در تمام مدار یکسان باشد، در قسمتهای مختلف آن یکسان نیست . مثلاً با اینکه شدت جریانی‌که از سیمهای سیمکشی یك اتاق و سیم داخل لامپ آن اتاق عبور می‌کند برابر است ، سیم داخلی چراغ بشدت‌گرم می‌شود و دمای آن به بیش از ۲۰۰۰° می‌رسد ، در حالی که درسیمهای خارجی چندان‌گرمایی پدید نمی‌آید .

آزمایش ـ یك انباره را به‌یك قطعه سیم نازك آهنی و یك قطعه سیم نازك مسی بطور متوالی وصل می‌کنیم . بر اثر عبور جریان مشاهده می‌شود که سیم آهنی گرم وسرخ می‌شود درصورتی که سیم مسی تقریباً گرم نمی‌شود . بنابراین ، با اینکه شدت جریان در این دو سیم یکسان است (چون درمدار بطورمتوالی بسته شده‌اند) ، مقدارگرمای حاصل در آنها متفاوت است . یعنی گرمایی که بر اثر عبور جریان درمدار حاصل می‌شود علاوه برشدت جریان با عوامل دیگر نیز بستگی دارد .

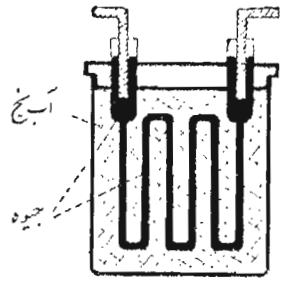
هرگاه از دو سیم متفاوت ، جریان یکسانی در مدت معین عبور کند ، هریك از سیمها که بیشتر گرم شود گویند که **مقاومت الکتریکی آن بیشتر است** ، و اگر گرمای حاصل در یکی از سیمها دو یا سه‌برابر گرمای حاصل در سیم دیگر باشد ، گویند که مقاومت آن سیم دو یا سه برابر مقاومت سیم دیگر است . بنابراین می‌توان مقاومت الکتریکی را چنین تعریف‌کرد :

مقاومت الکتریکی یك سیم‌کمیتی است متناسب با مقدار گرمایی که درآن سیم، براثر عبورجریان معین درمدت زمان معین ، ظاهرمی‌شود. از این رو واحد مقاومت را می‌توان از روی گرمای حاصل در سیم تعریف‌کرد .

تعریف واحد مقاومت ـ مقاومت یك سیم را با واحدی به نام **اهم** ،که با علامت Ω نمایش می‌دهند، می‌سنجند. یك اهم مقاومت سیمی است که اگر جریانی به شدت یك آمپر در مدت یك ثانیه از آن عبور کند ، گرمایی معادل یك ژول یعنی ۰٫۲۴ کالری تولید شود .

عملاً یك اهم مقاومت الکتریکی ستونی است از جیوه به طول

$106/3\,cm$ ، به مقطع $1\,mm^2$ و به دمای 0° . این مقاومت واحد را به‌صورت دستگاهی ساخته و درآزمایشگاهها مورد استفاده قرار می‌دهند (شکل ۲۰۰) . مقاومتهای خیلی بزرگ را با **مگا اهم** (به علامت $M\Omega$) که یك میلیون‌اهم است ومقاومتهای خیلی کوچك را با **میکروهم** ($\mu\Omega$) که یك میلیونیم اهم است بیان می‌کنند .



شکل ۲۰۰

$$1M\Omega = 1000000\Omega = 10^6\Omega$$

$$1\mu\Omega = \frac{1}{1000000}\Omega = 10^{-6}\Omega$$

مقاومت الکتریکی با چه عواملی بستگی دارد؟ از آزمایشهایی که اهم در مورد مقاومت الکتریکی انجام داد نتیجه گرفت که مقاومت یك سیم با طول ، با سطح مقطع و با جنس آن بستگی دارد .

۱ ـ **طول سیم** ـ مقاومت الکتریکی هرسیم متناسب است باطول آن. یعنی اگر طول سیم را دو یا سه برابرکنیم ، گرمای حاصل از عبور جریان ثابتی درآن، و درنتیجه مقاومت آن ، دویا سه برابر خواهدشد.

۲ ـ **سطح مقطع** ـ هرچه سطح مقطع سیم‌کوچکتر باشد مقاومت آن بیشتر خواهد بود و به بیان دقیق‌تر مقاومت سیم نسبت معکوس با سطح مقطع آن دارد .

۳ـ **جنس سیم** ـ عامل سوم‌که مقاومت سیم به‌آن بستگی دارد جنس سیم است . آزمایش نشان می‌دهد که سیمهای همطول و همقطری

که ازفلزهای مختلف ساخته شده‌اند ، مقاومتهای متفاوت دارند . درمیان فلزها ، مقاومت نقره کمتر از همه ومقاومت جیوه بیشتر از مقاومت همهٔ فلزهاست و ترتیب قرار گرفتن برخی از آنها از لحاظ بزرگی مقاومت چنین است : نقره ، مس ، آلومینیم ، روی ، تنگستن ، پلاتین ، آهن ، نیکل ، سرب و جیوه .

ضریب مقاومت - بنا به تعریف ، مقاومت قطعه‌ای از یك فلز که طول آن $1cm$ و سطح مقطع عرضی آن همه جا $1cm^2$ باشد ، **ضریب مقاومت** آن فلز نامیده می‌شود و آن را با ρ نشان می‌دهند . چون ضریب مقاومت فلزها بسیارکم است ، معمولاً آن را برحسب میکروهم سانتیمتر بیان می‌کنند . مثلاً ضریب مقاومت نقره (در دمای 15°) $1/5$ میکروهم سانتیمتر یعنی $1/5\times10^{-6}$ اهم سانتیمتر و از آن جیوه در همان دما ۹۵ میکروهم سانتیمتر یا 95×10^{-6} اهم سانتیمتر است .

تبصره - بهتر است به جای آنکه ضریب مقاومت را با واحد اهم سانتیمتر بیان‌کنیم با واحد اهم‌متر (Ωm) نشان دهیم : $1\Omega m = 10^2\Omega cm$
پس ضریب مقاومت نقره در دمای 15° برابر است با $1/5\times10^{-8}\Omega m$.

با توجه به‌آنچه گفته شد ، اگر طول سیمی l ، سطح مقطع آن s و ضریب مقاومت آن ρ باشد R ، مقاومت آن ، از رابطهٔ زیر حساب می‌شود :

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

تمرین - ضریب مقاومت مس $1/6\mu\Omega cm$ است . مقاومت یك کابل مسی به‌طول یك‌کیلومتر و به‌مقطع $25mm^2$ چقدر است ؟

حل : $1km = 100000cm$ و $25mm^2 = 0/25cm^2$

$$R = \rho\frac{l}{s} = 1/6\times10^{-6}\times\frac{100000}{0/25} = 0/64\Omega$$ پس

همچنین می‌توان نوشت :

$$\rho = 1/6\mu\Omega cm = 1/6\times10^{-8}\Omega m$$
$$l = 1km = 10^3 m$$
$$s = 25mm^2 = 25\times10^{-6}m^2$$

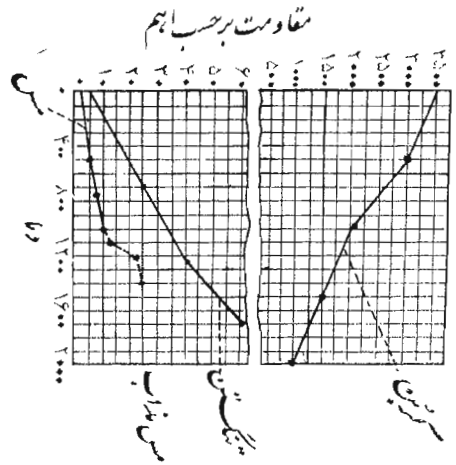
پس
$$R = 1/6\times10^{-8}\times\frac{10^3}{25\times10^{-6}}$$
$$R = 0/64\Omega$$

یادآوری ۱ - این فرمول دربارهٔ الکترولیتها نیزصادق است. در محاسبهٔ مقاومت یك الکترولیت باید به جای l فاصلهٔ الکترودها از هم و به جای سطح ، قسمتی از الکترودها که در داخل الکترولیت بوده و مقابل هم قرارگرفته‌اند ، در نظرگرفته شود . ضریب مقاومت ρ با جنس الکترولیت و غلظت آن بستگی دارد .

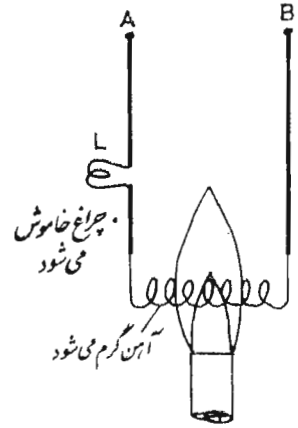
یادآوری ۲ - علاوه برعواملی که در بالا گفته شد ، دمای اجسام رسانا نیز در مقاومت آنها مؤثر است . بطورکلی هرچه دمای جسم رسانا بیشتر باشد مقاومت الکتریکی آن نیز زیادتر خواهد بود . شکل ۲۰۱ تغییرات مقاومت مس ، تنگستن و زغال را بر حسب تغییرات دما نشان می‌دهد .

آزمایش - دو قطب یك انباره را به یك چراغ کوچك و یك قطعه سیم نازك آهنی بطور متوالی وصل می‌کنیم (شکل ۲۰۲) . بر اثر عبور جریان ، چراغ روشن می‌شود . اگر سیم آهنی را با شعلهٔ چراغ الکلی شدیداً گرم‌کنیم ، می‌بینیم که چراغ الکتریکی کم‌کم به خاموشی

می‌گراید . علت این امر زیادشدن مقاومت سیم بر اثرگرما و درنتیجه ،

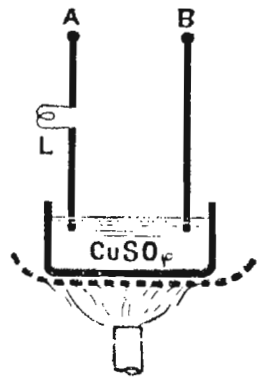


شکل ۲۰۱



شکل ۲۰۲

کم شدن شدت جریان در مدار است . باید دانست که مقاومت بعضی از اجسام رسانای غیر فلزی (مانند کربن و بیشتر الکترولیتها) با ازدیاد دما کاهش می‌یابد . چنانکه اگر آزمایش بالا را به‌جای سیم‌آهنی، با محلول سولفات مس انجام دهیم، نتیجهٔ عکس مشاهده می‌شود (شکل ۲۰۳) ، بدین معنی که براثرگرم‌کردن محلول سولفات مس ، نورچراغ بیشتر یعنی مقاومت محلول با ازدیاد دما کم می‌شود . اگرضریب مقاومت فلزی درصفردرجه



شکل ۲۰۳

ρ_0 و در t درجه ρ_t باشد ، می‌توان رابطهٔ زیر را نوشت :

$$\rho_t = \rho_0(1+at)$$

a ضریب گرمایی این فلز نامیده می‌شود . ضریب گرمایی a برای فلزات مثبت و برای کربن و الکترولیتهایی که با ازدیاد دما مقاومتشان کاهش می‌یابد منفی است . درجدول زیرضریب مقاومت وضریب گرمایی چند جسم نوشته شده است :

جسم	ضریب مقاومت (در ۱۵°)	ضریب گرمایی
مس	۱/۶μΩcm	۰/۰۰۴
آهن	۱۲μΩcm	۰/۰۰۶
آلیاژ فرونیکل	۸۰μΩcm	—
کربن	۰/۰۰۴Ωcm	—۰/۰۰۰۳
محلول۵درصدسولفات‌مس	۲۰Ωcm	—۰/۰۲
آب مقطر	۵MΩcm	—
کائوچو	10^{11}MΩcm	—

مثال ۱ ـ مقاومت سیم یك لامپ الکتریکی در (°۰) ۴۰۰Ω است . اگر دمای سیم ، هنگام روشن بودن چراغ ، °۲۰۰۰ باشد، مقاومت آن‌چقدر خواهد بود (ضریب‌گرمایی تنگستن ۰/۰۰۴ است) ؟

حل ـ از دو فرمول $R=\rho\frac{l}{s}$ و $\rho_t=\rho_0(1+at)$ نتیجه می‌شود:

$$R_t=\rho_t\frac{l}{s} \quad و \quad R_0=\rho_0\frac{l}{s}$$

یا $$R_t=R_0(1+at) \quad پس \quad R_t=\rho_0(1+at)\frac{l}{s}$$

پس $$R_{2000}=400(1+2000\times 0/004)$$

یا $$R_{2000}=400\times 9=3600\Omega$$

مثال ۲ ـ ضریب گرمایی فلزی $a=0/004$ است . دمای این فلز را چقدر باید بالا برد تا مقاومت الکتریکی آن ۱۰ در صد بالا رود (دمای اولیهٔ فلز را °۰ فرض‌کنید) ؟

حل ـ برای اینکه مقاومت سیم ۱۰ درصد بالا رود باید ضریب مقاومت آن نیز به همان میزان بالا رود .

یعنی $\rho_t = \rho_0 + \frac{\rho_0}{10} = \frac{11\rho_0}{10}$

و چون $\rho_t = \rho_0(1+at)$ ، $\frac{11\rho_0}{10} = \rho_0(1+at)$

یا $\frac{11}{10} = 1+at$ پس $t = \frac{1}{10a}$ یا $t = 25^\circ C$

تمرین

۱ ـ یك سیم نیکروم به‌طول $2m$ و به قطر $0/2mm$ مفروض است. مقاومت آن را حساب‌کنید درصورتی‌که $\rho = 100\mu\Omega cm$ باشد .

۲ ـ روی استوانه‌ای به قطر $6cm$ بیست دور سیم ورشو پیچیده شده است . قطرسیم $1mm$ است . اگر ضریب مقاومت ورشو $30\mu\Omega cm$ باشد ، مقاومت این سیم چقدر است ؟ جواب : $1/44\Omega$

۳ ـ طول سیمی مسی که ضریب مقاومت آن $1/6\mu\Omega cm$ است چقدر باشد تا مقاومت آن برابر مقاومت ستون جیوه‌ای به طول یك متر و به همان مقطع باشد (ضریب مقاومت جیوه $95\mu\Omega cm$ است) ؟ جواب : $59m$

۴ ـ ضریب گرمایی یك سیم تنگستن را حساب کنید . می‌دانیم که در $2420^\circ C$ مقاومت آن ۱۲ مرتبه بیش از مقاومت آن در 0° است .

۵ ـ جرم یك‌کابل مسی $200kg$ و مقاومت آن $0/64\Omega$ است. طول و سطح مقطع آن را حساب‌کنید. ضریب مقاومت مس $1/6\mu\Omega cm$ وجرم مخصوص آن $8g/cm^3$ است . جواب : $1km$ و $25mm^2$

ژول (۱۸۸۹–۱۸۱۸) ، دانشمند انگلیسی ، نخستین کسی است که رابطهٔ میان کار و گرما را یافت

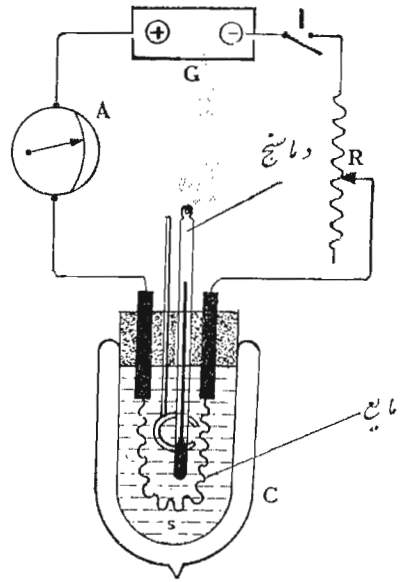
فصل ششم

آثار گرمایی جریان

قانون ژول

پیش از این‌گفتیم که براثر عبور جریان الکتریسیته از یك مدار ، همواره مقداری گرما تولید می‌شود . بخاری الکتریکی ، اتو و لامپ ، براثر عبور جریان الکتریسیته گرم می‌شوند . این‌کیفیت کاملاً عمومیت دارد و هر وقت که جریانی از یك جسم (فلز ، الکترولیت ، و اجسام نارسانا) عبورکند ، تمام یا مقداری از انرژی الکتریکی جریان به‌گرما تبدیل می‌شود .

آزمایش ـ مداری ترتیب می‌دهیم که در آن مدار مولد G ، رئوستای R ، آمپرسنج A و مقاومت s قرار دارد (شکل ۲۰۴) . سیم s را درگرماسنجی پر از آب (یا نفت) می‌گذاریم . اگر کلید I بسته شود ، براثر عبور جریان در سیم s گرما تولید می‌شود و درنتیجه دمای آب بالا می‌رود. با اندازه‌گیری ازدیاد دمای آب و با دانستن جرم آب ومعادل آبی گرماسنج ، طبق فرمول $Q=(M+A)(t_2-t_1)$، می‌توان گرمای تولید شده را بدست آورد. آزمایشهای متعدد نشان داده است **که :**



شکل ۲۰۴

۱ ـ هرچه مدت عبور جریان بیشتر شود، مقدارگرمای حاصل به همان نسبت زیاد **می‌شود** ؛

۲ ـ هرگاه شدت جریان را (به توسط رئوستای R) دو یا سه برابر کنیم مقدارگرمای حاصل در سیم s ، و در نتیجه در گرماسنج ، چهار یا نه برابر خواهد شد. بطورکلی مقدارگرمای تولیدشده متناسب است با مجذور شدت جریان ؛

۳ ـ اگر به جای سیم s ، سیم دیگری که مقاومت آن دو یا سه برابر باشد اختیارکنیم ، مقدارگرمای حاصل دو یا سه برابر خواهد شد، بطورکلی گرمای تولید شده متناسب است با مقاومت سیم.

بادرنظرگرفتن نتایج این آزمایش می‌توان قانون زیررا که موسوم به‌قانون ژول است بیان‌کرد :

قانون ژول ـ مقدارگرمای حاصل بر اثر عبورجریان دریك جسم ، با مقاومت آن ، با مجذور شدت جریان و با مدت زمان عبورجریان متناسب است .

اگر R مقاومت جسم ، I شدت جریان و t مدت زمان عبور جریان باشد ، مقدار گرمای حاصل Q مساوی خواهد بود با :

$$Q=KRI^2t$$

K ضریب تناسب است .

اگر $R=1\Omega$ و $I=1A$ و $t=1s$ باشد ، چنانکه در تعریف اهم‌گفتیم ، Q باید مساوی ۰/۲۴ یا $\frac{1}{4/18}$ کالری باشد . با بکاربردن این مقادیر نتیجه می‌شودکه :

$$K=\frac{1}{4/18}\neq 0/24$$

پس

$$Q=\frac{1}{4/18}RI^2t$$

کالری — اهم — آمپر — ثانیه

مثال ـ یك چراغ الکتریکی را که مقاومت آن ۲۵۰ اهم است در گرماسنجی که ارزش آبی آن ۸۰۰ گرم است غوطه‌ور می‌کنیم و از چراغ جریانی به‌شدت ۰/۴ آمپر می‌گذرانیم . تعیین کنید :

۱ ـ مقدارگرمایی را که چراغ در مدت ۱۰ دقیقه از دست می‌دهد ؛

۲ ـ افزایش دمای گرماسنج را درصورتی‌که تمام انرژی به گرما تبدیل شودو تمام گرما صرف بالابردن دمای گرماسنج شود .

حل - ۱- گرمایی‌که چراغ از دست می‌دهد :

$$Q = K R I^2 t$$

$$Q = \frac{1}{4/18} \times 250 \times 0/4^2 \times 10 \times 60$$

$$Q = 5760 cal$$

۲ - افزایش دمای گرماسنج :

$$t = \frac{Q}{M + A}$$

$$t = \frac{5760}{800}$$

$$t = 7/2^\circ C$$

معادل مکانیکی کالری

می‌دانیم‌که هریك از اشکال انرژی به شکل دیگرآن قابل تبدیل است. انرژی مکانیکی نیزمی‌تواند مانند انرژیهای دیگر به‌انرژی‌گرمایی تبدیل شود . **برای تولید یك‌کالری‌کوچك، ۴/۱۸ ژول انرژی مکانیکی لازم است** . این مقدار انرژی‌که معادل یك کالری‌گرماست **معادل مکانیکی‌کالری** نامیده می‌شود و آن را با حرف J نشان می‌دهند .

چون برای تولید یك‌کالری ۴/۱۸ ژول انرژی لازم است ، برای تولید Q کالری ، مقدار انرژی عبارت خواهد بود از :

$$W = 4/18Q = JQ$$

این فرمول رابطهٔ بین‌کار و گرماست .

یادآوری - با در نظرگرفتن رابطهٔ بالا و فرمول ژول داریم :

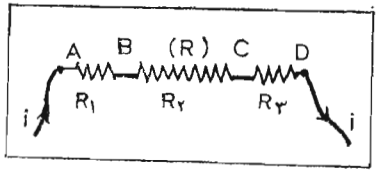
$$4/18Q = RI^2t \quad \text{یا} \quad Q = \frac{1}{4/18} RI^2t$$

پس

$$W = 4/18Q = RI^2t$$

W آن مقدار انرژی الکتریکی است (برحسب ژول) که در یك جسم به‌صورت‌گرما ظاهر می‌شود .

مجموع چند مقاومت - مقاومت معادل - فرض می‌کنیم که بین دو نقطه ، چند رسانا به‌مقاومتهای R_1 و R_2 و R_3 و ... بطور متوالی



شکل ۲۰۵

قرار گیرند (شکل ۲۰۵) . آزمایش نشان می‌دهد که شدت جریان در تمام این قسمت از مدار ثابت است . مقدار انرژی‌که ، درمدتی معین ، در هریك از مقاومتها به‌صورت گرما ظاهر می‌شود ، بر طبق قانون ژول ، از روابط زیر بدست می‌آید :

$$W_1 = R_1 I^2 t$$
$$W_2 = R_2 I^2 t$$
$$W_3 = R_3 I^2 t$$
$$\dots \quad \dots \quad \dots$$

مقدارکل انرژی‌که بین این دونقطه به‌صورت گرما ظاهرمی‌شود:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots$$

یا

$$W = R_1 I^2 t + R_2 I^2 t + R_3 I^2 t + \dots$$
$$= (R_1 + R_2 + R_3 + \dots) I^2 t$$

برطبق تعریف مقاومت بین این دو نقطه برابر R است بطوری که

$$W = RI^2t$$

ازمقایسهٔ دو رابطهٔ اخیر با یکدیگر نتیجه می‌شود :

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots$$

یعنی مقاومتهای چند رساناکه بطور متوالی قرارگیرند با هم جمع می‌شوند . R را **مقاومت معادل** مقاومتهای R_1 و R_2 و R_3 و... گویند.

توان ـ اگر در مداری در t ثانیه W ژول انرژی الکتریکی به گرما تبدیل شود ، مقدار انرژی تبدیل شده در هر ثانیه $P = \frac{W}{t}$ ژول خواهد بود . این مقدار را **توان** نامند ، و چون $W = RI^2t$ است :

$$P = R.I^2$$

P : ژول در ثانیه یا وات ؛ R : اهم ؛ I : آمپر

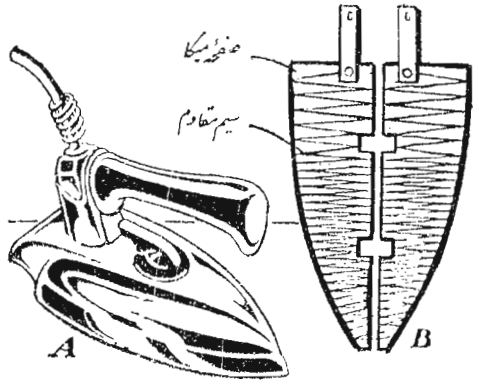
واحد توان ژول برثانیه یا وات (W) است . هزار وات را یك کیلووات (kW) نامند . اگر قدرت مصرفی یك کیلووات باشد ، مقدار انرژی مصرف شده در هرساعت را یك‌کیلووات ساعت (kWh) گویند . یك‌کیلووات ساعت ۳۶۰۰ کیلو ژول است .

موارد استعمال اثر گرمایی جریان

در دستگاههای الکتریکی که برای تولید گرما در خانه‌ها یا در

صنعت بکار می‌رود ، مستقیماً از اثرگرمایی جریان برق استفاده می‌شود. در اتوی الکتریکی ، سماور الکتریکی ، دستگاه جوش ، لامپ و جز اینها ، انرژی الکتریکی به‌انرژی گرمایی تبدیل می‌شود . در زیر چند نوع از این دستگاهها را شرح می‌دهیم :

۱ ـ **وسایل الکتریکی خانگی** ـ این وسایل مانند اتو، سماور و بخاری الکتریکی از سیم پیچ مقاومی تشکیل یافته است‌که براثر عبور جریان در آنها گرما تولید می‌شود . این سیم پیچها معمولاً از آلیاژ پر مقاومتی‌چون‌فرونیکل یا نیکروم(آلیاژنیکل و کروم) ساخته شده است . نقطهٔ ذوب این آلیاژها بالاست و در مجاورت هوا بزودی اکسیده نمی‌شوند . در شکل ۲۰۶ سیم پیچ داخلی یك اتو دیده می‌شود .

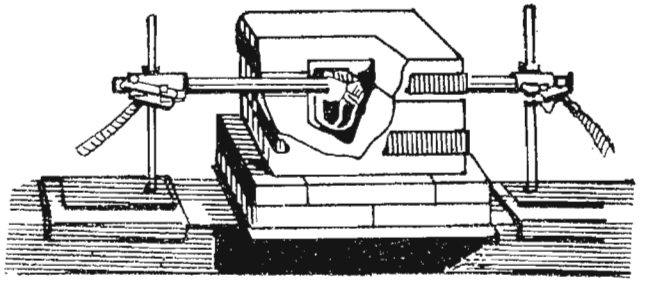


شکل ۲۰۶

۲ ـ **دستگاه جوشکاری** ـ دستگاه جوشکاری دستگاهی است که بدتوسط آن دوقطعه فلز به‌یکدیگرجوش داده می‌شود. دستگاه جوشکاری یا با قوس است یا با مقاومت . در دستگاه با قوس ، قوس الکتریکی بین فلز و الکترود برقرار شده و دمای قوس تا 3000° بالا می‌رود و درنتیجه دوقسمت فلزذوب شده و به‌یکدیگرجوش می‌خورند. دردستگاه جوشکاری با مقاومت ، دو قطعه فلز روی هم فشرده می‌شوند و در همین لحظه جریان

شدیدی بین این دو قسمت برقرار می‌شود ، در نتیجه آنقدر گرما تولید می‌شودکه عمل جوش انجام می‌گیرد .

۳ - **کوره‌های الکتریکی** - کوره‌های الکتریکی برای ذوب اجسام و انجام یافتن بعضی از فعل وانفعالات شیمیایی بکار می‌رود. اولین کوره‌های الکتریکی ، بر اساس قوس الکتریکی ساخته شده بود که یك نوع آن درشکل ۲۰۷ دیده‌می‌شود. دراین نوع کوره‌ها ، قوس الکتریکی



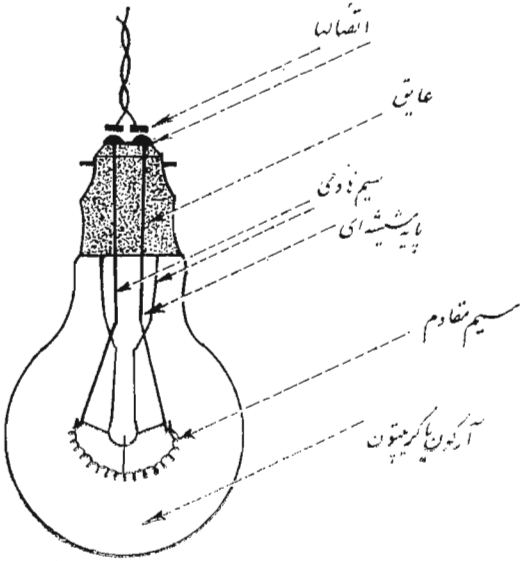
شکل ۲۰۷

بین دوقطب زغالی‌که داخل محفظه‌ای ازخاك نسوز است ، برقرار می‌شود و گرمای بسیار زیاد ایجاد می‌گردد. جسمی را که منظور ذوب یا تجزیهٔ شیمیایی آن است در داخل محفظه می‌گذارند. درکوره‌های جدید، قطبها یکی پایین و دیگری بالاست و قوس از داخل ماده‌ای‌که منظورگرم‌کردن آن است عبور می‌کند .

یك نوع کورهٔ دیگر ،که مورد استعمال صنعتی وعلمی فراوان دارد، کورهٔ مقاومتی است . کورهٔ مقاومتی در حقیقت تشکیل یافته است از سیم پیچ پر مقاومتی‌که آن را در داخل محفظه‌ای نصب کرده‌اند . بر اثر عبور جریان ازسیم مقاوم ، گرمای زیاد تولید می‌شود. رجحان این‌کوره برکوره‌های دیگر دراین است‌که‌دما را می‌توان ، یا با قراردادن ترموستا

یا با تنظیم شدت جریان به توسط رئوستا ، ثابت نگاه داشت . سیم پیچ این‌کوره‌ها معمولا از فرونیکل ، نیکل‌کروم ، تنگستن یا پلاتین است .

۴ - **چراغهای الکتریکی** - مسئلهٔ تولید نور به‌توسط الکتریسیته از خیلی پیش مورد نظر دانشمندان بوده است . اولین لامپ الکتریکی در سال ۱۸۸۹ توسط ادیسون ساخته شد . اصولاً لامپهای الکتریکی از یك رشته سیم نازك و پرمقاومت‌که از فلز دیرگدازی ساخته شده تشکیل یافته است . این رشته در داخل حبابی شیشه‌ای است . جریان برق وسیلهٔ دوسیم نسبتاً کلفت وارد سیم می‌شود. در نتیجهٔ تولید گرمای زیاد . سیم مقاوم به حالت التهاب در می‌آید و نور تابش می‌کند (شکل ۲۰۸) . در چراغی که ادیسون ساخت ، سیم مقاوم یك رشته زغال بود و جریان به وسیلهٔ دو سیم پلاتینی وارد آن می‌شد. چون درحین التهاب ، زغال یا هرفلز دیگر که بکار برده شود با اکسیژن هوا ترکیب می‌شود ، ادیسون داخل حباب شیشه را تخلیه کرد . این طریقه امروز نیز برای چراغهای کم قدرت (تا ۲۵ وات) معمول است ولی در چراغهای قوی داخل حباب را از گاز

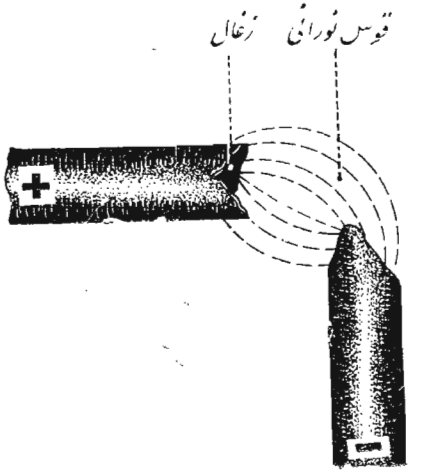


شکل ۲۰۸

بی‌اثری مانند آرگن یا کریپتن پر می‌کنند[1] .

امروز رشتهٔ لامپهای الکتریکی‌را از تنگستن که‌فلزی‌است بسیار دیرگداز و سیمهای هادی را از یك نوع آلیاژ ارزان قیمت می‌سازند[2] . باید دانست که لامپهای دیگری نیز در موارد مخصوص بکار برده می‌شود که در زیر بطور اختصار چند نوع از آنها گفته می‌شود .

لامپ با قوس زغالی - هنگامی که بین دو میلهٔ زغالی جریان شدیدی برقرارسازیم، یك قوس الکتریکی حاصل شده و نور زیادی تولید می‌شود (شکل ۲۰۹) . برای این کار دو میلهٔ زغالی را به مولدی وصل کرده و دو انتهای آنها را به‌همدیگر می‌چسبانیم وپس‌ازیکی دوثانیه بآرامی‌آنهارا ازهم دورمی‌کنیم بر اثر گرم شدن الکترودها ، عدهٔ زیادی الکترون از قطب منفی خارج می‌شود وگاز موجود بین دو میله را یونیزه می‌کند. درنتیجه



شکل ۲۰۹

۱ ـ چنانکه می‌دانیم ، هرچه فشار کمتر باشد ، برشدت تبخیر اجسام افزوده می‌شود . بنابراین اگر داخل لامپهای قوی خالی از هوا باشد، براثر گرما رشتهٔ داخلی لامپ با سرعت بیشتری تبخیر شده و نازك می‌شود و پس از مدت کوتاهی پاره می‌شود .

۲ ـ ضریب انبساط این آلیاژ باید با ضریب انبساط شیشه یکسان باشد وگرنه هنگام روشن‌شدن چراغ ، براثراختلاف ضریب انبساط ، حباب چراغ ترك برمی‌دارد .

گاز رسانا می‌شود و جریان را از خود عبور داده تولید نور می‌کند. این لامپها سابق براین در پروژکتورهای سینما بکار می‌رفت .[1]

چراغ جیوه و سدیم - چراغهایی که با بخار فلزها کار می‌کنند از حبابهایی‌که خالی ازهوا و دارای بخار فلزی است تشکیل یافته است. هنگامی‌که یك اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو قطب چراغ بر قرار شود ، بخار یونیزه می‌شود و جریان را از داخل خود عبور می‌دهد و در نتیجه تولید نور شدیدی می‌شود . چراغ بخار جیوه از حبابی‌که در آن کمی جیوه ریخته شده تشکیل یافته است. برای روشن‌کردن‌آن، قطبها را به مولدی وصل و چراغ را کمی خم می‌کنیم تا دو قطب به واسطهٔ جیوه به هم مربوط شوند . در این حالت مقداری از جیوه ، براثرعبورجریان ، تبخیر می‌شود . حال اگر چراغ را افقی نگاه داریم تا ارتباط جیوه با الکترودها قطع شود ، جریان به‌واسطهٔ بخار جیوه از قطبی به‌قطب دیگر ادامه می‌یابد و نور شدیدی تابش می‌شود . تبخیر جیوه ممکن است به توسط التهاب یك رشته سیم تنگستن نیز تأمین شود . چراغ جیوه در کارگاههای صنعتی ، سالونهای نقشه‌کشی و استودیوهای عکاسی بکار برده می‌شود. همچنین اگر حباب آن ازکوارتز ساخته شده باشد ، برای‌کشتن باکتریها بکار می‌رود[2]. چراغ بخار سدیم نیزمانند چراغ بخارجیوه است

۱ ـ قبل ازپیدایش‌شیشه‌های دیرگدازبرای تولید نور شدید همواره از قوس استفاده می‌شد .

۲ ـ تابشی‌که از چراغ بخار جیوه حاصل می‌شود حاوی مقدار زیادی اشعهٔ فوق بنفش است وچون این اشعه ازکوارتز عبور می‌کند و بعلاوه خاصیت از بین بردن باکتریها را دارد ، از این چراغها برای تصفیهٔ آب در لوله‌کشی شهرها و همچنین برای نگاهداری اغذیه استفاده می‌شود .

و چون سدیم نور زرد شدیدی از خود تابش می‌کندکه چشم خیلی به‌آن حساس است ، به منظور چراغ احتیاط در محل تقاطع جاده‌ها بکار برده می‌شود .

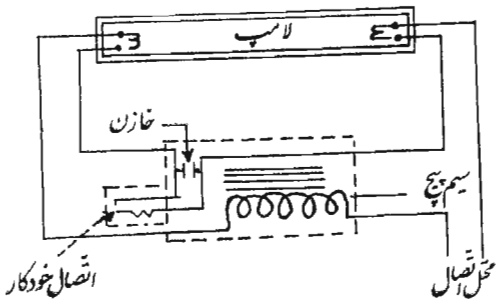
چراغ نئون - چراغ نئون نیز نوعی است از چراغهای تخلیهٔ الکتریکی در گازها . لولهٔ این چراغ با گاز نئون پرشده است . رنگ نور چراغ نئون خوش آیند و مطبوع است . ممکن است به جای نئون گازهای دیگری مانند آرگن ، هلیم یا مخلوطی از این‌گازها بکار برد . از این چراغها بیشتر برای اعلانهای تبلیغاتی استفاده می‌شود .

چراغ فلوئورسان - معمولترین چراغهای بخار فلزی ، چراغ فلوئورسان است. این چراغ درحقیقت یك نوع چراغ با بخارجیوه است که سطح داخلی لولهٔ شیشه‌ای آن از ماده‌ای پوشیده شده که خاصیت فلوئورسانس[1] دارد. هنگامی‌که چراغ روشن است اشعهٔ فوق بنفش نامرئی که از بخار جیوه تابش می‌شود ، و به علت نامرئی بودن هدر می‌رود، با مادهٔ فلوئورسان برخورد می‌کند واین ماده ازخودنورمرئی (قابل استفاده) تابش می‌کند و در نتیجه بازده چراغ خیلی بیشتر می‌شود .

چنانکه در شکل ۲۱۰ دیده می‌شود ، این چراغ از لوله‌ای که در دو انتهای آن دو رشتهٔ باریك تنگستن وجود دارد تشکیل یافته و در داخل آن بخار جیوه موجود است . هنگامی‌که جریان برقرار می‌شود ،

۱ــ فلوئورسانس خاصیتی است‌که بعضی از اجسام مانند روغنهای معدنی دارا هستند. هنگامی‌که نوری به رنگ معین برآنها بتابد به رنگهای دیگری از آنها تابش می‌شود . به وسیلهٔ این اجسام می‌توان تابش نامرئی را تبدیل به تابش مرئی‌کرد .

ابتدا اتصال خودکار بسته است و رشته‌های تنگستن‌گرم می‌شوند و درنتیجه مقداری الکترون از این سیمها خارج شده بخار جیوه را یونیزه می‌کند.



شکل ۲۱۰

در این موقع کلید خودکار باز شده و الکتریسیته به‌وسیلهٔ خود بخار جیوه جاری می‌گردد و در نتیجه نور زیادی تولید می‌شود . یکی از مشخصات این چراغها کم‌مصرف‌بودن آنهاست. یك چراغ فلوئورسان ۴۰ واتی همان اندازه نور تولید می‌کند که یك چراغ معمولی ۱۵۰ واتی . بنابراین ، با شدت نور مساوی ، مصرف برق در چراغهای فلوئورسان تقریباً چهار مرتبه کمتر از چراغهای معمولی است . علت این است که در چراغهای معمولی تنها از تابش مرئی استفاده می‌شود که جزئی از تابش سیم است در صورتی‌که در چراغهای فلوئورسان قسمتی از تابش نامرئی نیز تبدیل به تابش مرئی می‌شود .

۵ ــ **فیوز** یا **فوزیبل** - چنانکه می‌دانیم برای جلوگیری ازعبور جریان شدید در دستگاههای الکتریکی ، فیوز یا فوزیبل بکار می‌برند. فیوزسیم ساده‌ای است از سرب یا آلیاژی زودگدازکه آن را بطورمتوالی

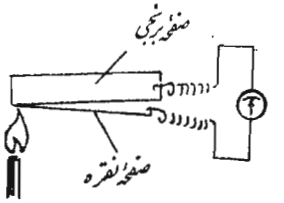
در مدار می‌گذارند (شکل ۲۱۱) . مقطع سیم طوری انتخاب شده است که بتواند عبور شدت جریان معینی را تحمل‌کند. هرگاه درنتیجهٔ اتصالی

شکل ۲۱۱

کوتاه یا اتفاق دیگری شدت جریان بیشتری ازمدار عبورکند، سیم سربی بشدت گرم و ذوب می‌شود و در نتیجه جریان خود بخود قطع می‌گردد .

پدیدهٔ ترموالکتریك

آزمایش ـ دو ورقهٔ برنجی و نقره‌ای اختیار می‌کنیم و یك طرف آنها را به‌هم لحیم‌کرده و طرف دیگر را به‌یك‌گالوانومتر یا میلی ولتمتر وصل می‌کنیم (شکل ۲۱۲) . اکنون اگر قسمت لحیم‌شدهٔ دوفلز را گرم‌کنیم ،خواهیم دیدکه جریانی ازمدار عبورمی‌کند. این آزمایش را می‌توان با دو فلز مختلف دیگر نیز انجام داد . بطور کلی **اگر در مداری ، محل اتصال دوفلز ناهمجنس گرم شود ، جریان برق تولید می‌شود.**



شکل ۲۱۲

این‌کیفیت را پدیدهٔ **ترموالکتریك** می‌نامندومجموع دو فلز را **کوپل ترموالکتریك** گویند . این پدیده بر اثر این است‌که عدهٔ الکترونهای آزاد در فلزهای مختلف یکسان نیست و بطور خیلی خلاصه می‌توان گفت‌که الکترونهایی که بر اثر گرم شدن محل اتصال دو فلز از یکی از فلزها خارج می‌شوند وارد فلز دیگر شده و جریان الکتریسیته در مدار

برقرار می‌گردد . آزمایش نشان می‌دهدکه بزرگی این نیروی الکترو-موتوری با جنس فلزها و اختلاف دمای نقطهٔ اتصالی با دمای قسمتهای دیگر مدار بستگی دارد . مثلاً نیروی محرکهٔ‌کوپل بیسموت و انتیموان ازکوپلهای دیگر بیشتر است . هرچه این اختلاف دما بیشتر باشد نیروی محرکهٔ زیادتری تولید می‌شود. ازاین دستگاه در صنعت و آزمایشگاهها برای اندازه‌گیری دما استفاده می‌شود .

چون نیروی محرکهٔ یك‌کوپل بسیار کم است ، درعمل چندکوپل را به‌هم متصل می‌کنند و دستگاه را **پیل ترموالکتریك** یا **ترموپیل** می‌نامند .

چون با کوپلهای ترموالکتریك می‌توان حدود وسیعی از دما را اندازه‌گرفت (از دمای هلیم مایع -۲۷۲° — تا نقطهٔ ذوب فلزهای دیرگداز ۲۰۰۰°) ، این دستگاه روز بروز موارد استعمال بیشتری می‌یابد .

تمرین

۱ـ از یك قوری برقی که ۳۰۰ گرم آب ۲۰° دارد جریانی به شدت ۴ آمپر می‌گذرد و پس از پنج دقیقه دمای آن به ۱۰۰° می‌رسد . مقاومت سیم پیچ قوری را حساب‌کنید . جواب : $R \neq ۲۰/۹\Omega$

۲ـ یك چراغ ۴۰ واتی شبانه‌روزی ۲ ساعت روشن است . مصرف برق ماهانه را برحسب‌کیلووات ساعت حساب کنید .

۳ـ از لامپ مسئلهٔ ۲ جریانی به شدت ۰/۵ آمپر می‌گذرد ، مقاومت آن چقدر است ؟ جواب : ۱۶۰Ω

۴ـ از یك کورهٔ الکتریکی جریان ۵۰ آمپر می‌گذرد و توان آن ۲ کیلووات ساعت است ، مقاومت آن را حساب کنید .

۵ـ در یك کورهٔ الکتریکی ، قطعهٔ آهنی به جرم ۱۰۰ گرم گذاشته

شده است . دمای اولیهٔ دستگاه ۲۰° است . اگر توان کوره ۵۰۰W باشد ، چه مدت باید از آن جریان بگذرد تا آهن به نقطهٔ ذوب برسد ؟ نقطهٔ ذوب آهن ۱۷۰۰° و گرمای ویژهٔ آن ۰/۱ است . جواب : ثانیه ۲۰ و دقیقه ۲≠۱

۶ـ یك چراغ ۴۰ واتی را داخل یك لیتر آب ۱۵° می‌کنیم . پس از ۵ دقیقه دمای آب چقدر خواهد شد (فرض براین است‌که تمام انرژی به‌گرما تبدیل می‌شود) ؟

۷ـ سیمی به مقاومت ۱۰Ω که در گرماسنجی گذاشته شده است بطور متوالی به‌یك ولتامتر آب اسیددار متصل است . در این ولتامتر در مدت ۱۶ دقیقه و ۵ ثانیه $112cm^3$ ئیدروژن حاصل می‌شود . شدت جریان در مدار و مقدار گرمای حاصل در سیم را در این مدت بدست آورید . اگر جرم آب گرماسنج ۲۰۰گرم ، جرم ظرف‌گرماسنج ۳۰۸گرم وگرمای ویژهٔ آن ۰/۱ باشد ، ازدیاد دمای‌گرماسنج را در این آزمایش حساب‌کنید .

جواب : $I=1A$ ، کالری $Q=2308$ ، $t_2-t_1=1°C$

۸ ـ از سیمی به مقاومت سه اهم جریانی به شدت یك آمپر در مدت ۵ دقیقه می‌گذرد . این سیم داخل گرماسنجی‌که ۲۱۵گرم آب دارد قرار گرفته است. مشاهده می‌شودکه دمای آب از $17°C$ به $18°C$ می‌رسد. معادل مکانیکی کالری را حساب‌کنید (از ظرفیت گرمایی ظرف‌گرماسنج صرف‌نظر می‌شود).

جواب : ژول ۴/۱۸

۹ ـ دمای آب یك حمام الکتریکی را از ۱۲° به ۳۷° می‌رسانیم . این حمام ۲۰۰ لیتر آب دارد. قیمت برق مصرف شده را حساب‌کنید درصورتی که قیمت هرکیلووات ساعت ۲/۵ ریال باشد .

۱۰ـ سیمی که از آن جریان ۱/۵ آمپر می‌گذرد ، در گرماسنجی که ۲۵۰ گرم نفت دارد قرار گرفته است . در هر دقیقه دمای نفت ۰/۵ درجه بالا می‌رود . مقاومت سیم چقدر است ؟ گرمای ویژهٔ نفت ۰/۵ و ارزش آبی گرماسنج ۱۲۰گرم است . جواب : ۳/۷۸Ω

۱۱ـ برای اندازه‌گیری مقاومت یك سیم مسی آن را در گرماسنجی که ارزش آبی آن ۲۰ گرم است و ۲۸۰ گرم آب دارد می‌گذاریم . جریانی به شدت ۰/۵۵ آمپر به‌مدت ۲۰ دقیقه از سیم عبور می‌دهیم . دما ۴° بالا می‌رود. مقاومت سیم را حساب‌کنید .

فصل هفتم

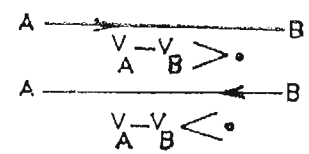
اختلاف سطح الکتریکی و قوانین اهم

اختلاف سطح الکتریکی

همانطور که اگر شیر لوله‌کشی آب را باز کنیم آب در لوله جاری می‌شود ، اگر مداری را هم‌که درآن یك مولد برق است ببندیم ، الکتریسیته در مدار جاری خواهد شد . این دو جریان شباهت زیادی به یکدیگر دارند . جریان آب حرکت منظم مولکولهای آب است و جریان برق حرکت منظم الکترونها ویونهاست. جریان‌آب براثراختلاف فشار (اختلاف سطح ـ اختلاف پتانسیل) است‌که خود براثر وجود نیروی جاذبهٔ زمین است . جریان برق نیز در نتیجهٔ اختلاف فشار الکتریکی است‌که خود بر اثر وجود نیروهای الکتریکی است که مولد برق ایجاد می‌کند . این نیروها بر الکترونهای آزاد مدار و یونها اثرکرده آنها را بحرکت درمی‌آورند . در سال پیش دیدیم که هر جسم در میدان ثقل زمین مقداری انرژی پتانسیل مکانیکی دارد و اگر شرایط فراهم شود ، یعنی مانعی در برابر حرکت جسم نباشد (مثلاً شیر باز باشد) ، جسم حرکت می‌کند و انرژی پتانسیل بتدریج به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود . این انرژی پتانسیل بستگی به جای جسم ، جرم آن و نیروی جاذبهٔ زمین دارد . در برق نیزچنین است ؛ هر بار الکتریکی در میدان

نیرویی که مولد ایجاد می‌کند دارای یك انرژی پتانسیل الکتریکی است و اگر شرایط فراهم شود (مدار بسته شود تا راه حرکت باز شود) حرکت می‌کند و انرژی پتانسیل آن بتدریج به‌انرژی جنبشی تبدیل می‌شود (جریان برق) . در میدان ثقل زمین اختلاف پتانسیل دو نقطهٔ A و B مقدار انرژیی است که یك گرم (واحد جرم) می‌دهد وقتی‌که از A به B می‌رود. در الکتریسیته نیز می‌توان اختلاف پتانسیل میان دو نقطهٔ A و B را چنین تعریف‌کرد : **اختلاف پتانسیل الکتریکی میان دو نقطهٔ A و B مقدار انرژیی است که واحد بار (یك‌کولن) می‌دهد وقتی‌که از A به B می‌رود .**

اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو نقطهٔ A و B به صورت $V_A - V_B$ نمایش داده می‌شود . اگر جریان از نقطهٔ A به‌طرف نقطهٔ B باشد، $V_A - V_B$ مثبت و گرنه منفی است (شکل ۲۱۳) .



شکل ۲۱۳

اختلاف پتانسیل را از راه سادهٔ دیگری نیز می‌توان تعیین کرد . آزمایش نشان می‌دهدکه هرچه اختلاف فشار الکتریکی بین دو نقطه از سیم معینی بیشتر باشد عدهٔ الکترونهای رانده شده‌که دریك ثانیه ازمقطع معینی از مدارمی‌گذرند، یعنی شدت جریان ، به‌همان نسبت بیشتراست. بنابراین :

اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو نقطه ازیك سیم (با مقاومت معین) کمیتی است متناسب با شدت جریانی‌که ازاین سیم عبور می‌کند .

واحد اختلاف پتانسیل ـ واحد اختلاف پتانسیل **ولت** است . هرگاه از سیمی به‌مقاومت یك اهم ، جریانی به‌شدت یك‌آمپرعبورکند ،

اختلاف پتانسیل بین دو سر سیم را یك **ولت** نامند . اختلاف پتانسیل بین دو نقطه به وسیلهٔ دستگاهی به‌نام **ولتمتر** یا **ولت‌سنج** اندازه‌گرفته می‌شود که آن را بطور انشعاب در مدار می‌بندند .

نیروی محرکه ـ مولدهای مختلف مانند پیل ، انباره و دینامو درحقیقت الکتریسیته تولید نمی‌کنند و مقدار الکتریسیته‌ای‌که از یك قطب خارج می‌شود تماماً از قطب دیگر به مولد باز می‌گردد. درحقیقت مولد یك حرکت دائمی الکتریسیته درمدار ایجاد می‌کند و این حرکت به واسطهٔ عاملی تأمین می‌شود که به نیروی محرکهٔ مولد موسوم است . نیروی محرکه با همان واحد اختلاف سطح یعنی با ولت سنجیده می‌شود.

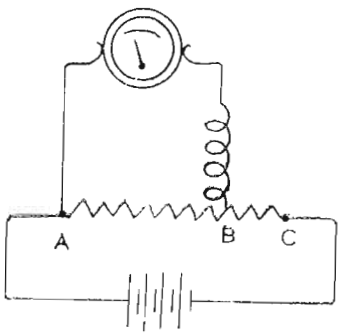
جریان برق حامل انرژی است ـ هنگامی که یك جریان برق از مداری‌که فقط شامل مقاومت است عبور می‌کند گرما تولید می‌کند . اگر جریان از ولتامتر یا ازموتور الکتریکی بگذرد ، علاوه بر تولید گرما ، در ولتامتر تجزیهٔ شیمیایی و در موتور الکتریکی حرکت پدید می‌آورد . بنابراین **جریان برق حامل انرژی است .**

قوانین اهم

قوانین اهم روابطی است‌که اختلاف پتانسیل بین دونقطه ازمداری را برحسب مشخصات‌آن مدار وشدت جریان تعیین می‌کند.

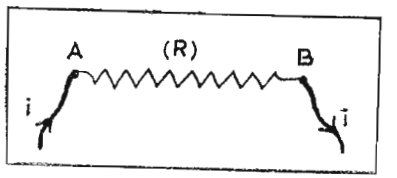
حالت اول ـ قسمتی از مدارکه تنها شامل یك مقاومت است ـ مداری مطابق شکل ۲۱۴ تشکیل می‌دهیم‌که از یك مقاومت AC ، یك ولتمتر و یك مولد تشکیل یافته و جریان ثابتی از آن عبور می‌کند . یك

سر ولتمتر به نقطهٔ ثابت A وصل شده و سر دیگر، آن (B) می‌تواند در طول سیم AC حرکت کند. آزمایش نشان می‌دهد که هر چه طول AB، و در نتیجه مقاومت آن، بیشتر باشد اختلاف پتانسیل بین دو نقطهٔ A و B به‌همان نسبت زیادتر است. یعنی: **اختلاف پتانسیل بین دو سر سیمی که شدت جریان ثابتی از آن عبور می‌کند متناسب است با مقاومت آن.** از طرف دیگر چون اختلاف پتانسیل بین دو سر یك سیم متناسب با شدت جریانی است که از آن سیم عبور می‌کند (تعریف دیگر اختلاف پتانسیل)، نتیجه می‌گیریم که:



شکل ۲۱۴

قانون اهم ـ اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو نقطه از مداری که تنها شامل یك سیم مقاوم باشد متناسب است با مقاومت سیم و شدت جریانی که از آن می‌گذرد.



شکل ۲۱۵

اکنون اگر اختلاف پتانسیل بین دو نقطهٔ A و B با $V_A - V_B$ و مقاومت سیم AB با R و شدت جریان با I نشان داده شود (شکل ۲۱۵)، بنابرآنچه گفته شد:

$$V_A - V_B = KRI$$

واحد اختلاف پتانسیل طوری انتخاب شده است که ضریب تناسب K مساوی یك باشد یعنی: $V_A - V_B = RI$، زیرا قبلاً

دیدیم که اگر جریانی به شدت یك آمپر از سیمی به مقاومت یك اهم عبور کند، اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو سر آن مساوی یك ولت است. پس:

$$V_A - V_B = R\ I$$
(ولت) (اهم) (آمپر)

مثال ـ بین دو سر یك لامپ الکتریکی به مقاومت ۴۴۰Ω اختلاف پتانسیل ۲۲۰ ولت برقرار می‌سازیم. شدت جریانی که از آن می‌گذرد چقدر است؟

حل ـ طبق فرمول اهم $V_A - V_B = RI$

اما $V_A - V_B = ۲۲۰V$ و $R = ۴۴۰\Omega$، $۲۲۰ = ۴۴۰ \times I$

پس $I = ۰/۵A$

انرژی الکتریکی مصرف شده در سیم و تعریف دیگر اختلاف پتانسیل ـ انرژی الکتریکی که در یك سیم به صورت گرما پدید می‌آید مساوی است با $W = RI^۲t$ و چون $Q = It$ است، $W = RI^۲t = RIQ$. از طرف دیگر $V_A - V_B = RI$

بنابراین

$$W = (V_A - V_B)Q$$
(ژول) (ولت) (کولن)

W مقدار انرژیی است که Q کولن الکتریسیته از دست می‌دهد هنگامی که از نقطهٔ A به نقطهٔ B جاری شود. اگر $Q = ۱$ کولن باشد، $W = V_A - V_B$ خواهد شد. یعنی **اختلاف پتانسیل بین دو نقطهٔ A و B مقدار انرژیی است که یك کولن الکتریسیته هنگام عبور از نقطهٔ A به نقطهٔ B از دست می‌دهد.** این تعریف دیگری است از اختلاف پتانسیل بین دو نقطه

که قبلاً نیز به‌آن اشاره شد .

توان مصرف شده در یك سیم - چنانکه می‌دانیم توان ، انرژی مصرف شده در واحد زمان است ، یعنی $P=\frac{W}{t}$ و چون $W=RI^2t$

$$P=R\ I^2$$

↓ ↓ ↓

وات اهم آمپر

با توجه به فرمول اهم مقدار توان را می‌توان به صورت زیر نوشت :

$$P=RI^2=R.I.I$$

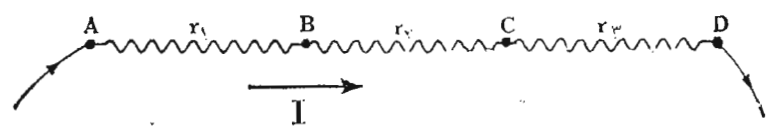
$$P=(V_A-V_B)I$$

↓ ↓ ↓

وات ولت آمپر

جمع اختلاف پتانسیلها - هرگاه مداری را به قطعات مختلف تجزیه کنیم ، اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو سر مدار مساوی حاصل جمع جبری اختلاف پتانسیلهای قطعات مختلف آن مدار است . یعنی مثلاً در شکل ۲۱۶ می‌توان نوشت :

$$V_A-V_D=V_A-V_B+V_B-V_C+V_C-V_D$$



شکل ۲۱۶

این قضیه کلی است و ، اعم از اینکه قسمتهای مدار شامل مقاومت یا مولد یا گیرنده (ظرف تجزیهٔ شیمیایی یا موتور الکتریکی) باشد ، می‌توان آن را بکار برد .

اُفت پتانسیل - از فرمول بالا این نتیجه بدست می‌آید که $V_B-V_D<V_A-V_D$ ، یعنی هرچه از نقطهٔ A به D نزدیکتر شویم ، اختلاف پتانسیل کمتر می‌شود . این کم شدن اختلاف پتانسیل را **افت پتانسیل** نامند .

مثلاً بین دو نقطهٔ A و B از شکل بالا افت پتانسیل برابر است با $V_A-V_B=r_1I$ (r_1 مقاومت سیم AB و I شدت جریان است) .

مثال - اختلاف پتانسیل بین دو قطب مولد برقی ۲۲۰ ولت ، مقاومت سیمهایی که جریان را از این مولد تا محلی می‌رسانند ۲ اهم ، و شدت جریان در مدار ۱۵ آمپر است . افت پتانسیل درطول راه و اختلاف پتانسیل در محل مصرف برق چقدر است ؟

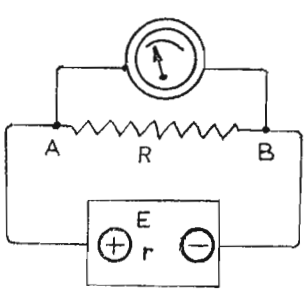
حل - افت پتانسیل از مولد تا محل مصرف برق rI است که در آن $r=2\Omega$ و I مساوی ۱۵ آمپر است .

پس افت پتانسیل $=rI=2\times15=30$ ولت

اختلاف پتانسیل موجود درمحل مساوی است با :

$$V=220-30=190 \text{ ولت}$$

حالت دوم - **قسمتی از مدار که تنها شامل یك مولد است** - مداری مانند شکل ۲۱۷ را که شامل یك مولد و یك مقاومت خارجی R است در نظر می‌گیریم . اگر شدت جریانی که از مدار می‌گذرد I باشد ، در t ثانیه ، انرژی الکتریکی W_1 درمقاومت R به صورت گرما ظاهر می‌شود بطوری که $W_1=RI^2t$ وچون مولد نیز دارای مقاومتی مساوی r است (که به مقاومت داخلی مولد موسوم است) ، مقداری انرژی الکتریکی W_2 در داخل مولد



شکل ۲۱۷

به‌گرما تبدیل خواهد شد بطوری‌که $W_2 = rI^2t$ ، پس انرژی کل W که در t ثانیه در تمام مدار به‌گرما تبدیل می‌شود برابراست با

$$W = W_1 + W_2$$

$$W = W_1 + W_2 = RI^2t + rI^2t = (R+r)I.It$$

وچون $Q = It$ ، رابطهٔ زیر بدست می‌آید :

$$W = (R+r)I \cdot Q$$

ژول اهم آمپر کولن

W مقدار انرژیی است که Q کولن از دست می‌دهد هنگامی که در تمام مدار جریان می‌یابد . این انرژی به توسط مولد تأمین می‌شود .

حال اگر یك کولن الکتریسیته درمدار جاری شود ، انرژی تولید شده $\frac{W}{Q} = (R+r)\,I$ ژول خواهد بود . این انرژی را با حرف E نشان می دهند وآن را **نیروی محرکهٔ مولد** می‌نامند . پس :

$$\text{نیروی محرکهٔ مولد} = E = \frac{W}{Q} = (R+r)I$$

یعنی نیروی محرکهٔ هرمولد مقدار انرژیی است که مولد به‌یك کولن الکتریسیته می‌دهد تا بتواند در تمام مدار جریان یابد .

فرمول بالا را می‌توان به شکل زیر نوشت :

$E = (R+r)I = RI + rI$ و چون $V_A - V_B = RI$ (شکل ۲۱۷)

پس $E = V_A - V_B + rI$

$$V_A - V_B = E - r.I$$

ولت آمپر اهم ولت

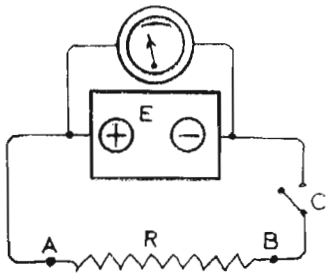
از روی این رابطه ، که به وسیلهٔ آن می توان اختلاف پتانسیل دو سر مولد را بر حسب مشخصات آن بدست آورد ، قانون زیر نتیجه می‌شود :

قانون اهم ـ اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو سرمولد از نیروی محرکهٔ آن به اندازهٔ rI (اُفت پتانسیل مولد) کمتر است ، و وقتی با آن برابرخواهد بودکه $rI = 0$ باشد. برای این یا باید $r = 0$ یا $I = 0$ باشد.

در حالت اول ، یعنی وقتی که مقاومت داخلی مولد ناچیز است $(r \neq 0)$ ، اختلاف پتانسیل بین دوسر مولد ثابت ومساوی E است .

درحالت دوم ، یعنی وقتی که $I = 0$ ، طبعاً جریانی از مدارعبور نمی‌کند ، یعنی مدار باز است . در این حالت $E = V_A - V_B$ خواهد بود و به همین علت است که برای اندازه‌گیری نیروی محرکهٔ هر مولد ، اختلاف پتانسیل دوقطب آن را درمدار باز اندازه می‌گیرند (شکل ۲۱۸).

همچنین اگر مقدار I ناچیز باشد ، یعنی دو سر مولد با مقاومت بسیار بزرگی به یکدیگر وصل شود ، جریان بسیار ضعیفی از مدار خواهد گذشت $(I \neq 0)$ و در نتیجه $rI \neq 0$. در این حالت نیز $V_A - V_B = E$ خواهد بود ، یعنی برای اندازه‌گیری نیروی محرکهٔ مولد کافی است که دو



شکل ۲۱۸

قطب آن را به ولتمتری که مقاومت زیادی دارد وصل کرد و مستقیماً نیروی محرکهٔ آن را در ولتمتر خواند .

یادآوری ـ درصورتی که بین دو نقطهٔ A و B غیرازمولد مقاومت دیگری هم موجود باشد ، درفرمول بالا این مقاومت را نیز باید با مقاومت داخلی مولد جمع کرد .

توان مولد ـ چنانکه دیدیم انرژی W که در t ثانیه به توسط مولدی تولید می‌شود ، درخارج مولد معادل RI^2t ودر داخل آن معادل rI^2t گرما تولید می‌کند ، بطوری که $W=RI^2t+rI^2t$. ولی چون $E=RI+rI$ است ، $W=EIt$ خواهد بود .

توان P یك مولد مقدار انرژیی است که درهر ثانیه به توسط مولد تولید می شود . یعنی : $P=\frac{W}{t}$ پس $P=\frac{W}{t}=\frac{EIt}{t}$

$$P = E \cdot I$$
وات ولت آمپر

مثال ـ مداری شامل یك مولد به‌نیروی محرکهٔ $E=2/5V$، مقاومت داخلی $r=0/2\Omega$، ویك‌سیم به‌مقاومت $R=4/8\Omega$ است . شدت جریان در مدار و اختلاف پتانسیل بین دو سر مولد را حساب کنید .

حل ـ مقاومت کل مدار مساوی است با :

$$R+r=0/2+4/8=5\Omega$$

وچون $E=(R+r)I$

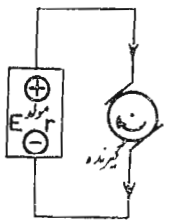
$$I=\frac{E}{R+r}=\frac{2/5}{5}=0/5A$$

بنا برقانون اهم $(V_A-V_B=E-Ir)$:

$$V_A-V_B=2/5-0/5\times 0/2=2/4V$$

حالت سوم ـ قسمتی از مدارکه تنها شامل گیرنده است ـ بطور کلی **گیرنده دستگاهی را گویندکه انرژی الکتریکی را به‌شکل دیگری غیرازانرژی گرمایی تبدیل‌کند ،** مانند ظرف تجزیهٔ شیمیایی و موتور الکتریکی که اولی انرژی الکتریکی را به انرژی شیمیایی و دومی آن را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند .

آزمایش ـ مداری‌که شامل یك مولد و یك گیرنده (ولتامتر یا موتور الکتریکی) باشد مطابق شکل ۲۱۹ تشکیل می‌دهیم . مقاومت گیرنده r' ، مقاومت داخلی مولد r ، ونیروی محرکهٔ آن E است . اگر گیرنده فقط مانند یك سیم مقاوم عمل می‌کرد ، طبق قانون اهم شدت جریان در مدار مساوی $\frac{E}{r+r'}$ می‌بود . ولی



شکل ۲۱۹

شدت جریان حقیقی I که به توسط آمپرمتر اندازه گرفته می‌شود خیلی کمتر از این مقدار است ، یعنی $I<\frac{E}{r+r'}$ یا $E>(r+r')I$ است . آشکار است‌که این کیفیت به واسطهٔ وجود گیرنده در مدار پیش می‌آید . چون مجموع مقاومتهای مدار یعنی $r+r'$ مقداری است ثابت ، چنین بنظر می‌رسد که وجود گیرنده موجب شده است که مقداری از نیروی محرکهٔ E کاسته شود . از این جهت گوییم که گیرنده‌ها دارای نیروی ضد محرکه هستند. مقدار این‌کاهش بستگی به‌گیرنده دارد و ازمشخصات آن است ، به این جهت آن را **نیروی ضدمحرکهٔ گیرنده** می‌نامند و با e نشان می‌دهند .

برای آنکه نا مساوی بالا به یك تساوی تبدیل شود باید نوشت

$$E-e=(r+r')I$$

یا $$E-e=rI+r'I$$

یعنی $$E-rI=r'I+e$$

ولی طبق قانون اهم $$V_A-V_B=E-rI$$

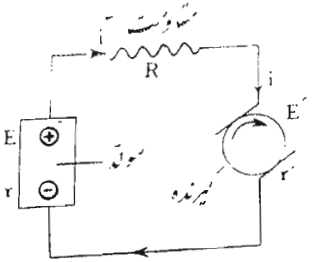
پس $$\boxed{V_A-V_B=r'I+e}$$

از روی این رابطه که بوسیلهٔ آن می‌توان اختلاف پتانسیل دو سر گیرنده را برحسب مشخصات آن بدست آورد، قانون زیر نتیجه می‌شود :

قانون اهم ـ اختلاف پتانسیل بین دو نقطه که شامل یك گیرنده باشد از نیروی ضد محرکهٔ گیرنده به‌اندازهٔ $r'I$ بیشتر است .

$r'I$ افت پتانسیلی است که در مقاومت گیرنده رخ داده است .

در این حال نیز اگر بین دو نقطهٔ A وB غیر از گیرنده مقاومت دیگری نیز موجود باشد ، باید مقاومت آن را نیز با مقاومت گیرنده جمع‌کرد و در فرمول بالا دخالت داد (شکل ۲۲۰) . چون نیروی ضد محرکه ازجنس نیروی محرکه



شکل ۲۲۰

است ، با ولت سنجیده می‌شود .

فرمول بالا را می‌توان با استفاده از انرژی صرف شده در مدار نیز حساب‌کرد .

هنگامی که Q کولن الکتریسیته از A به B جاری می‌شود ، انرژی حاصل درمدار $W=(V_A-V_B)Q$ است. قسمتی از این انرژی یا صرف تجزیهٔ شیمیایی می‌شود یا به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود و

قسمت دیگر در مقاومت داخلی گیرنده به‌گرما تبدیل می‌شود ، بطوری که اگر آنها را با W_1 و W_2 نشان دهیم خواهیم داشت :

$W=W_1+W_2$ ولی $W=(V_A-V_B)Q$ و $W_2=r'I^2t$ ،

پس می‌توان نوشت :

$$W=(V_A-V_B)Q=r'I^2t+W_1$$

چون $Q=It$ است ، اگر طرفین تساوی به Q تقسیم شود نتیجه می‌شود:

$$V_A-V_B=\frac{W_1}{Q}+r'I$$

$\frac{W_1}{Q}$ **مقدار انرژیی است که براثر عبور یك کولن درگیرنده به صورت انرژیی جز انرژی گرمایی (انرژیهای شیمیایی یا مکانیکی) درآمده است . این مقدار انرژی را نیروی ضدمحرکهٔ گیرنده نامند .** بنابراین : $\frac{W_1}{Q}=e$

و فرمول بالا به صورت $V_A-V_B=r'I+e$ درمی‌آیدکه همان فرمول مربوط به‌قانون اهم است .

یادآوری مهم ـ اگر از حرکت موتورالکتریکی که در مداری قرار گرفته است جلوگیری شود ، تمام انرژی الکتریکی به‌گرما تبدیل خواهد شد . دراین صورت دستگاه مانند یك مقاومت تنها خواهد بود و نیروی ضد الکتروموتوری نخواهد داشت . در صورتی که اگر موتور بچرخد دارای نیروی ضد محرکه خواهد بود .

همچنین اگر دو قطب ولتامتری هر دو از جنس فلز الکترولیت باشد ، ولتامتر دارای نیروی ضد الکتروموتوری نخواهد بود ، زیرا در حقیقت هیچ انرژی الکتریکی به انرژی شیمیایی تبدیل نمی‌شود .

توان یك گیرنده ـ چنانکه دیدیم ، هنگامی که یك کولن

الکتریسیته از داخل گیرنده عبور کند ، انرژیی که از دست می‌دهد دو قسمت می‌شود : قسمتی در داخل‌گیرنده تولیدگرما می‌کند و قسمت دیگر صرف تجزیهٔ شیمیایی یا تولید انرژی مکانیکی می‌شود . انرژی گرمایی حاصل در حقیقت انرژی تلف شده است و فقط قسمتی که صرف تجزیهٔ شیمیایی یا تولید انرژی مکانیکی می‌شود **قسمت مفید** انرژی را تشکیل می‌دهد . اگر این قسمت W_1 باشد ، بنا بر آنچه در پیش گفته شد ، $\frac{W_1}{Q}=e$ یا $W_1=eQ$ ، یعنی $W_1=eIt$ پس توان مفید گیرنده برابر است با $P_1=\frac{W_1}{t}=\frac{eIt}{t}$

یا

$$P_1 = e \times I$$

(توان مفید)

وات ولت آمپر

یادآوری ـ اگر منظور محاسبهٔ توان کل (یعنی مجموع انرژیی که در هر ثانیه در گیرنده مصرف می‌شود) باشد باید به مقدار بالا توان گرمایی یعنی $r'I^2$ اضافه شود . بنابراین :

$$P = eI + r'I^2$$

توان کل — توان مفید — توان تلف‌شده

مثال ـ یك باذزن الکتریکی به‌مقاومت 340Ω را به‌یك جریان برق ۲۲۰ ولتی وصل می‌کنیم ، نیم آمپر از مدار عبور می‌کند . نیروی ضدمحرکه، توان مکانیکی ، و توان‌کل مصرف شده را بدست آورید .

حل ـ طبق فرمول اهم $(V_A-V_B=r'I+e)$ نیروی ضد محرکه مساوی خواهد بود با :

$e=V_A-V_B-r'I$ پس $e=۲۲۰-r'I$ و چون

$r'I=۳۴۰\times ۰/۵=۱۷۰$ پس : ولت $e=۲۲۰-۱۷۰=۵۰$

توان مکانیکی مساوی است با : $P_1=eI=۵۰\times\frac{۱}{۲}=۲۵W$

توانی‌که به‌صورت گرما در سیم‌پیچ بادزن مصرف می‌شود مساوی است با :

$$P_2=r'I^2=۳۴۰\times\frac{۱}{۴}=۸۵W$$

و توان‌کل مصرف شده عبارت خواهد بود از :

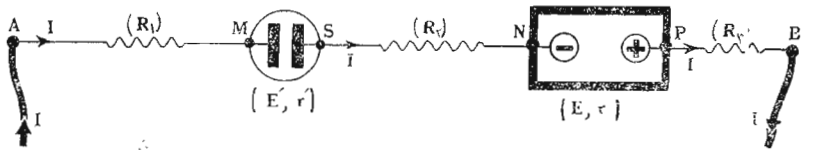
$$P=P_1+P_2=۲۵+۸۵=۱۱۰W$$

یعنی در هر ثانیه از ۱۱۰ وات ، ۲۵ وات آن به‌صورت توان مفید ظاهر شده و ۸۵ وات آن به‌صورت گرما تلف می‌شود .

یادآوری ـ می‌توان توان کل مصرف شده را طبق فرمول عمومی $P=(V_A-V_B)I$ نیز بدست آورد . یعنی

$$P=۲۲۰\times\frac{۱}{۲}=۱۱۰W$$

حالت‌کلی ـ مدار بسته ـ فرض کنیم که بین دو نقطهٔ A و B از مداری ، مولدی به نیروی محرکهٔ E و به مقاومت داخلی r ، گیرنده‌ای به‌نیروی ضدمحرکهٔ E′ و مقاومت داخلی r′ ، ومقاومتهای R_1 وR_2 و R_3 موجود باشد (شکل ۲۲۱). با استفاده از قوانین اهم می‌توان این روابط را دربارهٔ قسمتهای مختلفهٔ موجود بین A و B نوشت :



شکل ۲۲۱

$V_A - V_M = R_1 I$ و $V_M - V_S - E' = r' I$ و $V_S - V_N = R_2 I$

و $V_N - V_P + E = rI$ و $V_P - V_B = R_3 I$. از جمع کردن این روابط چنین نتیجه می‌شود :

$$V_A - V_B + E - E' = I(R_1 + R_2 + R_3 + r + r')$$

و اگر بین دو نقطهٔ A و B از مدار چند مولد و گیرنده و مقاومت بطور سری باشند ، با بکاربردن همین روش بآسانی نتیجه می‌گیریم که اگر ΣE حاصل جمع نیروهای محرکه ، $\Sigma E'$ حاصل جمع نیروهای ضد محرکه ، و ΣR حاصل جمع تمام مقاومتهای موجود بین دو نقطهٔ A و B باشد

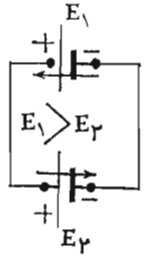
$$V_A - V_B + \Sigma E - \Sigma E' = I\Sigma R$$

این فرمول را فرمول عمومی اهم می‌نامند .

حالت مخصوص ـ هرگاه دو نقطهٔ A و B روی هم فرض شوند ، $V_A = V_B$ و در نتیجه $V_A - V_B = 0$ خواهد بود و فرمول کلی بالا به صورت سادهٔ زیر درمی‌آیدکه به‌قانون پویه[1] موسوم است :

$$\Sigma E - \Sigma E' = I\Sigma R$$

یادآوری مهم ـ اگر در مداری دو مولد بطور متقابل قرار گیرند ، یعنی در یکی از آنها جریان از قطب مثبت داخل و از قطب منفی خارج شود ، آن مولد چون گیرنده‌ای است ، ونیروی محرکهٔ آن از نیروی محرکهٔ مولد دیگر (یا بقیهٔ مولدها) کسر می‌شود . مثلاً در شکل ۲۲۲ مولد E_2 همچون‌گیرنده است و دربارهٔ این



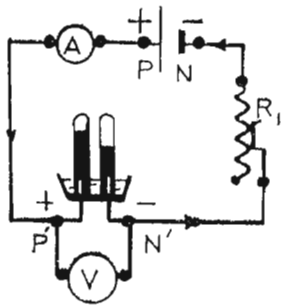
شکل ۲۲۲

۱ - Pouillet (۱۷۹۱-۱۸۶۸)

مدار قانون پویه به صورت زیر نوشته می‌شود :

$$E_1 - E_2 = I(r_1 + r_2)$$

مثال ـ مداری مطابق شکل ۲۲۳ ، ازیك مولد PN به‌نیروی محرکهٔ $E = 6V$ و مقاومت داخلی $r = 0/2\Omega$ ، ازیك ظرف تجزیهٔ $P'N'$ به‌نیروی ضدمحرکهٔ $c = 1/5V$ و مقاومت $r' = 0/1\Omega$ ، از یك رئوستا به مقاومت $R_1 = 4\Omega$ و یك آمپرسنج A به‌مقاومت $R_2 = 5/7\Omega$ تشکیل یافته است . شدت جریان درمدارچقدراست؟



شکل ۲۲۳

حل ـ بنا برفرمول عمومی اهم :

$$I = \frac{E - e}{R_1 + R_2 + r + r'}$$

یعنی

$$I = \frac{6 - 1/5}{4 + 5/7 + 0/2 + 0/1} = 0/45A$$

تمرین

۱ـ از سیمی به‌مقاومت ۵۰ اهم جریانی به‌شدت ۳ آمپرمی‌گذرد. اختلاف پتانسیل بین دو سر سیم چقدر است ؟ جواب : ۱۵۰Ω

۲ـ قدرت یك قوری برقی ۵۰۰W است و با ۲۲۰V کار می‌کند . شدت جریانی‌که از آن عبور می‌کند و مقاومت آن چقدر است ؟

جواب : ۲/۲۷A ، ۹۶/۸Ω

۳ـ روی یك لامپ الکتریکی ۲۲۰V ، ۷۵W نوشته شده‌است ، مقاومت سیم آن چقدر است ؟

۴ـ مداری شامل یك مولد به نیروی محرکهٔ ۲V و مقاومت داخلی ۰/۱Ω ویك سیم به‌مقاومت ۳/۹Ω است . شدت جریان واختلاف پتانسیل بین دو سر مولد را پیدا کنید . جواب : ۰/۵A ، ۱/۹۵V

۵ـ مولدی به‌نیروی محرکهٔ ۵V اگر به‌مقاومت خارجی R وصل شود

یك آمپر و اگر به‌مقاومت $2R$ وصل شود $0/505$ آمپر جریان می‌دهد. مقاومت داخلی این مولد را پیدا کنید . جواب : $0/1\Omega$

۶ـ ولتمتری با مقاومت زیاد که به دو انتهای یك سری انباره وصل شده است ۱۰۰ ولت نشان می‌دهد . اگر قطبهای انباره را به‌مقاومت x وصل کنیم، شدت جریان در مدار ۲۵ آمپر می‌شود و ولتمتر ۵۰ ولت نشان می‌دهد. مطلوب است نیروی محرکهٔ سری انباره ، مقاومت داخلی آن و مقاومت x .

جواب : $100V$ ، 2Ω ، 2Ω

۷ـ مداری ازقسمتهای زیر تشکیل شده‌است : یك مولد به‌نیروی محرکهٔ $E=4V$ و مقاومت داخلی $r=0/1\Omega$ ، یك آمپرمتر به مقاومت $0/1\Omega$ ، یك سیم AB به‌مقاومت 5Ω ویك رئوستا به‌مقاومت R . یك ولت‌سنج اختلاف پتانسیل دو سر AB را برابر $2V$ نشان می‌دهد. شدت جریانی را که آمپرمتر نشان می‌دهد و مقاومت R را تعیین کنید . جواب : $0/4A$ ، $4/8\Omega$

۸ـ اختلاف پتانسیل بین دو قطب یك مولد ، اگر شدت جریان ۲ آمپر باشد، $24V$ و اگر ۳ آمپر باشد $20V$ است . مقاومت داخلی و نیروی محرکهٔ مولد را پیدا کنید . جواب : $32V$ ، 4Ω

۹ـ توان مولدی $5ch$ و نیروی محرکهٔ آن $110V$ ومقاومت داخلی آن $0/4\Omega$ است . بازدهٔ آن (نسبت توان الکتریکی که به خارج داده می‌شود بر توان کل) چقدر است ؟ جواب : $0/87$

۱۰ـ موتور کوچکی به نیروی ضد محرکهٔ $10V$ و به مقاومت داخلی 1Ω به توسط سه مولد مشابه که بطور سری به یکدیگر مربوطند کار می‌کند . شدت جریان در مدار ۲ آمپر و مقاومت داخلی مولدها ناچیز است . نیروی محرکهٔ هریك از مولدها را پیدا کنید . جواب : $4V$

۱۱ـ سه پیل مشابه که نیروی محرکهٔ هریك $1/5$ ولت ومقاومت هریك $0/5\Omega$ است بطور متوالی به‌همدیگر وصل و به ولتامتر آب اسیددار به نیروی ضد محرکهٔ $1/5V$ و مقاومت داخلی $1/5\Omega$ مربوطند . شدت جریان را حساب کنید . جواب : $1A$

۱۲ ـ مداری بطور سری شامل ۴ مولد مشابه به نیروی محرکهٔ $2V$ و مقاومت داخلی $0/2\Omega$ ، یك ولتامتر به‌نیروی ضدمحرکهٔ $1/5V$ ومقاومت داخلی $1/2\Omega$ است . مطلوب است شدت جریان .

اگر مولد مشابه دیگری بطور متقابل در مدار قرار دهیم شدت جریان چقدر خواهد بود ؟ جواب : $3/25A$ ، $2/04A$

۱۳ ـ میان دو نقطه با اختلاف پتانسیل ۲۰ ولت ، یك موتور به‌نیروی ضد محرکهٔ $15/5V$ و یك ولتامتر به‌نیروی ضد محرکهٔ $1/5V$ و مقاومت داخلی $0/4\Omega$ بطور سری وصل شده‌اند . اگر مقاومت موتور $0/6\Omega$ باشد شدت جریان در مدار چقدر است ؟ جواب : $1A$

۱۴ـ مولدی به نیروی محرکهٔ $60V$ و به‌مقاومت داخلی $0/1\Omega$ به موتوری به مقاومت داخلی $0/2\Omega$ و توان مکانیکی $4ch$ وصل شده است. مقاومت سیمهای اتصال کلاً $0/1\Omega$ است . مطلوب است محاسبهٔ شدت جریان و نیروی ضد محرکهٔ موتور؛ درصورتی‌که بازده موتور از ۵۰ درصد بیشتر باشد.

جواب : تقریباً $5A$ ، $58V$

۱۵ ـ پیلی به نیروی محرکهٔ ۲ ولت اگر به یك مقاومت خارجی R وصل شود جریانی معادل $\frac{4}{3}$ آمپر و اگر به مقاومت $2R$ مربوط شود جریانی معادل $\frac{4}{5}$ آمپر در مدار برقرار می‌شود . حساب کنید :

۱ ـ مقاومت داخلی مولد را ؛

۲ ـ اختلاف پتانسیل الکتریکی دو سر مقاومت R را ؛

۳ ـ توان کلی که در مدار شامل مقاومت R مصرف می‌شود .

دانشرای عالی تهران

۱۶ـ یك سیم فلزی به سطح مقطع $2mm^2$ و به‌طول یك‌متر و به‌ضریب مقاومت یك میکروهم سانتیمتر مفروض است . دو سر این سیم را به مولدی به نیروی محرکهٔ ۲ ولت و مقاومت داخلی یك اهم می‌بندیم :

۱ ـ در هرثانیه چند کالری گرما در سیم حاصل می‌شود ؟ $J=4/18$

۲ـ همین سیم را از حدیده‌ای عبور می‌دهیم، بطوری‌که طول آن ۲ برابر شود ، مقدارگرمای حاصل به چه نسبت تغییر می‌کند ؟

دانشکدهٔ علوم مشهد ـ رشتهٔ فیزیك و شیمی

۱۷ـ دریك مدار الکتریکی که ازیك مولد جریان مستقیم ویك مقاومت خارجی (R) تشکیل شده است ، نیروی محرکهٔ الکتریکی مولد (E) مساوی ۱۲ ولت و مقاومت داخلی آن (r) مساوی $0/5$ اهم و مقاومت خارجی مدار (R) مساوی $5/5$ اهم است ، این مقادیر را پیدا کنید :

۱ ـ شدت جریان الکتریکی مدار ؛
۲ ـ اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو سر مقاومت خارجی ؛
۳ ـ توان (قدرت) کلی که درمدار مصرف می‌شود .
۴ ـ چند درصد توان کل در داخل مولد از بین می‌رود ؟

دانشکدهٔ علوم تهران ـ رشتهٔ فیزیك و ریاضی

۱۸ ـ یك مولد برق با نیروی محرکهٔ ثابت $E=۵۲$ ولت و مقاومت داخلی $r=۱$ اهم با یك موتور ویك مقاومت ۵ اهمی (R) که دریك گرماسنج قرار دارد بطور سری در یك مدار واقع شده‌اند .

الف ـ اگرموتور را ازچرخش بازداریم درمدت ۵ دقیقه درمقاومت R حرارتی برابر ۵۷۶۰ کالری تولید می‌شود .

ب ـ وقتی که موتور کار می‌کند مقدار حرارتی که در R تولید می‌شود در مدت ۱۵ دقیقه ۱۰۸۰ کالری می‌باشد . مطلوب است :

۱ ـ مقاومت داخلی موتور ؛
۲ ـ نیروی ضد محرکهٔ موتور ؛
۳ ـ اختلاف پتانسیل بین دوسر موتور .

دانشکدهٔ فنی تهران

۱۹ ـ برای اندازه‌گیری نیروی محرکهٔ E و مقاومت داخلی r یك پیل آزمایشهای زیر را انجام می‌دهیم :

۱ ـ آن را یك بار با پیل معلوم $E_۱$ به نیروی محرکهٔ ۲ ولت ومقاومت داخلی ۰/۶ اهم بطورسری می‌بندیم. ۳/۵ آمپر ازمدارمی‌گذرد ($E_۱>E$) .

۲ ـ بار دوم آن را بطور متقابل با همین پیل $E_۱$ می‌بندیم. شدت جریان ۰/۵ آمپر از مدار می‌گذرد. نیروی محرکه و مقاومت داخلی r را پیدا کنید. از مقاومت سیمهای اتصالی صرف نظر کنید .

هنرسرای عالی تهران

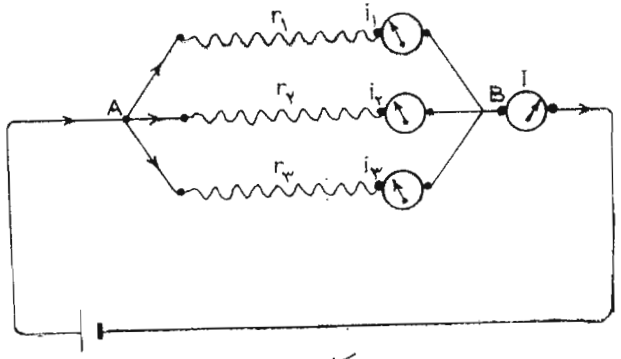
فصل هشتم

مدارهای انشعابی

تاکنون مدارهایی را بررسی کردیم که در آن دستگاههای مختلف برقی ، ازقبیل مقاومت ، مولد، موتور، ... ، بطور متوالی قرار گرفته‌اند. در چنین مدارهایی شدت جریان در سراسر مدار ثابت است .

اکنون مدارهایی را بررسی می‌کنیم که از دو یا چند انشعاب تشکیل شده باشد . اینگونه مدارها را مدارهای انشعابی می‌گویند . در هر یك از انشعابها ممکن است که دستگاههایی برقی قرار داد . در این صورت می‌گویند که این دستگاهها بطور **انشعابی** یا **موازی** قرار گرفته‌اند . جریانهایی را که درمدارهای انشعابی توزیع می‌شود، **جریانهای انشعابی** می‌گویند .

مداری مطابق شکل ۲۲۴ تشکیل می‌دهیم . در انشعابها بترتیب



شکل ۲۲۴

مقاومتهای r_1 و r_2 و r_3 را قرار می‌دهیم . اگر در مدار اصلی و درهریك از انشعابها آمپرمتری قرار دهیم و جریانی در مدار بر قرار سازیم ، مشاهده می‌کنیم‌که شدت جریان I که از مدار اصلی عبور می‌کند مساوی حاصل جمع شدت جریانهای i_1 و i_2 و i_3 است‌که از هریك از مدارهای انشعابی می‌گذرد. یعنی :

$$I=i_1+i_2+i_3$$

باآزمایشهای متعدد دربارهٔ مدارهای انشعابی، می‌توان قانون زیر را که به‌قانون شدتها موسوم است نتیجه‌گرفت :

حاصل جمع شدت جریانهای انشعابی برابر شدت جریان مدار اصلی است .

توزیع جریان بین چند مقاومت انشعابی ـ درمدارشکل۲۲۴ اختلاف پتانسیل بین دو نقطهٔ A و B ، برطبق قانون اهم، به‌صورت یکی از روابط زیر نوشته می‌شود :

$$V_A-V_B=r_1i_1$$
$$V_A-V_B=r_2i_2$$
$$V_A-V_B=r_3i_3$$

بنابراین :

$$r_1i_1=r_2i_2=r_3i_3$$

یا :

$$\frac{i_1}{\left(\frac{1}{r_1}\right)}=\frac{i_2}{\left(\frac{1}{r_2}\right)}=\frac{i_3}{\left(\frac{1}{r_3}\right)}$$

یعنی **شدت جریان درهریك از انشعابها متناسب است باعکس مقاومت آن انشعاب .**

مثال ـ به نقطهٔ A از شکل ۲۲۴ جریانی به شدت ۱۵ آمپر می‌رسد و در سه مقاومت $r_1=2\Omega$ ، $r_2=5\Omega$ و $r_3=8\Omega$ توزیع می‌شود : شدت جریانهای i_1 و i_2 و i_3 را بدست آورید .

حل ـ می‌نویسیم که شدت جریان در هر یك از انشعابها متناسب است با عکس مقاومت آن انشعاب :

$$\frac{i_1}{\frac{1}{2}}=\frac{i_2}{\frac{1}{5}}=\frac{i_3}{\frac{1}{8}}$$

و نیز

$$i_1+i_2+i_3=15$$

پس می‌توان چنین نوشت :

$$\frac{i_1}{\frac{1}{2}}=\frac{i_2}{\frac{1}{5}}=\frac{i_3}{\frac{1}{8}}=\frac{i_1+i_2+i_3}{\frac{1}{2}+\frac{1}{5}+\frac{1}{8}}=\frac{15}{\frac{33}{40}}$$

نتیجه می‌شود :

$$i_1=\frac{1}{2}\times\frac{15\times40}{33}=\frac{100}{11}=9/1A$$

$$i_2=\frac{1}{5}\times\frac{15\times40}{33}=\frac{40}{11}=3/6A$$

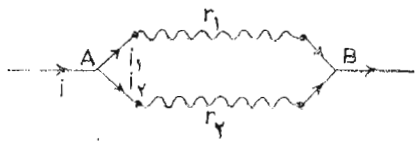
$$i_3=\frac{1}{8}\times\frac{15\times40}{33}=\frac{25}{11}=2/3A$$

یادآوری ـ اگر مدار به دو شعبه تقسیم شده باشد (شکل۲۲۵)، با توجه به‌فرمول $V_A-V_B=r_1i_1=r_2i_2$ نتیجه می‌شود :

$$\frac{i_2}{i_1}=\frac{r_1}{r_2}$$

پس هرچه مقاومت سیم بیشتر باشد جریان کمتری از آن عبور می‌کند .

اگر مقاومت r_2 نسبت به r_1 خیلی بزرگ باشد ($\frac{r_1}{r_2}\neq0$) ، $i_2\neq0$ خواهد بود ، یعنی اگر بین دو نقطهٔ A و B ازمداری، مقاومت بزرگی را بطور انشعاب ببندیم ،



شکل ۲۲۵

شدت جریان درمداراولیه وهمچنین‌اختلاف پتانسیل $V_A - V_B$ محسوساً تغییری پیدا نمی‌کند و به همین علت است که با انشعاب ولت‌سنج که دارای مقاومت زیادی است تغییر محسوسی در شدت جریان مدار اصلی ظاهر نمی‌شود .

مقاومت معادل ـ منظور از مقاومت معادل ، مقاومتی است‌کداگر بدجای مقاومتهای انشعابی گذاشته شود ، شدت جریان I در مدار اصلی و در نتیجه اختلاف پتانسیل بین دو نقطهٔ A و B تغییرنکند .

اگرقانون اهم را دربارهٔ هریك ازمدارهای فرعی بکار ببریم چنین خواهیم داشت : $V_A - V_B = r_1 i_1 = r_2 i_2 = r_3 i_3$ واگر مقاومت معادل R باشد ، $V_A - V_B = RI$ خواهد بود . از روابط بالا نتیجه می‌شود :

$$i_1 = \frac{V_A - V_B}{r_1} \quad , \quad i_2 = \frac{V_A - V_B}{r_2} \quad , \quad i_3 = \frac{V_A - V_B}{r_3}$$

و $I = i_1 + i_2 + i_3 + \cdots$ و چون $I = \dfrac{V_A - V_B}{R}$

پس $$\frac{V_A - V_B}{R} = \frac{V_A - V_B}{r_1} + \frac{V_A - V_B}{r_2} + \frac{V_A - V_B}{r_3}$$

یا $$\boxed{\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}}$$

بنابراین هرگاه چند مقاومت بطور انشعاب به یکدیگر متصل باشند ، عکس مقاومت معادل مساوی است با حاصل جمع عکس مقاومت هر یك از مقاومتها .

مثال ـ جریانی بشدت ۸ آمپر بین دوانشعاب به مقاومتهای $R_1 = 7\Omega$ و $R_2 = 3\Omega$ تقسیم می‌شود . مقاومت معادل و شدت جریان را در هریك از انشعابها حساب کنید .

حل : چون $\dfrac{1}{R} = \dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2}$

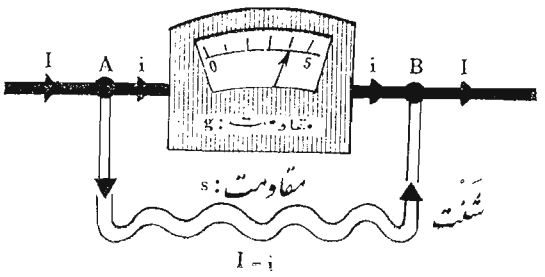
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{7} + \frac{1}{3} = \frac{10}{21} \quad \text{و} \quad R = 2/1\Omega$$

وچون $$RI = R_1 I_1 = R_2 I_2$$

$I_1 = 2/4$ آمپر : یا $2/1 \times 8 = 7 \times I_1$

همچنین $I_2 = 5/6$ آمپر : یا $2/1 \times 8 = 3 \times I_2$

مهار یا **شَنْت ـ** گالوانومترها و آمپرمترهای دقیق نمی‌توانند جریانهای شدید را تحمل‌کنند ، این‌است که برای اندازه‌گیری شدت‌جریانهای‌شدید، این دستگاههارا باید مهار کرد . مهار یا شنت مقاومت کوچکی است که بطور انشعاب بین دو سردستگاه گذاشته می‌شود (شکل ۲۲۶) .



شکل ۲۲۶

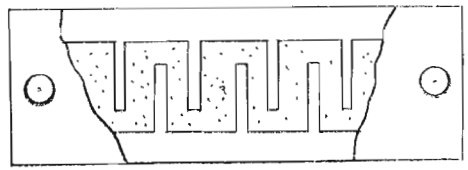
هنگامی که جریان I به نقطهٔ انشعاب A می‌رسد دو قسمت می‌شود . قسمت بسیار کوچك i از گالوانومتر می‌گذرد و قسمت بزرگتر i' یعنی $I - i$ از شنت عبور می‌کند . اگر مقاومتهای شنت و گالوانومتر بترتیب s و g باشد ، طبق آنچه دربارهٔ توزیع جریان در انشعابها گفتیم ، خواهیم داشت :

$$I = i\left(1 + \frac{g}{s}\right) \quad \text{پس} \quad \frac{i}{i'} = \frac{i}{I - i} = \frac{s}{g}$$

اگر s و g در دست باشد ، می‌توان با در دست داشتن i (که به توسط گالوانومتر معلوم می‌شود) مقدار شدت اصلی I را حساب‌کرد .

اگر بخواهیم $\frac{۱}{n}$ جریان اصلی از گالوانومتر بگذرد، یعنی $\frac{I}{i}=n$ باشد ، از فرمول بالا نتیجه می‌شود $n=\frac{I}{i}=۱+\frac{g}{s}$ یا $s=\frac{g}{n-۱}$

یعنی برای این کار باید شنتی انتخاب کرد که مقاومت آن $\frac{۱}{n-۱}$ برابر مقاومت گالوانومتر باشد. مهار از یك تیغهٔ فلزی ساخته می‌شودکه دارای شیارهایی است و در دستگاه جای می‌گیرد (شکل ۲۲۷) .



شکل ۲۲۷

مثال ـ قاب یك آمپرمتر دارای مقاومت ۳۳۳Ω است و $\frac{۱}{۱۰۰۰}$ آمپر را می‌تواند تحمل کند . می خواهیم با این دستگاه جریانی به شدت یك آمپر را اندازه بگیریم . چه مهاری بایدبکاربرد ؟

حل : چون $I=۱A$ و $i=\frac{۱}{۱۰۰۰}A$ است طبق فرمول $I=i\left(۱+\frac{g}{s}\right)$ خواهیم داشت : $\frac{g}{s}=۹۹۹$

یا $s=\frac{g}{۹۹۹}=\frac{۳۳۳}{۹۹۹}=\frac{۱}{۳}\Omega$

قوانین کیرشوف

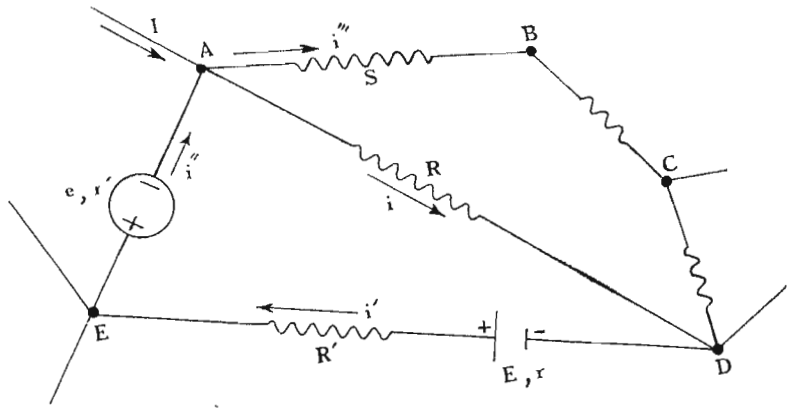
اگر در انشعابها مولد یا گیرنده باشد ، روابطی را که در بارهٔ توزیع

جریان در انشعابها گفته شد ، نمی‌توان بکار برد و فقط قانون شدتها ($I=i_۱+i_۲+i_۳+\cdots$) را همواره می‌توان درتمام مدارهای انشعابی بکار برد .

بطور کلی در بارهٔ هر مدار ، اعم از آنکه در آن مدار مولد یا گیرنده باشد یا نباشد ، می‌توان دو قانون زیر را که به قوانین کیرشوف موسوم است بکار برد :

۱ ـ **مجموع شدت**جریانهایی که به‌یك‌نقطه ازمحل اتصال انشعابها (نقطهٔ انشعاب) نزدیك می‌شود مساوی مجموع شدت جریانهایی است که ازآن نقطه دور می‌شود . مثلاً درشکل ۲۲۸ این قانون در بارهٔ نقطهٔ A چنین می‌شود :

$$I+i''=i+i'''$$



شکل ۲۲۸

۲ ـ **مجموع جبری** اختلاف پتانسیلها در سراسر هر مدار بسته مساوی صفر است .

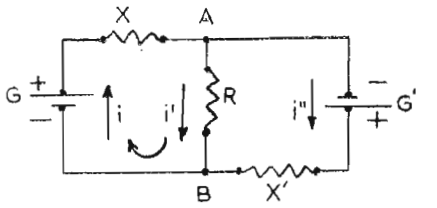
البته هنگام بکار بردن این قانون باید در هر قسمت از مدار ، بر حسب اینکه در آن مقاومت ، مولد ، یا گیرنده وجود داشته باشد ، قانون اهم مربوط به آن را بکار برد . مثلاً اگر در شکل ۲۲۸ بخواهیم این قانون را دربارهٔ مداربستهٔ **ADEA** بکار بریم ، چون در قطعهٔ **AD** تنها مقاومت **R** ، در قطعهٔ **DE** مقاومت **R′** و مولد **E** ، و در قطعهٔ **EA** گیرندهٔ **e** موجود است ، با استفاده از قوانین اهم چنین می‌نویسیم :

$$[V_A - V_D] + [V_D - V_E] + [V_E - V_A] = 0$$

یعنی :
$$[Ri] - [E - i'(r+R')] + [e + i''r'] = 0$$

مثال عددی زیر طرز بکار بستن این دو قانون را روشن می سازد :

مثال عددی ـ مداری مطابق شکل ۲۲۹ از مولد **G** به‌نیروی محرکهٔ $E = 1/4\,V$ ومقاومت داخلی $r = 0/2\,\Omega$ ، مولد دیگر **G′** به‌نیروی محرکهٔ $E' = 1/2\,V$ ومقاومت داخلی $r' = 0/1\,\Omega$ ، ومقاومتهای خارجی $R = 1\,\Omega$ و $x = 1/8\,\Omega$ و $x' = 0/9\,\Omega$ تشکیل یافته‌است، می‌خواهیم شدت جریان را در هر یك از انشعابها بدست آوریم .



شکل ۲۲۹

چون از پیش سوی جریان درشاخه‌های مدار معلوم نیست ، نخستین مرحلهٔ حل مسئله این است‌که برروی هریك‌ازشاخه‌ها، کاملاً باختیار ، یك‌سوی‌جریان انتخاب کنیم و آنها را مانند شکل ۲۲۹ با سهم نشان دهیم . سپس قانونهای کیرشوف را بنویسیم . طبق قانون اول کیرشوف درنقطهٔ **A** داریم :

$$(1)\quad i = i' + i''$$

بابکاربستن قانون دوم در مدار بستهٔ **ABGA** نتیجه می‌شود :

$$Ri' - E + i(x+r) = 0$$

یعنی
$$i' - 1/4 + i(1/8 + 0/2) = 0$$

یا
$$(2)\quad i' + 2i - 1/4 = 0$$

و در مدار بستهٔ **ABG′A** داریم $Ri' - x'i'' - r'i'' + E' = 0$

یعنی
$$i' - 0/9i'' - 0/1i'' + 1/2 = 0$$

یا
$$(3)\quad i' - i'' + 1/2 = 0$$

از حل سه معادلهٔ ۱ و ۲ و ۳ چنین بدست می‌آید :

$i'' = 1$ آمپر $\quad i' = -0/2$ آمپر $\quad i = 0/8$ آمپر

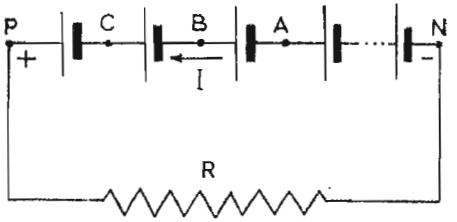
منفی بودن **i′** این را می‌رساند که سویی که برای جریان **i′** اختیار کرده‌ایم درست نیست و سوی واقعی عکس آن است .

به هم بستن پیلها

در مواردی که یك پیل ، برای تأمین اختلاف پتانسیل یا شدت جریان مورد لزوم ، کافی نباشد ، ازچند پیل استفاده می‌کنند . طرز بستن این پیلها برحسب نوع احتیاج (ولت یا شدت زیاد) متفاوت است .

۱ـ **به هم بستن پیلها بطور سری ـ** درشکل ۲۳۰ چند (n) پیل مشابه بطور سری به همدیگر بسته شده‌اند . مجموع این پیلها چون مولد واحدی است که نیروی محرکهٔ آن **nE** و مقاومت داخلی آن **nr** باشد. اگرمقاومت خارجی **R** باشد مجموع مقاومت مدار **R+nr** است و شدت جریان **I** ازقانون اهم نتیجه می‌شود :

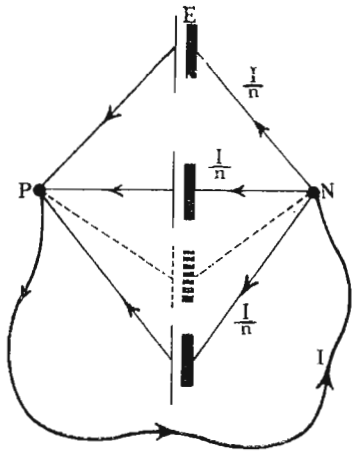
$$I = \frac{nE}{R+nr}$$



شکل ۲۳۰

این نوع اتصال را در مواردی بکار می برندکه نیاز به اختلاف پتانسیلی باشد که یك پیل نمی‌تواند آن را تأمین کند .

۲ - **به‌هم بستن پیلها بطور متوازی** - در اتصال متوازی ، قطبهای منفی تمام مولدها به یك نقطهٔ N و قطبهای مثبت همهٔ آنها به نقطهٔ دیگر P وصل می‌شوند (شکل ۲۳۱) .



شکل ۲۳۱

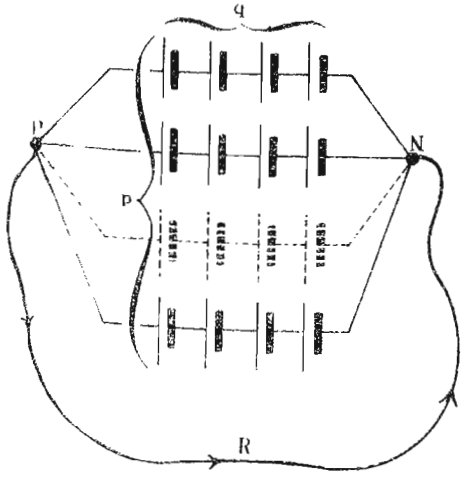
اگر n عدهٔ پیلها و I شدت جریان در مدار اصلی باشد ، از هر یك از مدارهای فرعی ، طبق قانون اول کیرشوف ، جریانی معادل $\frac{I}{n}$ می‌گذرد و اگر نیروی محرکهٔ هر یك از مولدها E باشد ، طبق قانون دوم کیرشوف رابطهٔ زیر بدست می‌آید :

$$E - r\frac{I}{n} - RI = 0 \quad \text{پس} \quad I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}}$$

چنانکه مشاهده می‌شود دراین نوع اتصال مجموع مولدها به‌مانند مولد واحدی است که نیروی محرکهٔ آن E و مقاومت داخلی آن $\frac{r}{n}$ باشد . این نوع اتصال در مواردی بکار می‌رود که نیاز به شدت جریانی باشد که یك پیل نمی‌تواند آن را تأمین کند .

۳- **به‌هم بستن پیلها بطور مختلط** - ممکن است مولدها را در یك اتصال هم بطور سری و هم بطور انشعاب به یکدیگر بست . این

نوع اتصال را اتصال مختلط نامند . درشکل ۲۳۲ دوازده پیل با سریهای چهارتایی و سه انشعاب به یکدیگر بسته شده‌اند .



شکل ۲۳۲

بطور کلی اگر در مداری n عدد پیل را درسریهای q تایی با p انشعاب به یکدیگر ببندیم ($p.q = n$) یك‌چنین دستگاه معادل مولدی است که نیروی محرکهٔ آن qE ومقاومت داخلی آن $\frac{qr}{p}$ است ، چه با بکار بردن قوانین کیرشوف، رابطهٔ زیر بدست می‌آید :

$$qE - qr\frac{I}{p} - RI = 0 \quad \text{پس} \quad I = \frac{qE}{R + \frac{qr}{p}}$$

چون $pq = n$ ، رابطهٔ بالا را به شکل زیر نیز می‌توان نوشت :

$$I = \frac{nE}{pR + qr}$$

تمرین

۱- دو سیم به مقاومتهای ۶Ω و ۴Ω بطور انشعاب بسته شده‌اند . اگر شدت جریان در مدار اصلی ۳۰A باشد ، مقاومت معادل و شدت جریان را در هر یك از سیمها پیدا کنید . جواب : ۲/۴Ω و ۱۲A و ۱۸A

۲- دو سیم به مقاومتهای ۹Ω و ۱۳Ω بطور انشعاب در مداری بسته شده‌اند . اختلاف پتانسیل دو سر انشعاب ۲۰V است . شدت جریان را در مدار اصلی پیدا کنید .

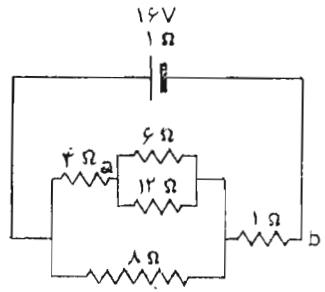
۳ـ بین دو نقطه با اختلاف پتانسیل ثابت ۱۱۰V ، شش لامپ بطور انشعاب می‌بندیم ، لامپها ۲۲ شمعی هستند وبه‌ازای هرشمع ۰/۸۸W انرژی مصرف می‌کنند . حساب کنید :

۱ ـ شدت جریانی را که از هرلامپ عبور می‌کند ؛ ۲ ـ شدت جریان کل را ؛ ۳ ـ مقاومت هرلامپ را . جواب : ۰/۱۷۶A و ۱/۰۵۶۸ و ۶۲۵Ω

۴ـ درمدارشکل مجاور مطلوب است :

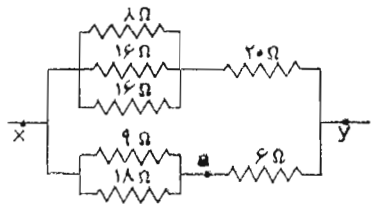
۱ ـ شدت جریان در مولد ؛
۲ـ شدت جریان درهرمقاومت؛
۳ ـ اختلاف پتانسیل بین نقاط a و b .

مشخصات لازم برای هریك از دستگاههای برقی موجود در مدار در شکل نشان داده شده است .



جواب : ۱ ـ ۲ ـ ۲ ـ ازمقاومت یك‌اهمی ۲ آمپر ؛ ازمقاومت ۸ اهمی یك‌آمپر؛ ازمقاومت ۶ اهمی۰/۶۷ آمپر : از مقاومت ۱۲ اهمی ۰/۳۳ آمپر . ۳ ـ ۶V

۵ـ مقاومت معادل بین x و y درمدارشکل مجاور چقدراست؟ اگر شدت جریان در مقاومت ۸ اهمی برابر ۰/۵ آمپر باشد ، اختلاف پتانسیل بین x و a را تعیین‌کنید .
جواب : ۸Ω ، ۱۲V



۶ـ قاب گالوانومتری ۲۰Ω مقاومت دارد . چه مهاری باید به آن بست تا ازگالوانومتر $\frac{1}{100}$ شدت جریان اصلی بگذرد ؟

۷ـ شش پیل متشابه‌که هریك به نیروی محرکهٔ ۲ ولت ومقاومت داخلی ۰/۲Ω است در اختیار داریم . نیروی محرکه و مقاومت داخلی دستگاه را هنگامی که تمام مولدها بطورسری یا بطور متوازی بسته شوند حساب‌کنید .
جواب : ۱۲V ، ۱/۲Ω ، ۲V و ۰/۰۳۲Ω

۸ ـ دو پیل که نیروی محرکهٔ هر یك دو ولت و مقاومت داخلی آنها

ناچیز است با مقاومت ۸Ω و با موتوری به‌نیروی ضد محرکهٔ e ولت ومقاومت داخل rΩ بطور سری قرارگرفته‌اند . شدت جریان در مدار A ۰/۲۵ است. اگر مانع چرخش موتور بشویم شدت جریان A ۰/۴ می‌شود .

۱ ـ نیروی ضدمحرکه و مقاومت داخلی موتور را حساب کنید .

۲ ـ اگر پیلها را بطورمتوازی ببندیم شدت جریان را در دو حالت بالا بدست آورید . جواب : ۱/۵۱ ، ۲Ω ، ۰/۰۵۸ و ۰/۲۱

۹ـ یك باتری آکومولاتور B به نیروی محرکهٔ ۱۵۰ ومقاومت داخلی ۲Ω با یك باتری دیگر B′ به نیروی محرکهٔ ۱۰۴ و مقاومت داخلی ۲Ω بطور متقابل بسته شده‌اند :

۱ ـ شدت جریان و اختلاف پتانسیل بین قطبهای باتریها را پیداکنید.

۲ ـ قطبهای باتریها را به مقاومت R=۸Ω وصل می‌کنیم . شدت جریان را در هر یك از انشعابها بدست آورید .

جواب : ۲/۵A ، ۴۵V ، شدت جریان در R و B ، ۵A و در B′ صفر است .

۱۰ ـ می‌خواهیم از سیمی به مقاومت یك اهم جریانی درست برابر ۲/۵ آمپر عبور دهیم . تعیین کنید که برای این منظور حداقل چند پیل که نیروی محرکهٔ هریك ۱/۵ ولت و مقاومت داخلی هر کدام ۰/۲ اهم می‌باشد باید بکاربرد وچه مقاومت اضافی باید به مقاومت فوق اضافه‌کرد .

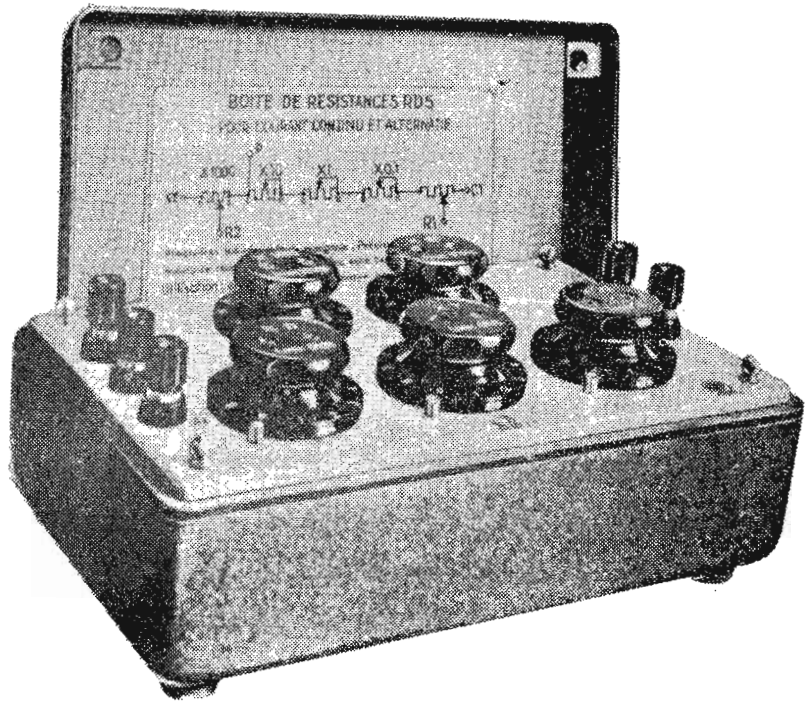
جواب : ۳ پیل ، ۰/۲Ω

۱۱ ـ چراغ قوه‌ای جیبی به قدرت ۲/۵ وات با اختلاف پتانسیل الکتریکی ۵ ولت روشن می‌شود . اگر بخواهیم چراغ نامبرده را با پیل لکلانشه با نیروی محرکهٔ ۱/۵ ولت و مقاومت داخلی ۰/۵ اهم روشن کنیم چند عدد از این پیلها را برداریم وچگونه‌آنها را دسته‌بندی کنیم تا چراغ را روشن کنند ؟

دانشکدهٔ کشاورزی

۱۲ ـ مقاومت‌گالوانومترعقربه‌داری ۳۹۶ اهم‌است وهریك‌ازتقسیمات صفحهٔ آن نمایش ۱۰ میکروآمپر است . برای اینکه این گالوانومتر تبدیل به میلی‌آمپرمتری بشود که هریك از تقسیمات صفحهٔ آن معرف یك میلی‌آمپر شود چه باید بکنیم ؟

دانشکدهٔ علوم تهران ـ رشتهٔ زمین‌شناسی



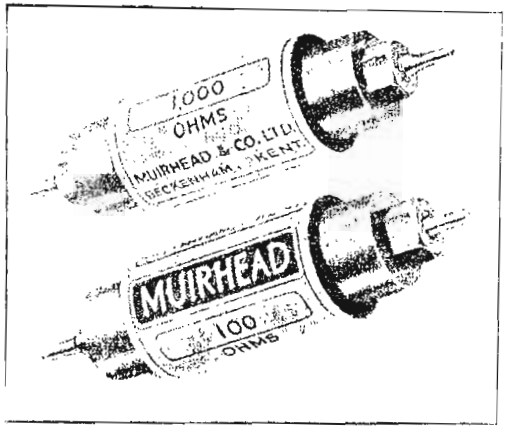
شکل خارجی یك جعبهٔ مقاومت

فصل نهم

اندازه گیری مقاومت الکتریکی

موارد استعمال مقاومت ـ برای بکارانداختن دستگاههای برقی، انرژی الکتریکی را یا مستقیماً از مولدها (مانند پیل ، انباره) یا از برق شهر می‌گیریم . درهردو حالت اختلاف پتانسیلی که دراختیار داریم مقدار معینی است .

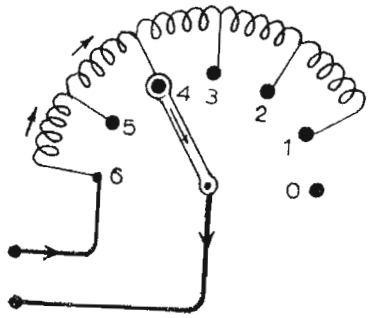
برای اینکه از مداری شدت جریان معینی عبور کند ، طبق قانون اهم ($V_A - V_B = IR$) ، باید مقاومت را چنان انتخاب کرد که این شدت معین حاصل شود . بنابراین لازم می‌آید که مقاومتهای مختلفی در اختیار داشته باشیم . مقاومتها بطورکلی یا ثابتند یا متغیر .



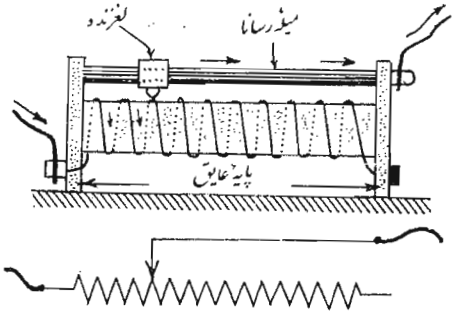
شکل ۲۳۳ ـ شکل خارجی مقاومتهای ثابت

۱ ـ **مقاومتهای ثابت ـ** مقاومتهای ثابت اغلب سیمهایی هستند از آلیاژی با ضریب مقاومت زیاد که دوراستوانهٔ عایقی پیچیده شده‌اند(شکل ۲۳۳) .

۲ ـ **مقاومتهای متغیر یا رئوستاها** ـ شکلهای ۲۳۴ و ۲۳۵ دونوع رئوستا یا مقاومت متغیر را نشان می‌دهد . اولی را رئوستای دسته‌دار و دومی را رئوستای لغزشی می‌نامند . در رئوستای لغزشی یك دکمهٔ فلزی



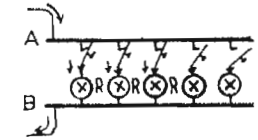
شکل ۲۳۴



شکل ۲۳۵

وجود دارد (لغزنده) که سراسر میله‌ای فلزی می‌تواند جا بجا شود . یك طرف این دکمه همواره با سیم‌پیچ مقاومت تماس دارد. از شکل پیداست که هر چه دکمه را رو به راست حرکت دهیم ، طول سیم که در مدار قرار می‌گیرد بیشتر شده و در نتیجه مقاومت مدار زیادتر می‌شود. بدین ترتیب می‌توان مقاومت را بدلخواه تغییرداد . در رئوستای دسته‌دارهمین عمل با چرخاندن دسته‌ای انجام می‌گیرد ، بدین ترتیب که هرچه دسته را به راست بچرخانیم ، طول قسمتی از سیم مقاوم که داخل مدار می‌شود بیشتر و در نتیجه مقاومت آن زیادتر می‌شود .

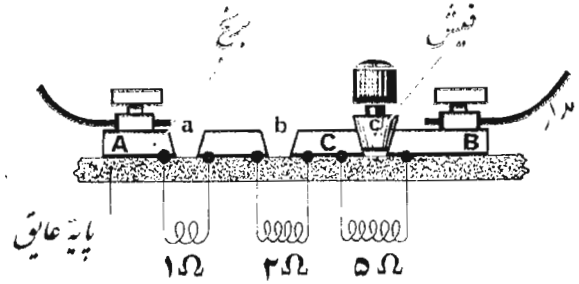
با چند عدد لامپ نیزمی‌توان رئوستا تهیه‌کرد . برای این‌کارکافی است که چند چراغ را بطور انشعاب در مداری ببندیم ، و در مدار هر چراغ کلیدی برای قطع ووصل بگذاریم (شکل ۲۳۶) . طبق قوانین مقاومتهای انشعابی بآسانی می‌توان دریافت که هر چه عدهٔ بیشتری چراغ روشن کنیم مقاومت‌کل مدار کمتر می‌شود .



شکل ۲۳۶

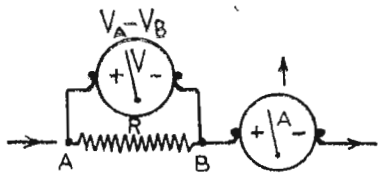
جعبهٔ مقاومت ـ هرجعبهٔ مقاومت مقاومتهای معلوم و معینی دارد که به یك میلهٔ برنجی لحیم شده‌اند . در این میله بریدگیهایی مانند A و B و C و . . . تعبیه شده است . چنانکه از شکل ۲۳۷ پیداست ، هرگاه یك کلید فلزی (فیش) در فاصلهٔ بریدگی قرار گیرد ، دو انتهای مقاومتی که به طرفین بریدگی لحیم شده است به واسطهٔ این کلید به هم مربوط می‌شوند و در نتیجه اگر جریانی از مدار عبور کند تقریباً تمامی

جریان از کلید می‌گذرد و عملاً مقاومتی‌که زیر کلید است حذف می‌شود. بنابراین روی هر مقاومتی که‌کلیدگذاشته شود آن مقاومت از مدار خارج می‌شود و بدین ترتیب با بکار بردن فیشهای متعدد مقاومت معلومی را می‌توان درمدار قرار داد .



شکل ۲۳۷

اندازه‌گیری مقاومتها ـ برای اندازه‌گیری مقاومت یك سیم ، ساده‌ترین روش این است‌که از آن جریانی عبورداده اختلاف پتانسیل الکتریکی‌بین دوسرسیم را باولت‌ـ سنج وشدت جریان را باآمپرسنج اندازه بگیریم سپس از فرمول $V=IR$ مقدار R را تعیین کنیم (شکل ۲۳۸) .

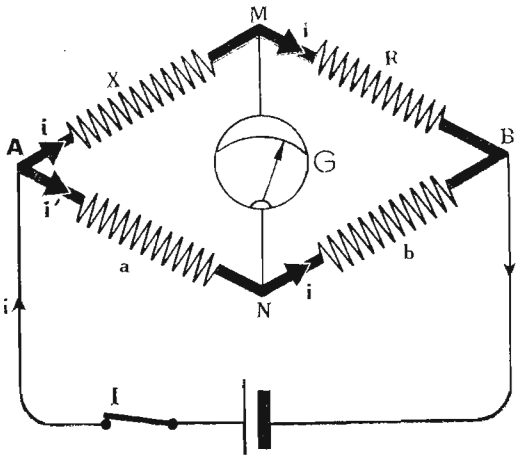


شکل ۲۳۸

البته این روش سریع است ولی دقیق نیست، چه اولاً شدت جریانی که اندازه‌گرفته می‌شود کمی بیش از شدت جریانی است‌که از سیم مقاوم عبورمی‌کند (چون ولت‌سنج بطور انشعاب بین دو سرسیم قرارگرفته‌است) و ثانیاً درخواندن شدت و اختلاف پتانسیل دچار خطا می‌شویم .

برای رفع این معایب از روشی موسوم به **روش صفر** ، که در آن از اسباب سنجش (گالوانومتر) جریانی عبور نمی‌کند ، استفاده می‌کنیم . در زیر روش پل وتستون و پل تار را شرح می‌دهیم :

۱ - **پل وتستون** - دراین روش مدار اصلی بدو انشعاب AMB و ANB وصل است (شکل ۲۳۹) . انشعاب AMB دارای مقاومت معلوم و متغیر R و مقاومت مجهول x است. انشعاب ANB دارای دو مقاومت معلوم و ثابت a و b است .



شکل ۲۳۹

دو نقطهٔ M و N توسط گالوانومتری (آمپرسنج حساس) به هم مربوطند. هرگاه مداربسته باشد ، الکتریسیته در همهٔ شاخه‌های مدار جاری می‌شود . مثلاً در نقطهٔ A شدت I به دو قسمت i و i′ تقسیم شده و به دو انشعاب روان می‌شود . اکنون مقاومت متغیر R را آنقدر تغییر می‌دهیم تا ازگالوانومتر جریانی عبور نکند (روش صفر) . در این حالت اولاً پتانسیل دو نقطهٔ M و N با هم برابرند (وگرنه ازگالوانومترجریان می‌گذشت) وثانیاً شدتهای جریان درx و R وهمچنین در a و b برابرند، و $V_M = V_N$ است . پس : $V_A - V_M = V_A - V_N$ وبنا به‌قانون اهم :

$$xi = ai' \qquad (۱)$$

و همچنین $V_M - V_B = V_N - V_B$ است . پس :

$$Ri = bi' \qquad (۲)$$

از تقسیم روابط (۱) و (۲) نتیجه می‌شود

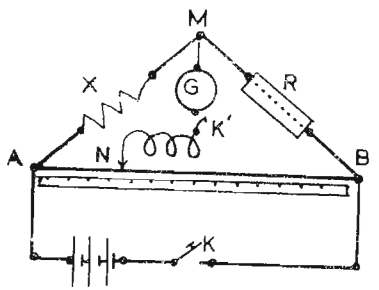
$$\frac{x}{R} = \frac{a}{b}$$

یا

$$x = R\frac{a}{b}$$

در عمل مقاومت a و b ثابت و مقاومت متغیر R یك جعبهٔ مقاومت است .

۲ - **پل تار** - در این پل به‌جای دو مقاومت a و b (پل وتستون) یك قطعه سیم مقاوم AB اختیار می‌کنند . مقدار R را ثابت نگه می‌دارند و با حرکت دادن دکمهٔ N نقطه‌ای را پیدا می‌کنند که جریانی از گالوانومتر عبور نکند (شکل ۲۴۰) . در این حال اگر



شکل ۲۴۰

مقاومت $AN = r_1$ و $NB = r_2$ باشد مانند پل وتستون داریم :

$$\frac{x}{r_1} = \frac{R}{r_2} \qquad \text{یا} \qquad x = R\frac{r_1}{r_2}$$

چون دو قطعه سیم AN و NB از یك جنس و دارای یك سطح

مقطعند ، می‌توان بدجای نسبت مقاومت آنها ، نسبت طولشان را نوشت:

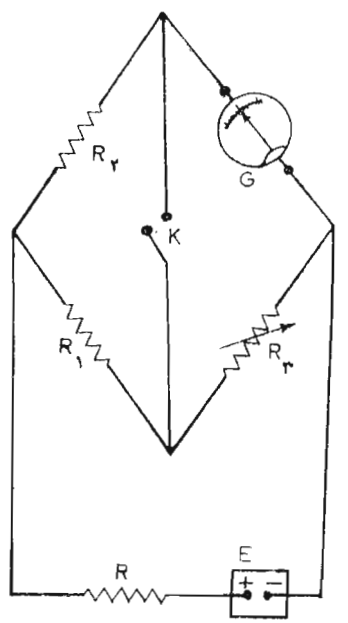
$$x = \frac{RL_1}{L_2}$$

طولهای $AN = L_1$ و $NB = L_2$ به توسط خط‌کشی که زیر سیم قرارگرفته است اندازه‌گیری می‌شود .

تمرین

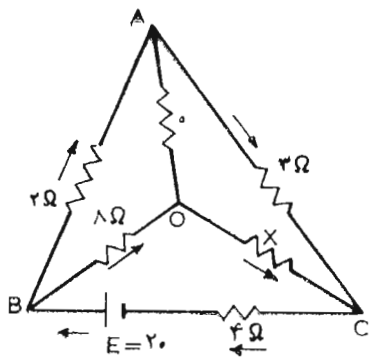
۱ـ دریك پل وتستون در حال تعادل $R = 2\Omega$ و $a = 5\Omega$ و $b = 4\Omega$ است . مقاومت مجهول و دراین حال شدت جریان را در دو شاخهٔ پل بدست آورید، درصورتی‌که نیروی محرکهٔ مولد $2V$ ومقاومت داخلی آن ناچیز باشد.

۲ـ یك رئوستای لامپی دارای سه لامپ است که مقاومت هریك 450Ω است . درصورتی‌که اختلاف پتانسیل بین دوسر رئوستا همیشه $22/5V$ باشد، چه مقاومتهایی با این رئوستا می‌توان تشکیل داد ودرهرحال چه شدت جریانی از رئوستا عبور می‌کند .



۳ـ برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی گالوانومتر G مداری مطابق شکل می‌بندیم که در آن $R = 4\Omega$ ، $R_1 = 50\Omega$ ، $R_2 = 25\Omega$ ومقاومت داخلی مولد ناچیز است . مشاهده می‌شود که هنگامی که مقاومت متغیر R_3 برابر ۲۰ اهم شود با باز و بسته‌کردن کلید تغییری در انحراف گالوانومتر داده نمی‌شود . مقاومت گالوانومتر را بدست آورید . اگر شدت جریانی‌که از مقاومت R می‌گذرد برابر ۳ آمپر باشد ، نیروی محرکهٔ پیل را تعیین کنید .

جواب : $G = 10\Omega$ ، $E = 8/2V$



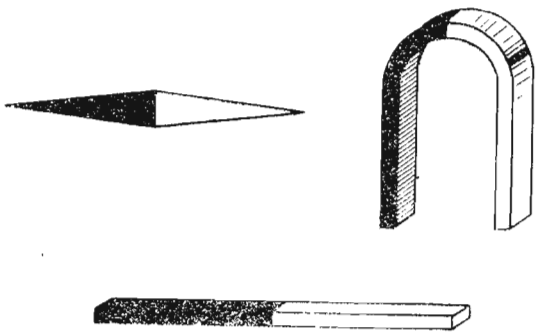
۴ـ درمداری با شکل مقابل جریان در شاخهٔ OA صفر است . مقاومت x و جریانی را که از آن می‌گذرد حساب کنید . اندازهٔ مقاومتهای لازم برحسب اهم واختلاف پتانسیل پیل برحسب ولت روی شکل یادداشت شده است .

فصل دهم

مغناطیس

خواص عمومی آهنربا

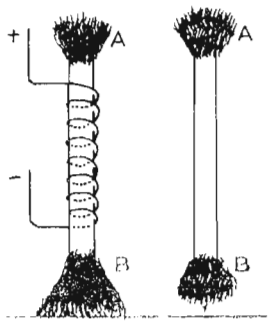
آهنربا به اجسامی گفته می‌شود که دارای خاصیت آهنربایی (مغناطیسی) باشند . اینگونه اجسام می‌توانند آهن و بعضی دیگر از مواد را به طرف خود بکشند . بعضی از سنگ معدنهای آهن (اکسید آهن به فرمول Fe_3O_4) دارای خاصیت آهنربایی می‌باشند. این اجسام را **آهنربای طبیعی** یا **سنگ مغناطیس** می‌نامند .



شکل ۲۴۱

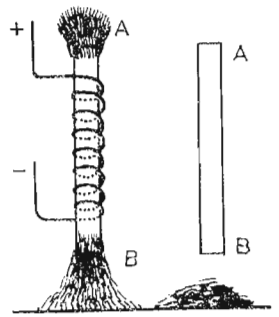
آهنرباهایی را که امروز مورد استفاده قرار می‌دهند ازفولاد ساخته‌اند . اینگونه آهنرباها را **آهنربای مصنوعی** می‌نامند . آهنرباها را ، برای کارهای مختلف ، به‌شکلهای مختلف ، ازقبیل تیغه ، میله ، نعل اسب (شکل ۲۴۱) ، می‌سازند .

طرز ساختن آهنربا - هرگاه یك جسم فولادی‌را باآهنربا مالش دهیم، آهنربا می‌شود. سابقاً آهنرباهای مصنوعی را با این روش می‌ساختند ولی امروز آنها را فقط با روش الکتریکی تهیه می‌کنند .



شکل ۲۴۲

هرگاه یك میلهٔ فولادی را داخل سیم پیچی بگذاریم و از سیم‌پیچ جریان الکتریسیته عبوردهیم، میلهٔ فولادخاصیت آهنربایی‌بخود می‌گیرد وپس ازقطع جریان آن خاصیت را نگاه می‌دارد (آهنربای دائمی - شکل ۲۴۲) . اگر آزمایش را با میلهٔ آهنی انجام دهیم ، مادامی که جریان برقرار است میله آهنرباست ولی بمحض قطع جریان خاصیت‌آهنربایی میله نیز ازمیان می‌رود (شکل ۲۴۳) .

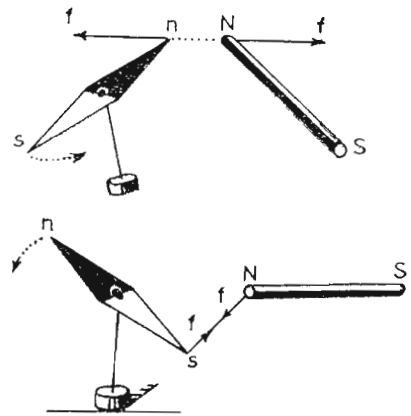


شکل ۲۴۳

قطبهای آهنربا واثر آنها بریکدیگر - هرگاه میلهٔ آهنربایی را در برادهٔ آهن فرو ببریم ، مشاهده می‌کنیم‌که قسمت عمدهٔ ذرات‌آهن به دوسرمیله چسبیده‌اند وهرچه بدوسط میله نزدیکترشویم مقدارکمتری براده چسبیده است ، بطوری‌که در وسط میله اثری از خاصیت آهنربایی مشاهده نمی‌شود یعنی خاصیت آهنربایی بیشتر در دو سر آهنربا که قطبهای آن نام دارد مشاهده می‌شود . اگر میلهٔ آهنربایی را از نقطه‌ای

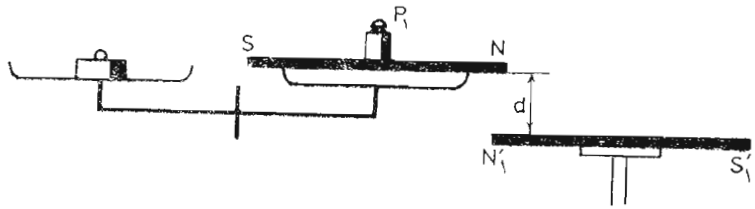
آویزان کنیم ، در امتداد تقریبی شمال و جنوب قرار می‌گیرد . قطبی را که رو به شمال می‌ایستد **قطب شمال** و قطب دیگر را **قطب جنوب** می‌نامند.

اگر قطبهای شمال یا قطبهای جنوب دو آهنربا را به یکدیگر نزدیك کنیم ، همدیگر را دفع می‌کنند . در صورتی که اگر قطب شمال آهنربایی را به قطب جنوب آهنربای دیگری نزدیك کنیم همدیگر را جذب می‌کنند (شکل ۲۴۴) . بنابراین **قطبهای همنام دو آهنربا یکدیگر را دفع و قطبهای ناهمنام یکدیگر را جذب می‌کنند .**



شکل ۲۴۴

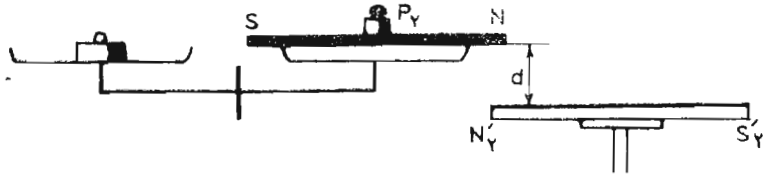
جرم مغناطیسی - آهن‌ربای SN را در کفهٔ ترازویی می‌گذاریم و با قرار دادن وزنه‌ای در کفهٔ دیگر ، تعادل را برقرار می‌کنیم . اکنون N'_1 ، قطب شمال یك آهنربای دیگر را ، به N قطب شمال آهنربای SN نزدیك می‌کنیم (شکل ۲۴۵) . مشاهده می‌شود که تعادل ترازو به‌هم می‌خورد . برای برقراری مجدد تعادل ، وزنهٔ P_1 را در این کفه می‌گذاریم : مقدار این وزنه بستگی به



شکل ۲۴۵

فاصلهٔ $NN'_1 = d$ دارد . هرچه این فاصله بیشتر باشد ، وزنهٔ P_1 کمتر است . تجربه نشان می‌دهد که حاصلضرب P_1 در مجذور فاصلهٔ دو قطب مقداری است ثابت؛ یعنی $P_1 \times d^2 = Cte$. نتیجه می‌گیریم که اگر آهنربا-های SN و $S'_1N'_1$ به اندازهٔ کافی دراز باشند ، می‌توان از اثر قطبهای جنوب S و S'_1 بر هم و بر قطبهای شمال N و N'_1 صرف نظر کرد. از این پس فرض می‌کنیم که آهنرباهای مورد آزمایش به اندازهٔ کافی دراز می‌باشند.

اکنون به جای آهنربای $S'_1N'_1$ آزمایش بالا را با آهنربای $S'_2N'_2$ تکرار می‌کنیم (شکل ۲۴۶) . مشاهده می‌شود که اگر فاصلهٔ $NN'_2 = d$ باشد ، برای ایجاد تعادل مجدد باید وزنه‌ای برابر P_2 در



شکل ۲۴۶

کفه قرارداد. در این آزمایش نیز می‌توان تحقیق کرد که $P_2 \times d^2 = Cte$.

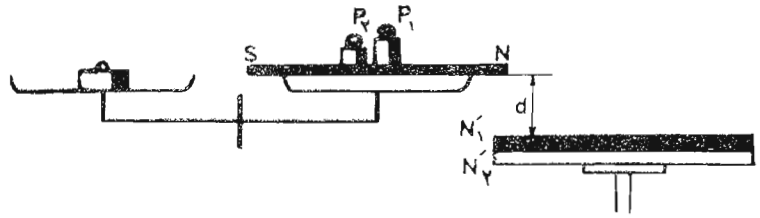
اگر $P_2 = P_1$ باشد ، می‌گوییم که جرمهای مغناطیسی شمال N'_1 و N'_2 با یکدیگر متساویند[1] .

بنابراین : **جرمهای مغناطیسی قطبهای دو آهنربا هنگامی با یکدیگر برابرند که نیروهایی که در فاصلهٔ معین ، هریك از این دو قطب ، بتنهایی ، برقطب یك آهنربای دیگر وارد می‌کنند متساوی باشند .**

---

۱ - جرم مغناطیسی کمیتی است که هیچ ارتباطی به جرم ماده ندارد و نباید آن را با جرم ماده اشتباه کرد ؛ هر چند که از این پس گاهی به جای **جرم مغناطیسی** کلمهٔ سادهٔ **جرم** بکار برده شود .

اکنون آهنرباهای $N'_1S'_1$ و $N'_2S'_2$ را کنار هم طوری قرار می‌دهیم که قطبهای N'_1 و N'_2 بر هم منطبق شوند . و آزمایش بالا را



شکل ۲۴۷

تکرار می‌کنیم (شکل ۲۴۷) . مشاهده می‌شود که هرگاه فاصلهٔ این دو قطب از قطب N آهنربای SN بهمان اندازهٔ d باشد، وزنه‌ای که برای ایجاد تعادل باید درکفه قرار داد برابراست با $P=P_1+P_2$. این نیرو ناشی ازمجموع دو جرم مغناطیسی N'_1 و N'_2 است. می‌توان چنین‌تصور کردکه جرمهای مغناطیسی N'_1 و N'_2 برهم افزوده شده‌اند. پس‌می‌توان گفت که نیرویی که از طرف جرم مغناطیسی M وارد می‌شود متناسب با این جرم است .

بنابراین : **جرم مغناطیسی یك قطب آهنربا متناسب است با نیرویی که این قطب در فاصله‌ای ثابت برقطب یك آهنربای معین وارد می‌کند .**

بدیهی است که در آزمایش بالا قطب N نیز نیرویی برابر P_1 بر قطب N'_1 وارد می‌کند . و این نیرو با m ، جرم مغناطیسی قطب شمال N ، متناسب است . از طرف دیگر این نیرو با m'_1 ، جرم مغناطیسی قطب شمال N'_1 ، نیز متناسب است . پس با حاصل‌ضرب این دو جرم متناسب است . یعنی :

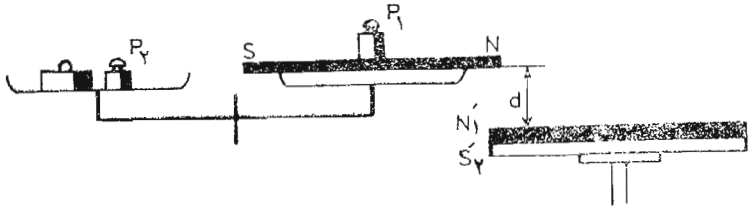
$$P_1 = km \times m'_1$$

جرمهای مغناطیسی مثبت ومنفی - اگردرتجربهٔ شکل ۲۴۵ به‌جای قطب N'_1 آهنربا ، قطب S'_1 آهنربا را به‌قطب N نزدیك کنیم

شکل ۲۴۸

(شکل ۲۴۸)، مشاهده می‌کنیم‌که این دوقطب یکدیگررا جذب می‌کنند و هرچه فاصلهٔ این دو قطب (d)کمتر شود ، نیروی جاذبه بیشتر می‌شود تا بالاخره N خود را به S'_1 می‌چسباند . برای نشان دادن تغییر جهت نیرو ، به جرم مغناطیسی شمال علامت بعلاوه (+) و به جرم مغناطیسی جنوب علامت منها (−) نسبت می‌دهیم . با این قرارداد نیروی دافعه مثبت و نیروی جاذبه منفی می‌باشد . یعنی اگر جرمهای مغناطیسی هم‌علامت باشند (هر دو مثبت یا هر دو منفی) نیرو ، دافعه و مثبت است و اگر هم‌علامت نباشند نیرو ، جاذبه و منفی است .

اکنون آهنرباهای $S'_1N'_1$ و $S'_2N'_2$ آزمایش قبل را طوری



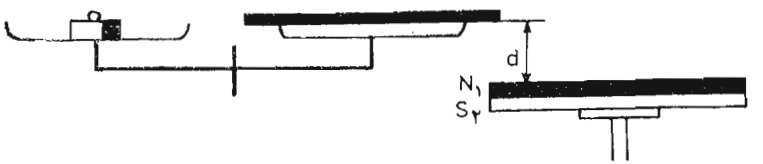
شکل ۲۴۹

کنار هم قرار می‌دهیم که N'_1 و S'_2 بر هم منطبق شوند ؛ یعنی قطب شمال یکی بر قطب جنوب دیگری منطبق شود (شکل ۲۴۹) . فرض

می‌کنیم که درآزمایش قبل P_1 بزرگتر از P_2 بوده است . اکنون آزمایش قبل را تکرار می‌کنیم . مشاهده می‌شود که درفاصلهٔ d نیروی دافعهٔ حاصل کمتر از P_1 است . از آزمایش نتیجه می‌گیریم که جرم مغناطیسی جنوب S'_2 از جرم مغناطیسی شمال N'_1 کم شده است . به‌عبارت دیگر جرمهای مغناطیسی با یکدیگر جمع جبری شده‌اند. بنابراین می‌توان چنین بیان کرد:

اگر جرمهای مغناطیسی شمال را مثبت و جرمهای مغناطیسی جنوب را منفی تصور کنیم ، جرمهای مغناطیسی با هم جمع جبری می‌شوند .

جرم مغناطیسی کل یك آهنربا ـ دوآهنربای متشابه N_1S_1 و N_2S_2 اختیار می‌کنیم . پس از آنکه به‌کمك تجربه کاملاً مطمئن شدیم که جرم مغناطیسی قطبهای N_1 و N_2 باهم برابر وجرم مغناطیسی قطب‌های S_1 و S_2 نیز باهم برابرند، دو آهنربا را چنان برهم منطبق می‌کنیم که قطب شمال یکی برقطب جنوب دیگری منطبق شود . این مجموعه را به آهنربای NS (شکل ۲۵۰) نزدیك می‌کنیم . مشاهده می‌شود که هیچگونه اثری بر آهنربای NS ندارد .



شکل ۲۵۰

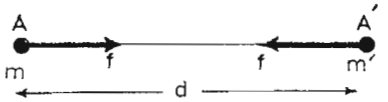
فرض می‌کنیم که m_1 و m'_1 جرمهای مغناطیسی N_1 و S_1 و m_2 و m'_2 جرمهای مغناطیسی N_2 و S_2 باشند . چون دو آهنربا کاملاً متشابهند ، $m_1 = m_2$ است . اما بر طبق تجربه $m_1 + m'_2 = 0$ است . بنابراین می‌توان نوشت $m_2 + m'_2 = 0$ یعنی $m_2 = -m'_2$. این نتیجه را می‌توان چنین بیان کرد :

جرمهای مغناطیسی قطبهای شمال و جنوب یك آهنربا متساوی و با علامت مختلفند .

قانون کولن ـ در آزمایش شکل ۲۴۵ ، مشاهده می‌شود که اگر فاصلهٔ d نصف شود ، باید وزنه را دو برابر کرد تا تعادل ترازو به هم نخورد ؛ و نیز اگر فاصلهٔ d ثلث شود ، باید وزنه را ۹ برابر کرد تا تعادل ترازو به هم نخورد . با تغییردادن فاصلهٔ دو قطب و تکرارآزمایش نتیجهٔ زیرکه به قانون کولن موسوم است بدست می‌آید :

در خلأ ، یا عملاً در هوا ، نیرویی که بین دو قطب دو آهنربا اعمال می‌شود با عکس مجذور فاصلهٔ آنها تغییر می‌کند .

اکنون فرض می‌کنیم که دو جرم مغناطیسی m و m′ به فاصلهٔ p از یکدیگر واقع باشند (شکل ۲۵۱) . نیرویی که بین این دو جرم اعمال می‌شود، بطوری که قبلاً بیان کردیم ، با حاصلضرب mm′ متناسب



شکل ۲۵۱

است . تمام این نتایج را می‌توان به صورت رابطهٔ زیر نشان داد :

$$f = K \frac{m.m'}{d^2}$$

این رابطه (فرمول کولن) درخلأ ، یا عملاً درهوا ، برقرار است. ضریب K بستگی به‌انتخاب واحدهای اندازه‌گیری دارد .

واحد جرم مغناطیسی ـ واحد جرم مغناطیسی عبارت از جرم مغناطیسیی است که اگر ، درخلأ ، به‌فاصلهٔ یك سانتیمتر از جرم مغناطیسی مشابه خود قرار گیرد ، بر آن نیرویی برابر یك دین وارد شود . این

واحد نام بخصوصی ندارد و آن‌را واحد جرم مغناطیسی در دستگاه C.G.S. می‌نامند .

برطبق تعریف بالا ، فرمول کولن را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$f = \frac{m.m'}{d^2}$$

در این فرمول f بر حسب دین و d برحسب سانتیمتر است .

یادآوری ـ اگر نیوتن واحد نیرو و متر واحد فاصله باشد ، واحد جرم مغناطیسی را واحد جرم مغناطیسی در دستگاه M.K.S.A. می‌نامند . در این دستگاه فرمول کولن به صورت $f = 10^{-7}\frac{m.m'}{d^2}$ نوشته می‌شود . این فرمول نشان می‌دهد که واحد جرم مغناطیسی در دستگاه M.K.S.A. ده‌برابر واحد جرم مغناطیسی در دستگاه C.G.S. است .

مثال ۱ ـ دو قطب شمال متشابه ، به فاصلهٔ ۲cm از یکدیگر واقعند و یکدیگر را با نیروی ۱gf دفع می‌کنند . جرمهای مغناطیسی این دو قطب را حساب کنید .

حل ـ کافی است که در فرمول کولن بنویسیم:

$$d = 2cm \ ، \ f = 1gf = 981dyn \ ، \ m = m'$$

نتیجه می‌شود :

$$f = \frac{m^2}{d^2} \Rightarrow m^2 = f.d^2$$

$$m = d\sqrt{f} = 2\sqrt{981} = 62/6$$

واحد C.G.S. جرم مغناطیسی $m = 62/6$

یادآوری ـ حل مسئله در دستگاه M.K.S.A. به این ترتیب است:

$$f = 10^{-7}\frac{m^2}{d^2} \Rightarrow m^2 = 10^7 f.d^2$$

$$m = d\sqrt{10^7 f}$$

$$m = 0/02\sqrt{10^7 \times \frac{9/81}{1000}} = 2\sqrt{9/81}$$

واحد M.K.S.A. جرم مغناطیسی $m = 6/26$

مثال ۲ ـ قطب جنوب S_2 به جرم مغناطیسی 22/6C.G.S. را بر N_1 یکی از دو قطب شمال مربوط به مثال ۱ منطبق می‌کنیم . در همان فاصله نیروی دافعه جدید را پیدا کنید .

حل ـ جرم مغناطیسی مجموعهٔ N_1S_2 برابر است با

واحد C.G.S. $m = 62/6 - 22/6 = 40$

قطب دیگر شمال تغییر نکرده است و جرم مغناطیسی آن همان ۶۲/۶ واحد است . بنابراین نیروی دافعه :

$$f' = \frac{40 \times 62/6}{4} = 626dyn$$

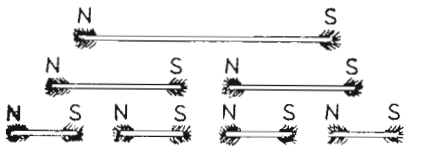
یا

$$f' = 0/638gf$$

نظریهٔ آهنربایی

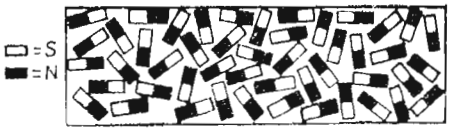
آزمایش آهنربای شکسته ـ یك میلهٔ آهنربا را از وسط دوپاره می‌کنیم . مشاهده می‌شود که وسط میله ، که ابتدا فاقد خاصیت مغناطیسی بود ، پس از قطع شدن ، آهنربا می‌شود و هر یك از قطعات مانند یك

آهنربای کامل است ، یعنی دو قطب دارد. اگر قطعات جدید را هم تقسیم کنیم ، مجدداً هر قطعه یك آهنربای کامل خواهد بود (شکل۲۵۲) . این آزمایش را می‌توان تا جایی که



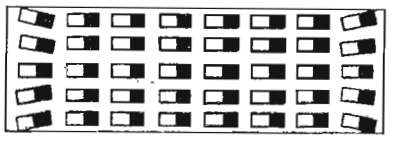
شکل ۲۵۲

مقدور است ادامه داد و مشاهده کرد که هر قطعه از یك آهنربا ، هر قدر هم کوچك باشد ، یك آهنربای کامل است . پس هیچگاه نمی‌توان یك قطب شمال را از قطب جنوب جدا کرد . بنابراین



۲۵۳

چنین فرض می‌کنیم که مولکولهای هر آهنربا خود آهنربا هستند و مادامی که این مولکولها بطور منظم قرار نگرفته‌اند جسم خاصیت آهنربایی نشان نمی‌دهد و خاصیت مغناطیسی جسم وقتی پدیدار می‌شود که مولکولهای آن منظم


شکل ۲۵۴

قرار گیرند . در حقیقت هنگامی که مولکولهای آهنربایی منظم نباشند اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند و در نتیجه جسم خاصیت آهنربایی نشان نمی‌دهد (شکل ۲۵۳) . درصورتی که اگر مولکولها منظم قرار گیرند ، در وسط میله آهنرباهای کوچك اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند ولی

هرچه به دو سر نزدیکتر شویم اثر آهنربایی بیشتر مشهود می‌شود (شکل ۲۵۴) .

توجیه چند خاصیت مغناطیسی با فرضیهٔ آهنربایی - هنگامی که آهنربا را بشدت گرم کنیم ، خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهد زیرا گرما باعث حرکت سریع مولکولها شده آنها را از نظم خارج می‌کند .

اگر یك میلهٔ آهنی را بطور قائم نگاه داریم و با چکش ضربه‌هایی به انتهای آن واردسازیم ، خاصیت آهنربایی پیدا می‌کند. براثر ضربه‌های متوالی چکش ، مولکولها بطور منظم قرار می‌گیرند .

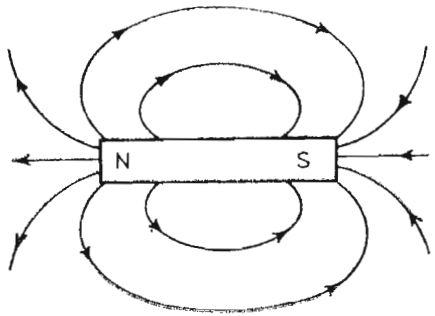
هنگامی که یك میلهٔ مغناطیسی را چندبار **در یك جهت** روی میلهٔ فولادی مالش دهیم فولاد آهنربا می‌شود ، زیرا که براثر میدان مغناطیسی آهنربا ، مولکولهای فولاد بطور منظم قرار می‌گیرند .

هرگاه یك آهنربا را به یك میلهٔ فولادی نزدیك کنیم، میلهٔ فولادی خاصیت آهنربایی پیدا می‌کند ، زیرا میدان مغناطیسی آهنربا در مولکولهای فولاد تأثیر می‌کند و آنها را کما بیش حرکت داده بطور منظم قرار می‌دهد. آهنربایی که بدین ترتیب تهیه می‌شود **آهنربای مجاورتی** نامیده می‌شود .

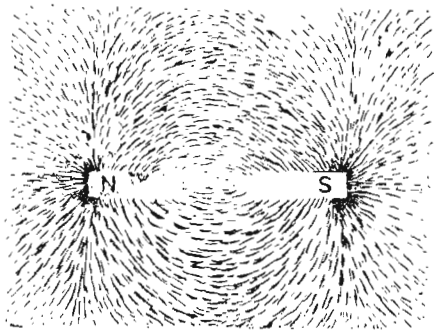
میدان مغناطیسی

تعریف میدان مغناطیسی - هرگاه روی یك آهنربا مقوایی بگذاریم و بآرامی برادهٔ آهن بر روی آن بپاشیم ، ذرات آهن بر اثر

نیروی مغناطیسی ، بر روی خطهای مخصوصی که به خطوط نیرو موسومند قرار خواهند گرفت . این خطوط را طیف مغناطیسی نامند (شکلهای ۲۵۵ و ۲۵۶). همچنین اگر چند عقربهٔ مغناطیسی در اطراف آهنربا قراردهیم، هریك ازعقربه‌ها، بر اثر نیروی آهنربایی ، در امتداد معینی مماس برخطوط نیرو می‌ایستد . از این آزمایشها نتیجه می‌شود که در هر نقطه از فضای اطراف آهنربا آثار مغناطیسی وجود دارد . بنا به تعریف ، **فضایی که در آن خاصیت آهنربایی مشهود می‌شود میدان مغناطیسی آهنربا نامیده می‌شود.** آشکار است که در نقاط نزدیك به قطبهای آهنربا آثار مغناطیسی شدیدتر و در نقاط دورتر ضعیف‌تر است .



شکل ۲۵۵



شکل ۲۵۶

شدت میدان مغناطیسی ـ بنا به‌تعریف، شدت میدان مغناطیسی درنقطهٔ معین عبارت از نیرویی است‌که یك قطب آهنربا ، برواحد جرم مثبت مغناطیسی‌که در آن نقطه قرارگرفته است ، واردمی‌کند . اگرجرم مغناطیسی قطب آهنربا **M** و فاصلهٔ نقطهٔ **A** که در آن واحد جرم مثبت مغناطیسی‌گذاشته شده است ازقطب‌آهنربا **d** باشد ، بنا به فرمول کولن ،

نیروی وارد بر واحد جرم واقع در نقطهٔ A ، یعنی شدت میدان در این نقطه ، برابر خواهد بود با :

$$H=\frac{M}{d^2} \quad \text{یا} \quad H=\frac{M\times 1}{d^2}$$

H بزرگی نیرویی است‌که بر واحد جرم مغناطیسی وارد می‌شود. اگر جرم مغناطیسی در نقطهٔ A مساوی **m** باشد ، بزرگی نیروی وارد **m.H** خواهد بود ، و بطورکلی می‌توان نوشت :

$$\vec{F}=m\vec{H}$$

اگر $m>0$ باشد (قطب شمال) $\vec{F}$ و $\vec{H}$ همسو هستند و گرنه در سوی مخالف یکدیگرند .

یادآوری ـ شدت میدان مغناطیسی را امروز **بردار القای مغناطیسی** می‌نامند .

واحد شدت میدان‌مغناطیسی ـ واحد شدت میدان مغناطیسی، شدت میدانی است‌که برواحد جرم مغناطیسی نیرویی برابر با واحد وارد می‌کند .

در دستگاه C.G.S. که دین واحد نیروست ، **گوس**[1] (با علامت اختصاری Gs) واحد شدت میدان مغناطیسی است .

در دستگاه M.K.S.A. که نیوتن واحد نیروست ، **تسلا**[2] (با علامت اختصاری T) واحد شدت میدان مغناطیسی است. دراین دستگاه واحد شدت میدان مغناطیسی نام دیگری نیز دارد که کمتر بکار برده

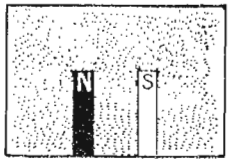
---

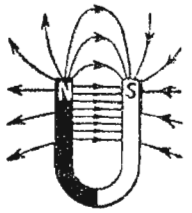
۱ ـ Gauss (۱۷۷۷ ـ ۱۸۵۵) فیزیکدان و ریاضیدان آلمانی .

۲ ـ Tesla (۱۸۵۶ ـ ۱۹۴۳) فیزیکدان اتریشی .

امتداد $\vec{H}$ به موازات NS و جهت آن در جهت $\overrightarrow{AH}$ است .

میدان یکنواخت ـ اگرطیف یك‌آهنربای نعلی را مطالعه‌کنیم، مشاهده می‌شود که در وسط دو شاخهٔ آن ، ذرات آهن تقریباً موازی هم قرار گرفته‌اند (شکل ۲۵۸) . اگر شدت میدان آهنربایی را در این ناحیه اندازه بگیریم مشاهده می‌کنیم‌که در تمام نقاط مقدار آن یکسان است . می‌گویند میدان مغناطیسی دراین ناحیه یکنواخت است .



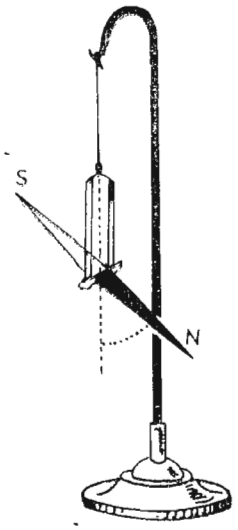


شکل ۲۵۸

بنابر این اگر شدت میدان در نقاط مختلف از حیث امتداد ، سو و بزرگی یکسان باشد ، میدان را یکنواخت گویند . میدان مغناطیسی زمین در یك فضای محدود یکنواخت است .

میدان مغناطیسی زمین

مشاهدات ـ یك عقربهٔ مغناطیسی را در محلی که دور از هر نوع آهنربا و جریان الکتریکی باشدآویزان می‌کنیم، مشاهده‌می‌شود که این عقربه همواره در امتداد تقریبی شمال و جنوب می‌ایستد (شکل ۲۵۹) .



شکل ۲۵۹

خطهای راه‌آهن و لوله‌هایی که در امتداد شمال و جنوب کشیده شده‌اند کمابیش خاصیت

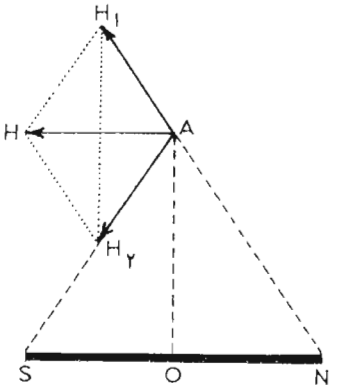
می‌شود. این نام **وبر**[1] **برمترمربع** (با علامت اختصار Wb/m^2) است.

بدیهی است‌که $T=10^4 Gs$ (چرا ؟)

مثال ـ درازی آهنربای SN برابر ۲۴cm است . جرم مغناطیسی قطب شمال این آهنربا ۵۰+ واحد C.G.S. است. شدت میدان مغناطیسی این آهنربا در نقطهٔ A واقع بر عمود منصف SN چقدر است ؟ نقطهٔ A در ۱۶ سانتیمتری آهنربا واقع است (شکل ۲۵۷) .

حل ـ $\vec{H}$ ، شدت میدان مغناطیسی‌آهنربا درنقطهٔA، برآیند دوشدت میدان است . یکی $\vec{H}_1$، شدت میدان مغناطیسی حاصل ازقطب شمال ودیگری $\vec{H}_2$ ، شدت میدان مغناطیسی حاصل از قطب جنوب .

نقطهٔ A از نقاط N و S به یك فاصله قرار گرفته است . پس بزرگی این دو شدت متساوی است :



شکل ۲۵۷

$$H_1=H_2=\frac{m}{d^2}=\frac{50}{\overline{AN}^2}$$

داریم : $\overline{AN}^2=\overline{AO}^2+\overline{ON}^2$

$=16^2+12^2=400$

پس :

$$H_1=H_2=\frac{50}{400}=0/125Gs$$

بزرگی $\vec{H}$، قطرمتوازی‌الاضلاع AH_1HH_2، را از تشابه مثلثهای AHH_1 و NSA بدست‌می‌آوریم:

$$\frac{AH}{NS}=\frac{AH_1}{NA}\Longrightarrow H=H_1\frac{NS}{NA}$$

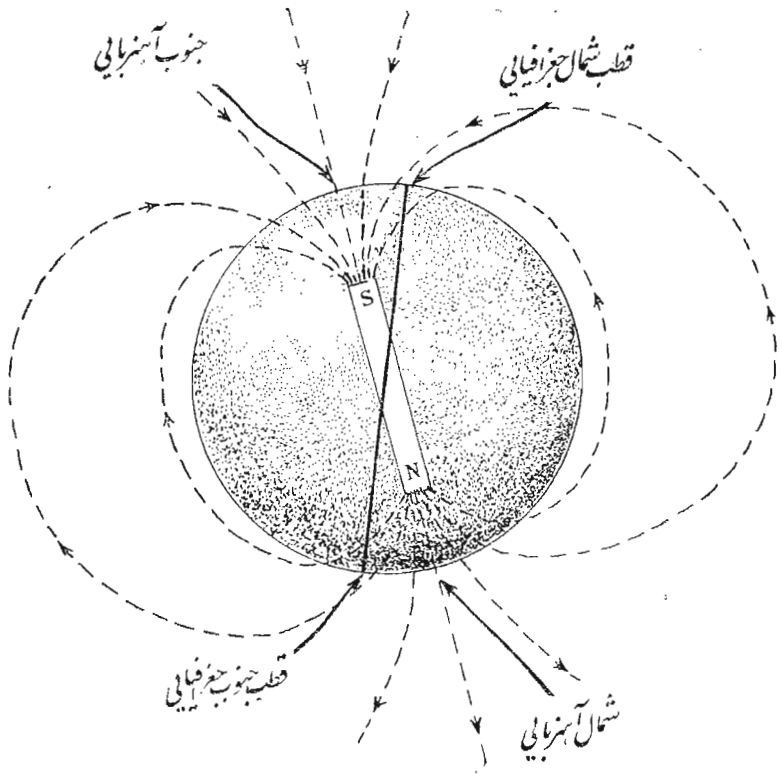
$$H=0/125\times\frac{24}{20}=0/15Gs=1/5\times10^{-5}T$$

---

۱ ـ Weber (۱۸۹۱ - ۱۸۰۴) فیزیکدان آلمانی .

آهنربایی دارند ، درصورتی که خطوط و لوله‌هایی که در امتداد شرق و غرب هستند این خاصیت را ندارند .

اگر میله‌ای آهنی را از ارتفاعی رها کنیم، پس از سقوط ، اندکی خاصیت آهنربایی به خود می‌گیرد . از توجه به این مشاهدات می‌توان



شکل ۲۶۰

چنین نتیجه‌گرفت که در فضای اطراف کرهٔ زمین میدانی موسوم به میدان مغناطیسی زمین موجود است . امتداد و بزرگی و جهت این میدان را در هر نقطه از کرهٔ زمین می‌توان تعیین کرد . تجربه‌های متعدد نشان داده

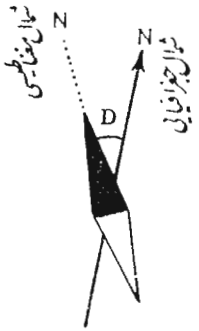
است که میدان مغناطیسی زمین در ناحیه‌ای محدود و در نزدیکی سطح زمین محسوساً یکنواخت است .

درقدیم چنین می پنداشتند که عقربه‌های مغناطیسی ، براثرجاذبهٔ ستارگان ، امتداد ثابت و معینی بخود می‌گیرند ، ولی اولین دفعه ویلیام گیلبرت ، کرهٔ زمین را مانند آهنربای بزرگی که امتداد آن در امتداد تقریبی محور زمین است فرض کرد (شکل ۲۶۰) .

گیلبرت چنین می‌پنداشت‌که زمین ازماده‌ای نظیرسنگ مغناطیسی (Fe_3O_4) ساخته شده است و وجود میدان آهنربایی بر اثر خاصیت مغناطیسی خود ماده‌ای است که زمین را تشکیل داده است . با اینکه تا امروز نظریهٔ دقیقی دربارهٔ علت وجود میدان مغناطیسی زمین بیان نشده، معلوم شده است که نظریهٔ گیلبرت نیز درست نیست و قدرمسلم این است که در تولید میدان مغناطیسی زمین حرکت دورانی آن ولکه‌های خورشید نقشی اساسی دارند .

زاویه‌های انحراف و میل - جهاتیابی

زاویهٔ انحراف ـ هرگاه یك آهنربا را که بتواند به‌دور یك‌محور

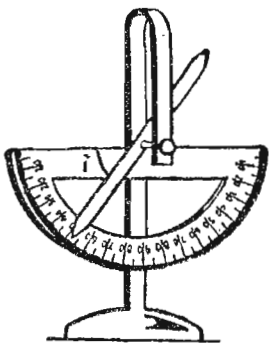


شکل ۲۶۱

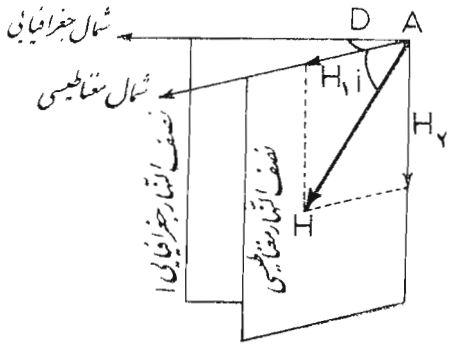
قائم بچرخد ، در محلی که دور از هر نوع آهنربای دیگر وجریان برق باشد بگذاریم ، مشاهده می‌کنیم که در حالت تعادل امتداد آن کاملاً بر امتداد شمال و جنوب جغرافیایی منطبق نیست بلکه زاویه‌ای بین این دو امتداد وجود دارد (شکل ۲۶۱) و این زاویه را ، که در شکل با **D** نشان داده شده ، **زاویهٔ انحراف** گویند . به

عبارت دیگر زاویهٔ انحراف یك محل زاویه‌ای است که بین سطح نصف ـ النهار مغناطیسی[1] و سطح نصف‌النهار جغرافیایی محل موجود است. مقدار زاویهٔ انحراف بستگی با محل آزمایش دارد با آزمایشهای متعدد مقدار این زاویه را در نقاط مختلف کرهٔ زمین تعیین کرده و برای هر منطقه نقشه‌هایی تهیه نموده‌اند که از روی آنها بآسانی می توان زاویهٔ انحراف را در هرمحل تعیین نمود . در یك محل مقدار زاویهٔ انحراف برحسب زمان اندکی تغییر می‌کند .

زاویهٔ میل ـ اگر درآزمایش بالا عقربهٔ مغناطیسی بتواند به‌دور



شکل ۲۶۲



شکل ۲۶۳

یك محور افقی بچرخد ، مشاهده می‌کنیم که در حالت تعادل ، امتداد آن معمولاً افقی نیست بلکه با سطح افقی زاویه‌ای می‌سازد . زاویه‌ای که امتداد عقربهٔ مغناطیسی در سطح نصف‌النهار مغناطیسی با سطح افقی می‌سازد **زاویهٔ میل** نامیده می‌شود (زاویهٔ i درشکلهای ۲۶۲ و ۲۶۳) . اگر قطب شمال عقربه رو به زمین باشد زاویهٔ میل را مثبت و اگر رو به بالا باشد آن را منفی می‌گیرند . در نیمکرهٔ شمالی زاویهٔ میل مثبت و

۱ ـ سطح قائمی‌که ازامتداد عقربهٔ مغناطیسی عبورکند سطح نصف‌النهار مغناطیسی نامیده می‌شود .

در نیمکرهٔ جنوبی منفی است . زاویهٔ میل نیز مانند زاویهٔ انحراف با تغییرزمان و مکان تغییر می‌کند .

$\vec{H}$ شدت میدان مغناطیسی زمین را می‌توان به‌دومؤلفه تجزیه‌کرد: یکی $\vec{H_1}$ مؤلفهٔ افقی و دیگری $\vec{H_2}$ مؤلفهٔ قائم . مؤلفهٔ افقی زمین‌عملاً اهمیت بسیار زیاد دارد ؛ زیرا تنها $\vec{H_1}$ است که یك میلهٔ آهنربایی را حول محور قائم بحرکت در می‌آورد و آن را در امتداد شمال و جنوب مغناطیسی قرار می‌دهد .

مثال ـ اگر مؤلفهٔ افقی شدت میدان مغناطیسی زمین $H_1 = 0/2 Gs$ و زاویهٔ میل $i = 60°$ باشد ، مقدار شدت میدان مغناطیسی زمین و مؤلفهٔ قائم آن را پیدا کنید .

حل ـ برطبق شکل ۲۶۳ می‌توان نوشت :

$$H_2 = H_1 tg i \qquad \text{و} \qquad H = \frac{H_1}{\cos i}$$

پس $H_2 = 0/2 tg 60° = 0/346 Gs$

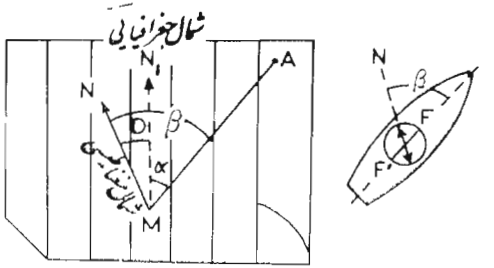
$$H_2 = 346 \times 10^{-7} T$$

و $H = \frac{0/2}{\cos 60°} = 0/4 Gs$

$$H = 4 \times 10^{-5} T$$

جهانیابی ـ استفاده از قطبنما برای جهانیابی از زمان خیلی قدیم معمول بوده است . اگر زاویهٔ انحراف D درمحلی معلوم باشد ، می‌توان امتداد شمال و جنوب جغرافیایی آن را بآسانی بدست آورد . کافی است که ابتدا توسط قطبنما امتداد شمال و جنوب مغناطیسی را تعیین

کرد ، سپس با درنظرگرفتن زاویهٔ انحراف محل ، امتداد شمال و جنوب جغرافیایی را معین نمود .



شکل ۲۶۴

در شکل ۲۶۴ ، اگر زاویهٔ انحراف غربی و مقدار آن D باشد وعقربهٔ مغناطیسی در امتداد MN قرار گیرد ، امتداد شمال و جنوب جغرافیایی MN_1 خواهد بود . از این روش در کشتیرانی برای تعیین جهت حرکت کشتی و توجیه آن با نقشه استفاده می‌شود . فرض کنیم که کشتی بخواهد از نقطهٔ M به طرف نقطهٔ A حرکت کند . ابتدا روی نقشه نقطهٔ A را تعیین می‌کنیم . چون امتداد شمال وجنوب جغرافیایی بر روی نقشه و همچنین زاویهٔ انحراف D در محل M در دست است ، امتداد شمال وجنوب مغناطیسی را روی نقشه می‌توان تعیین کرد . بدین ترتیب زاویهٔ $\beta = NMA$ معلوم می‌شود .

این زاویه را با دقت می سنجند و کشتی را چنان حرکت می‌دهند که همواره زاویهٔ بین امتداد عقربهٔ مغناطیسی و امتداد حرکت β باشد .

تمرین

۱ـ دوجرم مغناطیسی متساوی ، در هوا ، به‌فاصلهٔ ۲۰cm ازیکدیگر واقعند و با نیرویی برابر ۲×۱۰^{-۶} نیوتن یکدیگر را دفع می‌کنند :

۱ـ علامتهای این دوجرم مغناطیسی را تعیین‌کنید .

۲ـ مقدار این دوجرم برحسب واحد C.G.S. چقدر است ؟ برحسب واحد M.K.S.A. چقدر است ؟

۳ـ اگر این دو جرم به فاصلهٔ ۲cm از یکدیگر واقع شوند ، نیروی دافعه چقدر خواهد شد ؟ و اگر به فاصلهٔ ۲m از یکدیگر واقع شوند ، نیروی دافعه چقدر خواهد شد ؟

جواب : هر دو مثبت یا هردو منفی، $\pm ۸/۹۰$ G.S. ، $\pm ۰/۸۹$M.K.S.A. ، ۲odyn ، ۰/۰۰۲dyn

۲ـ دو میلهٔ آهنربایی $S_۱N_۱$ و $S_۲N_۲$ که طول هر یك ۳۰cm است در امتداد یکدیگر طوری قرارگرفته‌اند که فاصلهٔ قطب $N_۱$ از قطب $S_۲$ برابر ۵cm است .

نیروهایی را که قطب $N_۱$ بر $S_۲$ و بر $N_۲$ اعمال می‌کند و همچنین نیروهایی را که قطب $S_۱$ بر $S_۲$ و بر $N_۲$ اعمال می‌کند تعیین‌کنید . فرض می‌کنیم که دو میله به یك طریق آهنربا شده باشند و جرم مغناطیسی هر قطب ۲۰ واحد C.G.S. است .

جواب : −۱۶dyn ، +۰/۳۲۶dyn ، +۰/۳۲۶dyn ، −۰/۰۹۴dyn

۳ـ شدت میدان مغناطیسی را درنقطه‌ای پیداکنیدکه درآن نقطه برجرم مغناطیسی ۱۰۰C.G.S. نیرویی برابر ۱gf اعمال شود . جواب : ۹/۸۱Gs

۴ـ مقدار شدت میدان مغناطیسی زمین و مؤلفهٔ قائم آن را در مکانی پیدا کنید که مؤلفهٔ افقی شدت میدان مغناطیسی زمین ۱۹۶×۱۰^{-۷} تسلا و زاویهٔ میل $i = ۶۴°۳۰'$ است .

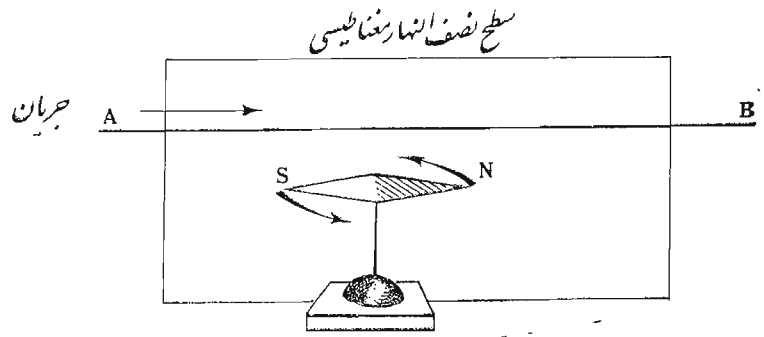
جواب : $H = ۴۵۵/۳ \times ۱۰^{-۷}$T ، $H' = ۴۱۱ \times ۱۰^{-۷}$T

فصل یازدهم

آثار مغناطیسی جریان

آزمایش ارستد ـ ارستد با آزمایش خود نخستین بار در سال ۱۸۲۰ رابطهٔ بین پدیدهٔ مغناطیسی و جریان برق را پیدا کرد .

هرگاه از قطعهٔ سیمی جریان برقی عبور دهیم ، و در مجاورت آن یك عقربهٔ مغناطیسی قرار دهیم ، مشاهده خواهیم کرد که بر اثر عبور جریان ، عقربهٔ مغناطیسی حالت تعادل خود را از دست داده منحرف می‌شود (شکل ۲۶۵) . یعنی **بر اثر عبور جریان در اطراف سیم یك میدان مغناطیسی تولید می‌شود .**



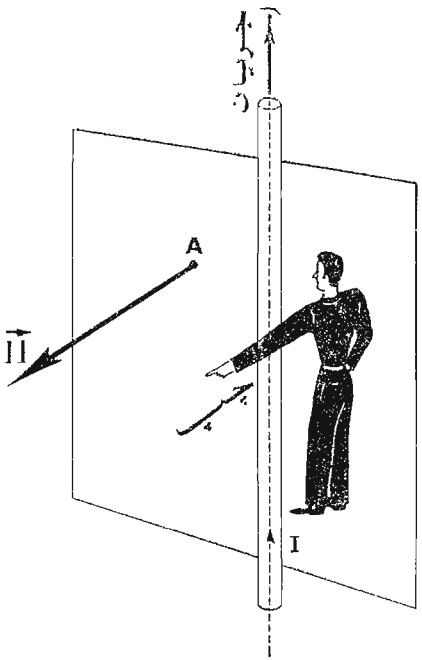
شکل ۲۶۵

اگر سوی جریان را در مدار عوض کنیم ، عقربه در سوی مخالف خواهد چرخید . یعنی **بین سوی عبور جریان و سوی میدان مغناطیسی**

ارتباطی هست . همچنین اگر شدت جریان را زیاد یا کم کنیم ، زاویهٔ چرخش عقربه نیز زیاد یا کم می‌شود . یعنی با افزایش یا کاهش شدت جریان ، شدت میدان مغناطیسی نیز افزایش یا کاهش می‌یابد .

تعیین سوی میدان مغناطیسی جریان الکتریکی ـ دستور زیرکه توسط آمپر بیان شده است سوی میدان مغناطیسی را که بر اثر عبور جریانی حاصل می‌شود ، معلوم می‌دارد :

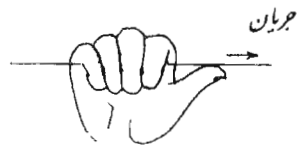
قاعدهٔ «آدمك آمپر» ـ هرگاه ناظری در امتداد جریان طوری بخوابد که سوی جریان از پا به طرف سراو باشد، و به نقطه‌ای نگاه‌کند که منظور پیدا کردن سوی میدان در آن نقطه‌است ، سوی میدان $\vec{H}$ به طرف چپ او خواهد بود(شکل ۲۶۶). قاعدهٔ آمپر را می‌توان به‌صورت کلی زیر نیز بیان کرد : **در نقطه‌ای مانند A ، امتداد میدان عمود** است برصفحه‌ای که از نقطهٔ A و امتداد جریان تشکیل یافته وسوی آن به‌سمت چپ آدمك آمپر است .



شکل ۲۶۶

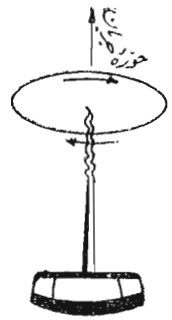
سوی میدان مغناطیسی جریانی را می‌توان به‌توسط یکی از این دو قاعده نیز تعیین نمود :

الف ـ **قاعدهٔ دست راست** ـ هرگاه انگشت شست **دست راست** را در امتداد جریان قرار دهیم و انگشتهای دیگر را به طرف نقطه‌ای که منظور پیدا کردن سوی میدان در آن نقطه است متوجه کنیم ، سوی بسته‌شدن انگشتها، سوی‌میدان در آن نقطه است (شکل ۲۶۷) .



شکل ۲۶۷

ب ـ **قاعدهٔ پیچ ماکسول**[1] ـ هرگاه میلهٔ یك پیچ بطری را در امتداد جریان قرار دهیم و آن را طوری بپیچانیم که در سوی جریان پیش برود،سوی چرخیدن میله ، سوی میدان‌مغناطیسی جریان الکتریکی است (شکل ۲۶۸) .



شکل ۲۶۸

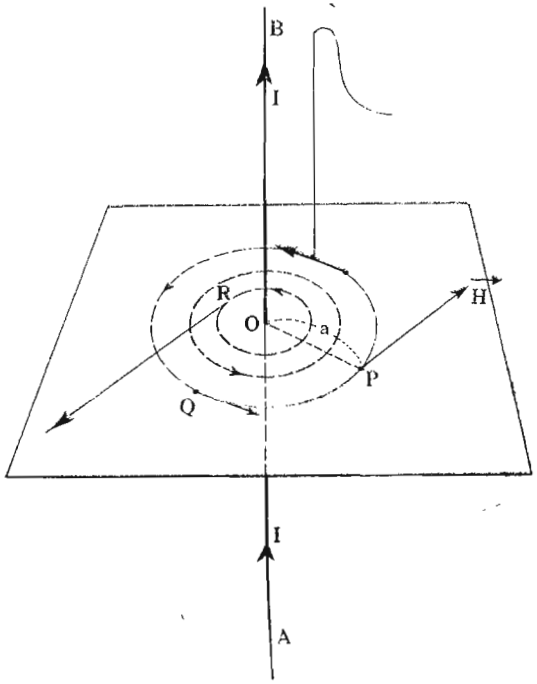
میدان مغناطیسی جریان

برای مطالعهٔ میدان مغناطیسی که بر اثر عبورجریان حاصل می‌شود، باید شکل خطوط نیرو ، سوی میدان و شدت آن را در هر نقطه بدست آورد . توزیع خطوط نیرو یا به وسیلهٔ طیف مغناطیسی یا به وسیلهٔ قرار دادن عقربهٔ مغناطیسی در نقاط مختلف معلوم می‌شود .

۱ ـ **مدار راست ـ آزمایش ـ** از یك صفحهٔ مقوایی ، سیمی بطور عمود بر صفحه عبور می‌دهیم و جریانی از آن می‌گذرانیم . هرگاه روی مقوا مقداری برادهٔ آهن بپاشیم ، مشاهده می‌کنیم‌که ، بر اثر عبور

۱ـ Maxwell (۱۸۷۹ ـ ۱۸۳۱) دانشمند و نابغهٔ انگلیسی اولین کسی است که فرضیهٔ الکترومانیتیك نور را بیان کرد .

جریان ، ذرات آهن بر روی دوایری که مرکز آنها نقطهٔ عبور سیم از صفحه است قرار می‌گیرند (شکل ۲۶۹) . این خطوط همان خطوط نیروست .



شکل ۲۶۹

اگر عقربه‌های مغناطیسی یا قطب‌نماهای کوچکی در نقاط مختلف صفحه قرار دهیم ، عقربه‌ها همواره‌مماس برخطوط نیرو می‌ایستند و سوی آنها (سوی $\overrightarrow{SN}$)سوی میدان را در نقاط مختلف معین می‌کند .

البته سوی میدان را در هر نقطه می‌توان از روی قاعدهٔ آمپر یا قواعد دیگرکه گفته شد بدست آورد . آزمایش نشان می‌دهد که در هر نقطه از فضا ، شدت میدان مغناطیسی متناسب است با شدت جریان ، و نسبت معکوس با فاصلهٔ آن نقطه تا سیم دارد .

اگر در مدار راستی شدت جریان **i** ، و فاصلهٔ نقطه‌ای تا مدار **a** باشد ، شدت میدان در این نقطه **H** است بطوری‌که :

$$H = \frac{۲}{۱۰} \cdot \frac{i}{a}$$

(آمپر)
(سانتیمتر)
(گوس)

ضریب $\frac{۲}{۱۰}$ ضریب تناسب است .

یادآوری ۱ ـ به جای یك سیم ، n سیم راست را کنار هم قرار می‌دهیم و از هریك از آنها جریانی به‌شدت i می‌گذرانیم . در صورتی که جریان در تمام سیمها در یك سو باشد ، شدت میدان مغناطیسی در نقطه‌ای به فاصلهٔ a از مجموعهٔ سیمها $H' = nH$ است .

یادآوری ۲ ـ باید متوجه بود که درعمل میدان مغناطیسی زمین با میدان جریان توأم است و میدان اندازه گرفته شده ، در حقیقت ، برآیند این دومیدان است ، ولی چون شدت میدان زمین درمقابل شدت میدان جریان معمولاً ناچیز است می‌توان از آن صرف‌نظر کرد .

مثال ـ شدت میدان مغناطیسی را در ۴ سانتیمتری یك دستهٔ ۶تایی سیم راست حامل جریان پیدا کنید . جریان در تمام سیمها در یك سو و شدت جریانی‌که از هر یك از سیمها می‌گذرد ۱۰ آمپر است .

حل ـ شدت میدان مغناطیسی :

$$H' = nH = n \times \frac{۲}{۱۰} \times \frac{i}{a}$$

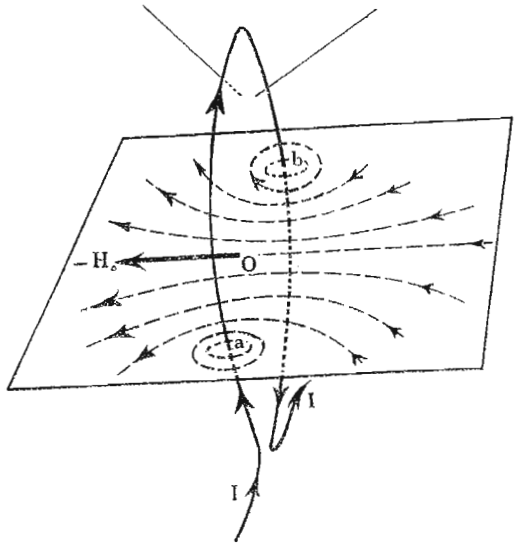
$$H' = ۶ \times \frac{۲}{۱۰} \times \frac{۱۰}{۴} = ۳$$

$$H' = ۳Gs$$

این مقدار ۱۵ بار بزرگتر از مؤلفهٔ افقی شدت میدان مغناطیسی زمین است .

۲ ـ **مدار دایره‌ای ـ آزمایش** ـ مدار دایره‌ای به‌شعاع R که مطابق شکل ۲۷۰ از یك صفحهٔ مقوا گذشته در سطح قائمی قرار گرفته است و جریانی به شدت i ازآن عبور می‌کند . صفحهٔ مقوا افقی است و

از مرکز حلقه می‌گذرد . هرگاه روی صفحه مقداری برادهٔ آهن بپاشیم، مشاهده می‌شود که ذرات آهن روی خطهای بستهای قرار می‌گیرند . این خطها که در حقیقت همان خطوط نیروست ، مخصوصاً در حوالی نقاط a و b واضح دیده می‌شوند . در میان این خطها فقط خط نیرویی که از مرکز حلقه می‌گذرد راست است . سوی میدان در هر نقطه یا به وسیلهٔ قراردادن عقربهٔ مغناطیسی یا بوسیلهٔ قاعدهٔ آمپر معلوم می‌شود .



شکل ۲۷۰

شدت میدان در مرکز حلقه ـ درحوالی مرکزحلقه، یعنی نقطهٔ O ، میدان تقریباً یکنواخت و امتداد آن عمود بر سطح حلقه است .

شدت میدان (H_0) درمرکز حلقه از رابطهٔ زیر بدست می‌آید :

$$H_0 = \frac{۲}{۱۰}\pi \frac{i}{R} \quad \begin{matrix}(\text{آمپر}) \\ (\text{سانتیمتر})\end{matrix} \quad (\text{گوس})$$

اگر حلقه دارای N دور باشد (بوبین مسطح) شدت میدان درمرکز آن برابر است با :

$$\boxed{H_0 = \frac{۲\pi Ni}{۱۰R}}$$

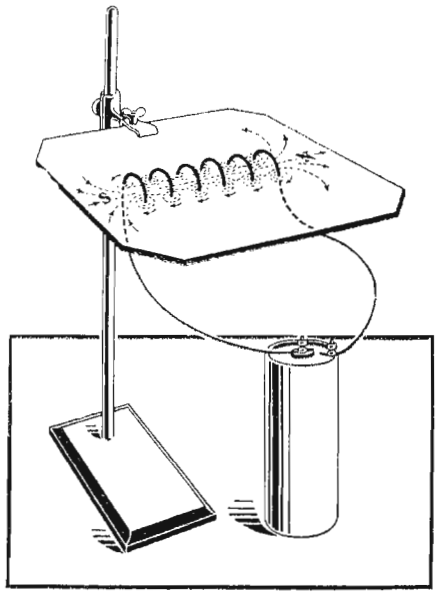
مثال ـ شدت میدان مغناطیسی را در مرکز بوبین مسطحی که شامل ۵۰ حلقه ، به‌شعاع ۱۰cm ، است و جریان ۱۰ آمپری از آن می‌گذرد پیدا کنید.

حل ـ $H_0 = \frac{2}{10} \times 3/14 \times \frac{10 \times 50}{10} = 31/4$

$H_0 = 31/4$ گوس

۳ـ **مدار مارپیچی یا سولنوییدی**[1] ـ اگر سیمی را بطور منظم روی استوانه‌ای که **طول آن نسبت به قطرش بزرگ باشد** بپیچیم ، یك سولنوییدی یا مدار مارپیچی بدست می‌آید .

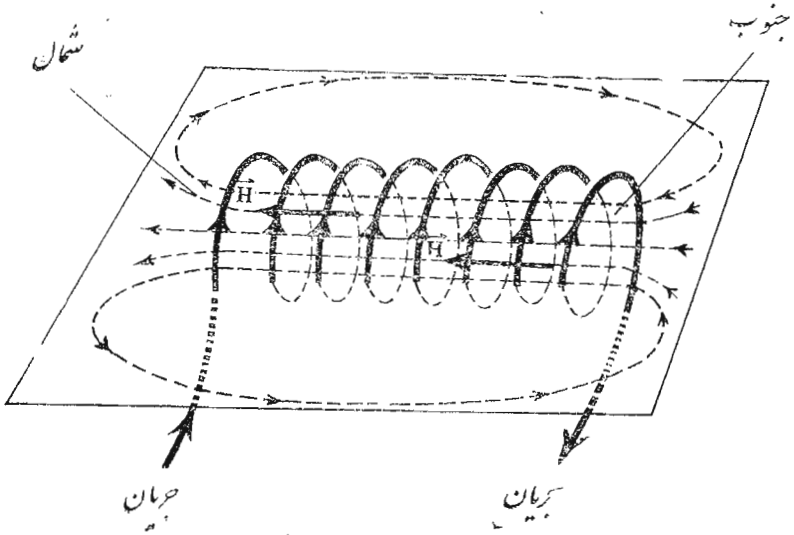
آزمایش ـ یك صفحهٔ مقوا را بطور منظم سوراخ کرده وحلقه‌های مارپیچی را طوری از آن عبور می‌دهیم که نصف هریك از حلقه‌ها در بالا و نصف دیگر درپایین صفحه قرار گیرد (شکل ۲۷۱) . حال مقداری برادهٔ آهن روی صفحه پاشیده و جریانی از سولنوییدی عبور می‌دهیم . ذرات آهن درامتداد خطوط نیرو قرار می‌گیرند. مشاهده می‌شود که خطوط نیرو در داخل سولنوییدباهم و بامحور استوانه موازی هستند، یعنی میدان در داخل سولنوییدی یکنواخت است. سوی میدان



شکل ۲۷۱

۱ـ Solénoïde . این کلمه مشتق از دو لغت یونانی و بمعنی «لوله شکل» است .

از روی قاعدهٔ آمپر معلوم می‌شود . هنگامی که از سولنوییدی جریانی عبور می‌کند ، وضع قرار گرفتن خطوط نیرو نشان می‌دهدکه سولنوییدی درست مانند یك آهنرباست (شکل۲۷۲) ، بطوری که همواره به جای آهنربا می‌توان از سولنوییدی استفاده کرد .



شکل ۲۷۲

شدت میدان در داخل سولنوییدی ـ اگر سولنوییدی به اندازهٔ کافی دراز باشد،درداخل آن میدان یکنواخت و در امتداد محور سولنوییدی است و شدت آن **H** چنین است :

$$H = \frac{4\pi Ni}{10l}$$

گوس ← ، i → آمپر ، l → سانتیمتر

که در آن i شدت جریان ، l طول استوانه، و N عدهٔ دورهای سولنوییدی است .

چون $n=\frac{N}{l}$ عدهٔ دورها در هر سانتیمتر است ، شدت‌میدان در داخل سولنوید چنین است :

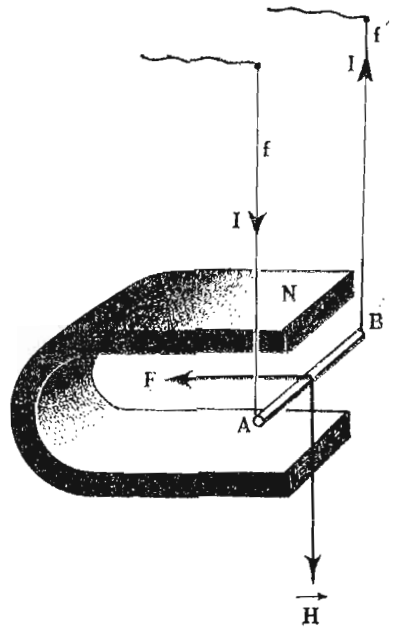
$$H=\frac{۴\pi ni}{۱۰}$$

مثال ـ سولنوییدی به‌طول ۴۰cm شامل ۱۰۰۰ حلقه است و از آن جریانی به‌شدت ۱۰ آمپر می‌گذرد. شدت میدان مغناطیسی در داخل سولنوید چقدر است ؟

حل ـ
$$H=\frac{۴}{۱۰}\times ۳/۱۴\times\frac{۱۰۰۰}{۴۰}\times ۱۰$$
$$H=۳۱۴ \text{ گوس}$$

اثر میدان مغناطیسی برجریان برق

آزمایش ـ آهنربایی به شکل نعل را چنان قرار می‌دهیم که امتدادمیدان مغناطیسی یکنواخت که بین دو قطب آن موجود است قائم باشد، سپس یك‌قطعه سیم AB را به دو سیم نازك بسته و در وسط قطبهای آهنربا ، عمود بر امتداد میدان ، آویزان می‌کنیم (شکل ۲۷۳) . اگر جریانی از مدارعبور دهیم ، مشاهده می‌کنیم که قطعه سیم AB بحرکت درمی‌آید. اگر جریان را قطع کنیم سیم به‌حالت اول خود بازمی‌گردد.



شکل ۲۷۳

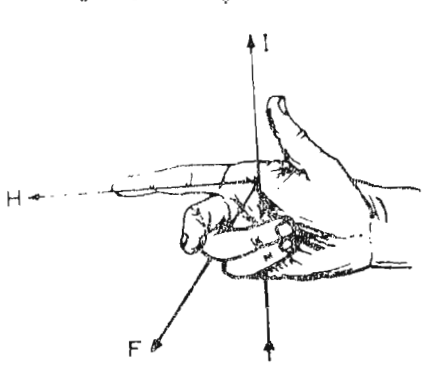
حال اگر آهنربا را دورکنیم و

دوباره ازسیم جریان عبوردهیم، حرکتی درآن مشهودنمی‌شود . بنابراین چنین نتیجه می‌گیریم که میدان مغناطیسی بر جریان برق نیرو وارد می‌کند . این نیرو را که مربوط به الکتریسیته و مغناطیس است **نیروی الکترومانیتیك** می‌نامند .

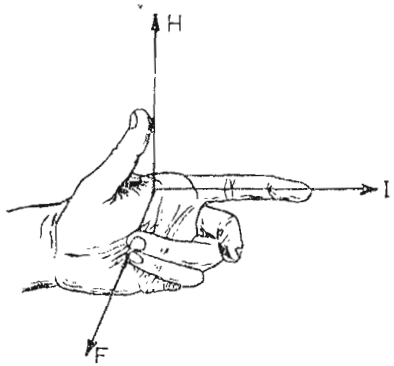
مشخصات نیروی الکترومانیتیك ـ با آزمایشهای متعدد و دقیق **آمپر** و **لاپلاس** ، می‌توان مشخصات نیروی الکترومانیتیك را به شرح زیر بیان‌کرد :

امتداد نیرو ـ امتدادنیروی الکترومانیتیك همواره عمود است برصفحه‌ای‌که از امتدادهای میدان مغناطیسی وجریان عبورکند. مثلاً در شکل ۲۷۳ ، چون امتداد میدان $\vec{H}$ قائم و امتداد جریان عمود برصفحهٔ کتاب است ، صفحه‌ای‌که از این دو امتداد می‌گذرد عمود است برصفحهٔ کتاب و امتداد نیروی الکترومانیتیك بر صفحهٔ کتاب خواهد بود .

سوی نیرو ـ هرگاه انگشت شست دست چپ در سوی میدان



شکل ۲۷۵



شکل ۲۷۴

مغناطیسی و انگشت نشان در سوی جریان قرارگیرد ، انگشت وسطی‌که عمود برسطح دوانگشت قرارگیرد ، سوی نیروی الکترومانیتیك را تعیین می‌کند (شکل ۲۷۴) .

شکل ۲۷۵ نیز طرز تعیین سوی نیروی الکترومانیتیك را به‌کمك انگشتان دست راست نشان می‌دهد .

اگر سوی جریان یا سوی میدان مغناطیسی برعکس شود ، سوی نیروی الکترومانیتیك نیز برعکس می‌شود . ولی اگر سوی جریان و میدان مغناطیسی هردو معکوس شوند ، سوی نیروی الکترومانیتیك تغییر نخواهدکرد .

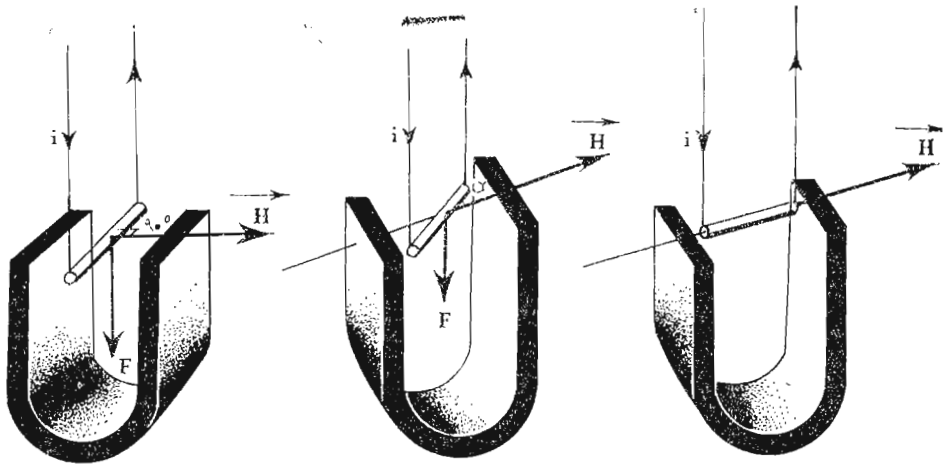
بزرگی نیرو ــ بزرگی نیروی الکترومانیتیك با شدت جریان ، با شدت حوزهٔ مغناطیسی، با طول قسمتی از مدارکه در میدان مغناطیسی قرار گرفته است (طول مفید) و با سینوس زاویهٔ بین میدان مغناطیسی وجریان الکتریکی متناسب‌است، بطوری‌که‌اگر F نیروی الکترومانیتیك، I شدت جریان، H شدت میدان مغناطیسی، l طول مفید سیم و α زاویهٔ بین‌امتداد میدان مغناطیسی وامتداد جریان‌باشد، رابطهٔ زیر برقراراست:

$$F = K \times I \times l \times H.\sin\alpha$$

اگر F برحسب دین ، I برحسب آمپر ، l برحسب سانتیمتر و H برحسب گوس بیان شوند ، ضریب K مساوی $\frac{۱}{۱۰}$ خواهد بود و فرمول بالا که موسوم به فرمول لاپلاس است چنین می‌شود :

$$F = \frac{۱}{۱۰} I.l.H.\sin\alpha$$

چنانکه ازاین فرمول پیداست، هرچه زاویهٔ α نزدیکتر به‌زاویهٔ قائمه باشد ، مقدار F زیادتر است ، بطوری‌که اگر امتداد میدان عمود بر امتداد جریان باشد ، نیروی F ماکزیمم و اگر میدان و جریان در امتداد هم باشند ، نیروی F مساوی صفر است (شکل۲۷۶) .



شکل ۲۷۶

یادآوری ــ اگر F برحسب نیوتن ، I برحسب آمپر، l برحسب متر ، و H بر حسب تسلا بیان شوند ، ضریب K مساوی ۱ خواهد بود (چرا ؟) .

مثال ــ از یك سیم راست ، بطول 5cm ، جریانی بشدت ۲۰ آمپر می‌گذرد . زاویهٔ بین امتداد میدان مغناطیسی و امتداد سیم برابر ۳۰ درجه است. شدت میدان مغناطیسی ۰/۰۲ تسلاست . بزرگی نیروی الکترومانیتیك را پیدا کنید .

حل ــ

$$F = \frac{۱}{۱۰} \times ۲۰ \times ۵ \times ۰/۰۲ \times ۱۰^{۴} \times \frac{۱}{۲}$$

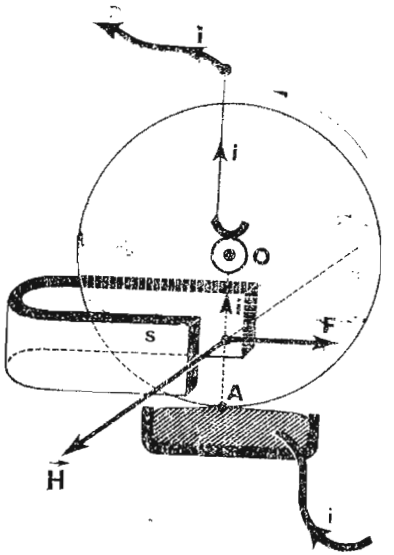
$$F = ۱۰۰۰\,\text{dyn} = ۰/۰۱ \text{ نیوتن}$$

چرخ بارلو[۱] ــ چرخ بارلو درحقیقت نخستین نمونهٔ موتور برقی است و اثر میدان مغناطیسی را بر جریان برق بخوبی نشان می‌دهد .

چرخ بارلوتشکیل شده است از یك قرص مسی‌که بطور قائم قرار گرفته است و قسمت پایین آن در یك نقطه با جیوه تماس دارد . این

۱ ــ Barlow (۱۷۷۶-۱۸۶۲) دانشمند انگلیسی .

چرخ می‌تواند به دور محوری افقی که از مرکز قرص می‌گذرد بآزادی بچرخد (شکل ۲۷۷) . جیوه و قرص به‌یك مدار الکتریکی بسته شده‌اند . جریان از داخل جیوه گذشته ، از نقطهٔ تماس A وارد قرص می‌شود و در امتداد شعاع AO می‌گذرد . اگر یك آهنربای نعلی را چنان قرار دهیم که چرخ در میدان وسط آن قرار گیرد ، مشاهده می‌شود که چرخ شروع به دوران می‌کند . علت این است که میدان مغناطیسی $\vec{H}$ برجریانی



شکل ۲۷۷

که درامتداد AO است یك نیروی $\vec{F}$ که درسطح چرخ است واردمی‌کند و بر اثر این نیرو قرص می‌چرخد . سوی چرخیدن را می‌توان از قاعدهٔ سه انگشت دست راست تعیین کرد .

تمرین

۱ ـ جریانی به شدت ۲۰A از سیم راستی به قطر ۲mm می‌گذرد . شدت میدان در روی سیم و در نقطه‌ای‌که از محور سیم ۲cm فاصله دارد چقدر است ؟
جواب : ۴۰ گوس و ۲ گوس

۲ ـ از دو سیم راست و متوازی A و B که به‌فاصلهٔ ۱۰cm از هم هستند ، جریانهایی در سوهای مخالف می‌گذرد . شدت جریان در A ، ۱۵ آمپر و در B ، ۵ آمپر است . در چه فاصله از A شدت میدان صفر است ؟

۳ـ دو سیم راست عمود برهم (بدون تماس الکتریکی) درنظرمی‌گیریم. اگر از هر یك از سیمها جریانی به‌شدت I آمپر بگذرد ، شدت میدان را در نقطه‌ای که روی یکی از منصف‌الزاویه‌ها به فاصلهٔ d سانتیمتر از محل تقاطع دو سیم است پیدا کنید .
جواب : صفر یا $\frac{4\sqrt{2}I}{10d}$ گوس

۴ ـ از حلقه‌ای به شعاع 5cm که ۵۰ دور دارد جریانی به شدت I آمپر می‌گذرد . سطح حلقه بر سطح نصف‌النهار مغناطیسی منطبق است و در مرکز حلقه عقربهٔ مغناطیسی کوچکی قرار گرفته است. I چقدر باید باشد که عقربه 45° بچرخد ؟ مؤلفهٔ افقی میدان مغناطیسی زمین ۰/۲ گوس است .

۵ ـ یك سیم بین قطبهای آهنربای نعلی شکل قرار گرفته است . شدت میدان ۰/۱ تسلا و طول قسمتی از سیم که در میدان قرارگرفته 5cm است . اگر جریانی به شدت ۲۰A از سیم بگذرد ، چه نیرویی بر آن اثر می‌کند $(\alpha=90^\circ)$ ؟
جواب : ۰/۱ نیوتن

۶ـ از سیم قائمی به طول ۲ متر جریانی به شدت ۵۰A می‌گذرد . اگر مؤلفهٔ افقی میدان زمین ۰/۲ گوس باشد چه نیرویی بر سیم اثر می‌کند ؟

۷ ـ ازیك سیم افقی‌که عمود برسطح نصف‌النهار مغناطیسی‌است جریانی به شدت ۴۰A می‌گذرد. مقدار نیرویی‌که به هرمتر از سیم تأثیر می‌کند چقدر است ؟ اگراین سیم افقی در سطح نصف‌النهار مغناطیسی بود ، مقدار نیروچقدر می‌شد . شدت میدان زمین ۰/۲ گوس و زاویهٔ میل $60^\circ+$ است .
جواب : 8×10^{-4} نیوتن، $6/93\times10^{-4}$ نیوتن

۸ـ شعاع یك چرخ بارلو 8cm است . نصف پایین شعاع چرخ در میدانی به شدت ۵۰۰ گوس بطور عمود قرار گرفته است و جریانی به شدت ۲۰ آمپر از دستگاه می‌گذرد . چه وزنه‌ای در انتهای یکی از شعاعهای افقی چرخ باید قرار داد تا چرخ نچرخد ؟
جواب : وزنه‌ای به‌وزن ۰/۰۴ نیوتن

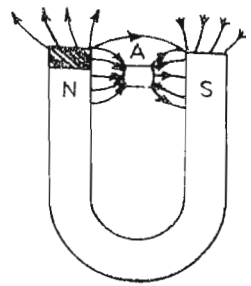
۹ ـ اگر چرخ (درمسئلهٔ ۸) ۲ دور درثانیه بچرخد، توان این موتور کوچك را برحسب وات حساب کنید .

فصل دوازدهم

آهنربای الکتریکی یا الکترواهان

قابلیت نفوذ مغناطیسی

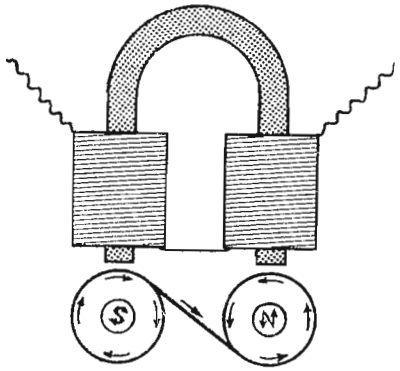
آزمایش ـ بین دوقطب یك مغناطیس نعلی شکل ، در نقطه‌ای مانند A ، یك قطعه‌آهن خالص قرار می‌دهیم . سپس طیف مغناطیسی را توسط برادهٔ‌آهن درست می‌کنیم. مشاهده می‌شودکه دراین ناحیه خطوط نیرو مسیر خود را تغییر می‌دهد و قسمت عمدهٔ آن از داخل آهن عبور می‌کند (شکل۲۷۸) . گویند آهن قابلیت نفوذ مغناطیسی دارد . اگر شدت میدان را در این ناحیه اندازه بگیریم ، مشاهده خواهیم کرد که بمراتب بیشتر شده است . اگر شدت میدان مغناطیسی در نقطهٔ A ابتدا H باشد ، پس از قرار دادن آهن B خواهد بود بطوری که $\mu = \frac{B}{H}$ یا $B = \mu . H$. ضریب μ را ضریب نفوذ آهن می‌نامند . در حقیقت هنگامی‌که در میدان مغناطیسی H قطعه‌آهن را قرار می‌دهیم ، این قطعه آهنربا شده و علاوه بر H میدان مغناطیسی جدیدی تولید می‌شود . B در حقیقت برآیند این دومیدان است .



شکل ۲۷۸

باید دانست‌که تمام اجسام دارای قابلیت نفوذ هستند منتهی ضریب نفوذ بعضی خیلی بزرگ (مانند آهن ، فولاد ، نیکل ، کروم) و بعضی دیگرکوچك است. اگر H بین دو وسه‌گوس باشد μ برای آهن درحدود ۶۰۰۰ است . ضریب نفوذ خلأ یك وضریب نفوذ هوا محسوساً یك است. ضریب نفوذ بعضی از اجسام کوچکتر از یك است .

آهنربای الکتریکی ـ اگر داخل سیم پیچی یك میلهٔ آهنی بگذاریم ، هنگامی که جریان از سیم پیچ می‌گذرد میله آهنربا می‌شود و اگرجریان قطع شود میله نیز تقریباً خاصیت آهنربایی خود را ازدست می‌دهد . این آهنربای موقتی را **الکترواهان** یا آهنربای الکتریکی نامند.معمولاً آهنربای‌الکتریکی را به شکل نعل می‌سازند (شکل ۲۷۹) ، وبرای اینکه انتهای‌آزاد یکی ازشاخه‌ها قطب‌شمال و شاخهٔ دیگر قطب جنوب باشد سیم را بر روی شاخه‌ها در دو جهت مخالف می‌پیچند .



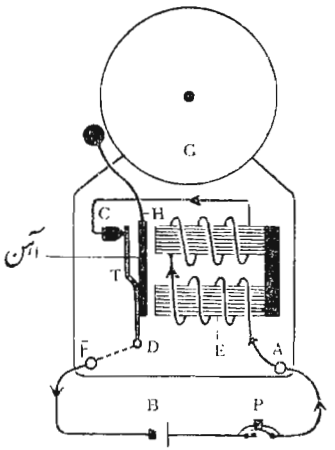
شکل ۲۷۹

هرچه عدهٔ دورهای سیم وشدت جریان زیادتر باشد آهنربای‌حاصل قویتر است . از میدانهای شدیدی که با الکترواهانها بدست می‌آید ، برای مطالعات علمی[1] و برای نقل و انتقال قطعات سنگین آهن استفاده

۱ ـ ساختن الکترواهانهای قوی با اشکالات زیاد صنعتی توأم است . برای تفحصات انرژی اتمی میدانهای مغناطیسی بسیار شدید مورد لزوم است. الکترواهان دانشگاه برکلی درکالیفرنیا ۴۰۰۰ تن جرم دارد .

می‌شود . همچنین الکترواهان در زنگ اخبار و تلگراف و گوشی تلفن بکار می‌رود .

زنگ اخبار ـ طرز کار زنگ اخبار را تاکنون آموخته‌اید .



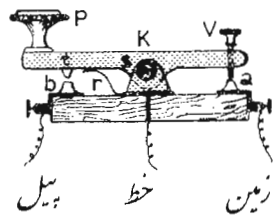
شکل ۲۸۰

هنگامی‌که بر شستی P فشار می‌آوریم ، مدار بسته می‌شود و براثر عبور جریان ، الکترواهان آهنربا شده تیغهٔ آهنی‌را که جوشن نامیده می‌شود بشدت جذب می‌کند . درنتیجه چکش به‌زنگ می‌خورد و صدا تولید می‌کند (شکل ۲۸۰) . در این موقع تیغه از دکمهٔ C جداشده مدار قطع می‌گردد و در نتیجه الکترواهان خاصیت آهنربایی خودرا ازدست می‌دهد و تیغه به جای اول خود باز می‌گردد . آن وقت مدار دوباره بسته شده جریان در مدار برقرار می‌شود . بدین ترتیب مدار مرتباً قطع و وصل می‌شود وتیغه به‌ارتعاش درمی‌آید و براثر خوردن چکش با زنگ تولید صداهای منقطع می‌شود .

تلگراف ـ دستگاه تلگراف ازدوقسمت اساسی تشکیل شده است: فرستنده و گیرنده .

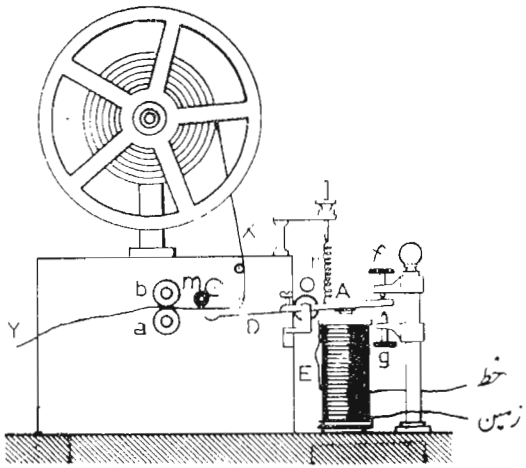
فرستنده یك کلید قطع و وصل است (شکل ۲۸۱) . این کلید تشکیل شده‌است از یك اهرم فلزی K که می‌تواند حول محور S بچرخد. این محور به خط (سیم تلگراف) متصل است . وقتی‌که برشستی P فشار می‌آوریم ، دکمهٔ t میلهٔ فلزی K را به قطعهٔ فلزی b مربوط می‌کند .

قطعهٔ فلزی b خود به‌قطب مثبت پیل مربوط است . بنابراین تا مدتی که بر شستی فشار می‌آوریم جریانی از پیل و خط می‌گذرد. به مجرد اینکه انگشت را از شستی برداریم فنر r اهرم را بلند می‌کند و جریان قطع می‌شود . به این ترتیب می‌توان جریان را در خط قطع و وصل کرد .



شکل ۲۸۱

گیرنده الکترواهانی است که بالای آن جوشنی قرار گرفته است (شکل ۲۸۲). این جوشن اهرم AOD می‌باشدکه حول محور O دوران می‌کندوقسمت اساسی دستگاه گیرنده است . بازوی OA که بالای الکترواهان E قرار گرفته‌است شامل یك قطعه‌آهن‌خالص‌است. یك انتهای سیم‌پیچ الکترواهان به‌خط و



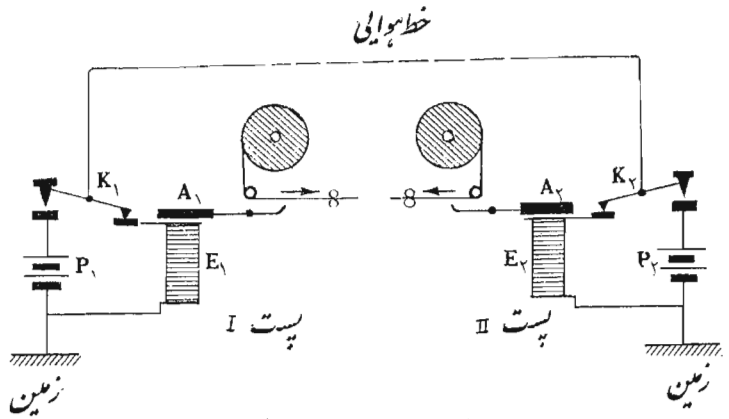
شکل ۲۸۲

انتهای دیگر آن به‌زمین متصل است . از بالای بازوی دیگر اهرم نوار کاغذی xy می‌گذرد . چرخش استوانه‌های افقی a و b حول محورهای خود ، و نیز اعمال سایر دستگاههایی‌که در جعبه‌کارگذاشته‌اند ، حرکت یکنواختی را برای نوار کاغذی تأمین می‌کنند .

وقتی که جریان از الکترواهان نمی‌گذرد ، فنر **r** بازوی **OA** را به‌طرف بالا نگاه می‌دارد . به مجرد اینکه جریانی از الکترواهان بگذرد ، بازوی **OA** پایین می‌افتد و فنر **r** نیز به طرف پایین کشیده می‌شود. دراین هنگام بازوی **OD** به‌طرف بالا می‌رود و انتهای آن فشار کمی بر نوار کاغذی وارد می‌کند و در نتیجه نوار کاغذی با غلتك آغشته به مرکب **m** تماس پیدا می‌کند . این عمل موجب می‌شود که اثر مرکب برکاغذ نقش ببندد. اگرمدت‌کوتاهی‌جریان از داخل الکترواهان بگذرد اثرمرکب برکاغذ یك نقطه است و اگر مدت عبور جریان زیاد باشد، اثر مرکب برکاغذ یك خط است. با ترکیب خطوط و نقاط می‌توان برای هر حرف علامتی درنظر گرفت و بدین ترتیب مطالب را ازنقطه‌ای به نقطهٔ دیگر مخابره کرد .

در شکل ۲۸۲ پیچهای **f** و **g** دامنهٔ حرکت جوشن را تنظیم می‌کنند .

شکل ۲۸۳ دو پست‌گیرنده و فرستندهٔ تلگراف را نشان می‌دهد .



شکل ۲۸۳

تله تایپ ـ در سالهای اخیر پیشرفت شایانی در تکمیل سیستم تلگراف شده است و به‌جای سیستم معمولی تلگراف از تله تایپ استفاده می‌شود. دراین سیستم تلگرافچی مطالب را با ماشینی نظیر ماشین تحریر می‌نویسد و درهمان موقع دستگاه گیرنده عین همان مطالب را روی نوار کاغذ ضبط می‌کند . البته در این سیستم از سیم تلگراف معمولی برای ارسال علامات استفاده می‌شود . رجحان تله تایپ بر تلگراف معمولی در این است‌که ، گذشته از اینکه سرعت عمل خیلی بیشتر است ، اشتباه نیز کمتر رخ می‌دهد .

فصل سیزدهم

اسبابهای اندازه گیری

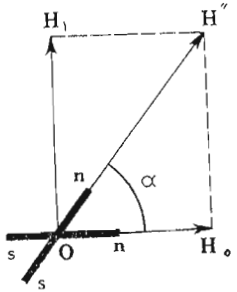
گالوانومتر

گالوانومتر دستگاهی است بسیار دقیق و حساس که برای اندازه‌گیری شدت جریانهای بسیار ضعیف در لابراتوارها بکار می‌رود. جریانهای شدید را با آمپرسنج اندازه می‌گیرند. درهمهٔ این دستگاهها، بر اثر عبور جریان، ایجاد یك میدان مغناطیسی می‌شود که برسیم پیچی که از آن نیز جریان می‌گذرد (قاب متحرك) یا بر یك آهنربای کوچك نیرو وارد می‌کند و آن را بحرکت در می‌آورد. برحسب اینکه قسمت متحرك دستگاه قاب باشد یا آهنربا، دستگاه را با آهنربا یا با قاب متحرك می‌نامند.

گالوانومتر با آهنربای متحرك ـ این دستگاه اساساً ازقرقره‌ای تشکیل یافته است (قاب) که در وسط آن عقربهٔ مغناطیسی کوچکی قرار گرفته که بآزادی می‌تواند به دور محور قائمی حرکت کند. اگر سطح سیم‌پیچ قائم و در سطح نصف‌النهار مغناطیسی محل باشد عقربهٔ مغناطیسی در سطح قاب خواهد بود.

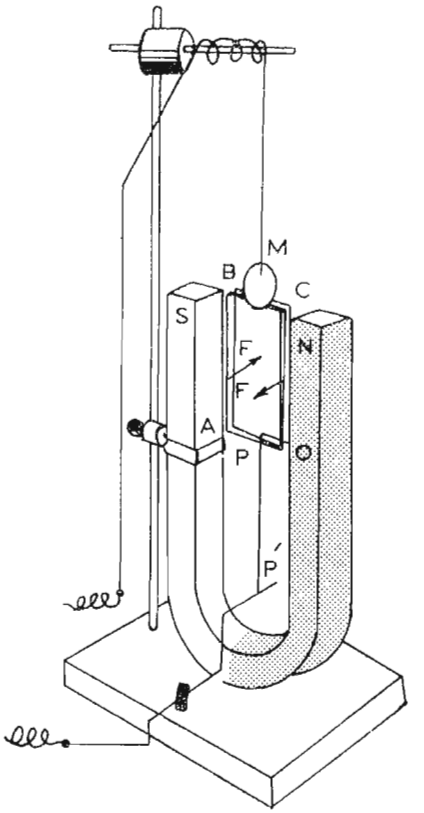
مادامی‌که جریانی از مدار عبور نمی‌کند، تنها مؤلفهٔ افقی میدان مغناطیسی زمین (H_0) بر عقربه مؤثر است، ولی هنگامی که جریانی

در سیم‌پیچ جاری شود، یك میدان دیگر H_1 که عمود برسطح قاب است تولید می‌شود و در نتیجه عقربهٔ مغناطیسی بهاندازهٔ زاویهٔ α می‌چرخد و درامتداد برآیند این دو میدان قرار می‌گیرد. چنانکه از شکل ۲۸۴ معلوم است $tg\alpha = \frac{H_1}{H_0}$، وچون H_1 متناسب است با شدت جریان i و مقدار H_0 تقریباً در یك محل ثابت است، $tg\alpha$ متناسب با شدت جریان i خواهد بود، یعنی $tg\alpha = Ki$ و چون گالوانومتر همواره برای اندازه‌گیری جریانهای بسیار ضعیف بکار می‌رود، $tg\alpha$ که متناسب با i است بسیار کوچك خواهد بود بطوری که می‌توان آن را با خود زاویهٔ α (برحسب رادیان) مساوی فرض‌کرد و نوشت $\alpha = Ki$. ضریب تناسب K حساسیت گالوانومتر نامیده می‌شود. این فرمول نشان می‌دهدکه اگر حساسیت گالوانومتر در دست باشد، با اندازه‌گیری زاویهٔ چرخش α می‌توان شدت جریان را بدست آورد.



شکل ۲۸۴

گالوانومتر با قاب متحرك ـ این دستگاه ازیك سیم‌پیچ مستطیل ABCD (قاب) که میان دو شاخهٔ یك آهنربای نعلی شکل آویزان شده تشکیل یافته است (شکل ۲۸۵). درداخل قاب، یك استوانهٔ آهنی سوار شده است تا، چنانکه دیدیم، شدت‌میدان مغناطیسی‌دراین ناحیه تقویت شود. دستگاه طوری تنظیم شده است‌که اگرجریانی از مدار عبور نکند، خطوط نیرو مماس برسطح قاب باشد. موقعی‌که جریانی در سیم‌پیچ قاب فرستاده شود، میدان مغناطیسی آهنربا در جریان تأثیر می‌کند و قاب



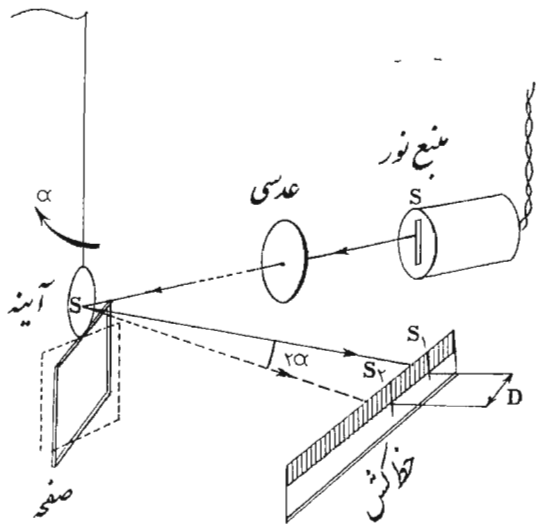
شکل ۲۸۵

تحت تأثیر جفت نیروی **F** قرار می‌گیرد و در نتیجه از حال تعادل خود منحرف می‌شود . اگر قاب کاملاً آزاد بود ، بر اثر جفت نیرو ۹۰° می‌چرخید و سطح آن عمود بر خطوط نیرو قرار می‌گرفت . ولی عکس‌العمل پیچش سیم آویز مانع این عمل می‌شود بطوری که قاب پس از چرخش α که بستگی با شدت جریان دارد از حرکت باز می‌ایستد . محاسبه و نیز آزمایش نشان می‌دهد که **زاویهٔ چرخش α متناسب با شدت جریان است** ، یعنی $\alpha = Ki$ ؛ **K** ضریب تناسب و موسوم به حساسیت گالوانومتر است . با اندازه‌گیری α و با دانستن مقدار **K** می‌توان شدت جریان **i** را اندازه گرفت . زاویهٔ چرخش α با روشی موسوم به‌روش پوگندرف[1] دقیقاً اندازه‌گرفته می‌شود .

اندازه‌گیری زوایای چرخش کوچك ـ روش پوگندرف ـ در مقابل منبع نور شکافی (S) قرار داردکه نور از آن ، پس از گذشتن از یك عدسی ، بر آینهٔ تختی می‌تابد . آینه با قابی‌که به‌آن متصل است

۱- Poggendorf (۱۸۸۷-۱۷۹۶) فیزیکدان آلمانی .

به قاب گالوانومتر وصل شده است. شعاع نورانی، پس از تابیدن بر آینه، تصویری از شکاف S بر روی خطکش می‌اندازد . اگر آینه به اندازهٔ زاویهٔ α بچرخد (بر اثر چرخیدن قاب گالوانومتر) ، چون شعاع تابش ثابت است ، تصویر S بر روی خطکش طوری جابجا می‌شود که زاویهٔ



شکل ۲۸۶

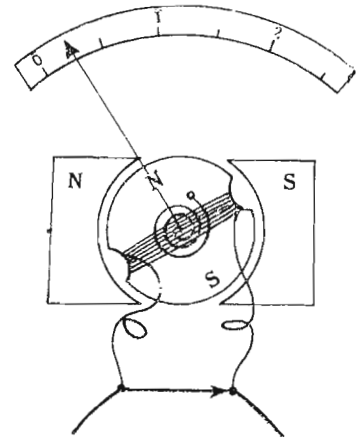
میان دو شعاع منعکس 2α باشد . بسهولت دیده می‌شود که $tg2\alpha = \frac{D}{SS_2}$ (شکل ۲۸۶) چون معمولاً زاویهٔ α کوچك است چنین خواهیم داشت :

$$\alpha = \frac{D}{2SS_2}$$

با اندازه‌گیری D (بر روی خطکش) و SS_2 (فاصلهٔ خطکش تا آینه) ، مقدار α بدست می‌آید .

آمپرسنج

چنانکه دیدیم گالوانومترها دستگاههای بسیار دقیق هستند. معمولاً برای سنجش شدت جریان از آمپرسنج (آمپرمتر) استفاده می‌کنند . ساختمان آمپرسنج با قاب متحرك مانند گالوانومتر با قاب متحرك است . در داخل آهنربای نعلی شکل قاب مستطیلی که بتواند حول دو نقطهٔ ثابت دوران کند قرار گرفته است (شکل ۲۸۷) . جریان از یکی از نقاط ثابت وارد وپس از عبور ازقاب از نقطهٔ ثابت دیگر خارج می‌شود . براثرعبورجریان ، قاب می‌چرخد وزاویهٔ چرخش بهواسطهٔ عقربه‌ای که روی قاب نصب شده وانتهای آن برروی صفحهٔ مدرجی است، خوانده می‌شود. صفحه برحسب آمپرمدرج شده است . آشکار است که اگر سوی جریان عوض شود ، سوی نیروی الکترومانیتیك نیزعوض می‌شود ودرنتیجه سوی چرخش قاب تغییرمی‌کند و بدین علت است که نقطهٔ ورودی جریان را در آمپرسنجها با علامت + و نقطهٔ خروجی آن را با علامت — مشخص می‌کنند . در صنعت آمپر - سنجهای بسیار دقیقی ساخته می‌شود . آمپرسنجی که بتواند یك هزارم آمپر را اندازه بگیرد میلی‌آمپرسنج و اگر بتواند یك میلیونیم آمپر را اندازه بگیرد ، میکرو آمپرسنج نامیده می‌شود. برای اندازه‌گیری شدت

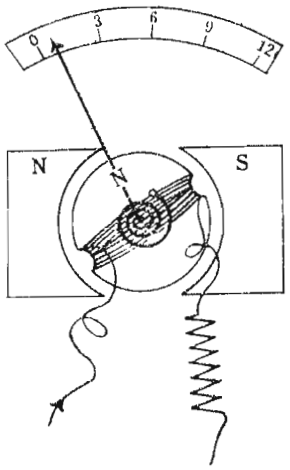


شکل ۲۸۷

جریانهای زیاد باید از شنت استفاده کرد .

ولت‌سنج

می‌دانیم که در سیمی به‌مقاومت ثابت ، شدت جریان متناسب است با اختلاف پتانسیلی که بین دو سر سیم برقرار می‌شود . بنابراین می‌توان هر آمپرسنجی را برای تعیین اختلاف پتانسیل ، یعنی به عنوان ولت‌سنج (ولتمتر) نیز بکار برد، منتهی برای اینکه از آمپرسنج جریان شدیدی عبور نکند ، باید مقاومت زیادی بر آن اضافه کرد. صفحهٔ این دستگاه را برحسب ولت مدرج می‌کنند (شکل ۲۸۸) .

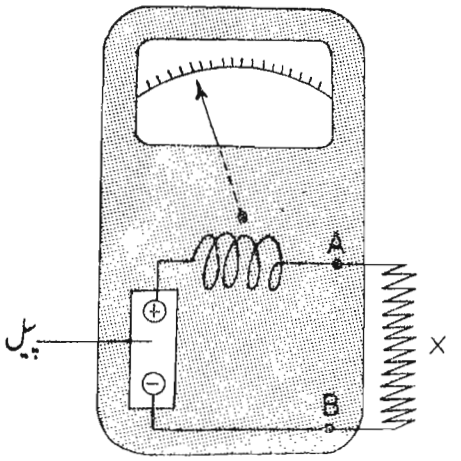


شکل ۲۸۸

اهم‌سنج

برای اینکه بتوان مقاومت مجهولی را با سرعت اندازه گرفت ، از دستگاهی موسوم به اهم‌سنج استفاده می‌کنند . اهم‌سنج از میلی‌آمپر - سنجی که دو انتهای آن به یك مقاومت R و یك مولد بطور سری وصل شده تشکیل یافته است (شکل ۲۸۹) . هرگاه مقاومت مجهولی را به دو نقطهٔ A و B وصل کنیم ، هرچه مقاومت آن بیشتر باشد شدت جریان در مدار کمتر خواهد بود . بنابراین اگر میلی آمپرسنج برحسب اهم مدرج شود می‌توان این دستگاه را برای سنجش مقاومت بکار برد .

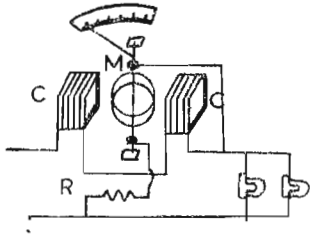
برای اینکه اهم‌سنج حساسیتهای مختلف داشته باشد ، معمولاً مقاومت متغیری را که به عنوان مهار بکار می‌رود به دو انتهای میلی‌آمپرسنج مربوط می‌سازند .



شکل ۲۸۹

وات‌سنج

وات‌سنج دستگاهی است که توان مصرف شده در مداری را تعیین می‌کند . چون توان مصرف شدهٔ **P** مساوی **VI** است، باید این دستگاه کمیتی متناسب با حاصلضرب اختلاف پتانسیل در شدت جریان را نشان دهد . وات‌سنج از دو سیم‌پیچ ثابت CC که بطور سری و از یك سیم‌پیچ متحرك **M** که بطور انشعاب به‌مدار بسته شده تشکیل یافته است. چنانکه در شکل ۲۹۰ دیده می‌شود ، ازسیم‌پیچهای ثابت CC تمام شدت‌جریان **I** که مصرف می‌شود ، عبور می‌کند . بنابراین میدان مغناطیسی حاصل متناسب با **I** خواهد بود. ولی چون دو انتهای سیم‌پیچ متحرك **M** به‌دوسر سیم درمحل مصرف برق مربوط است ، شدت جریان در آن متناسب با اختلاف پتانسیل **V** خواهد بود . بنا بر این نیرویی که بر سیم‌پیچ **M** اثر می‌کند از طرفی متناسب با میدان مغناطیسی حاصل ازسیم‌پیچهای ثابت یعنی متناسب با **I**

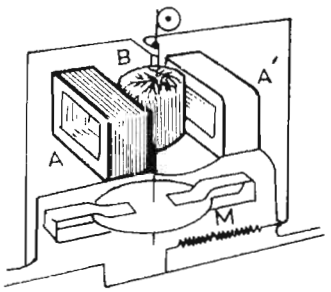


شکل ۲۹۰

و ازطرف دیگر متناسب با شدت جریان در داخل خود **M** یعنی متناسب با **V** است . پس زاویهٔ چرخش سیم‌پیچ **M** متناسب با حاصلضرب **VI** یعنی توان مصرف شده خواهد بود. پس اگر درجه‌بندی دستگاه برحسب وات باشد می‌توان با این دستگاه مستقیماً توان را درمداری اندازه‌گرفت.

کنتور برق

کنتور برق‌که در خانه‌ها و کارگاهها کار گذاشته می‌شود و مصرف برق را نشان می‌دهد بر اساس وات‌سنج ساخته شده است . تنها فرقی که این دستگاه با وات‌سنج دارد این است که سیم‌پیچ متحرك **B** در آن مانند موتوری حول محوری دوران می‌نماید (شکل ۲۹۱) . عدهٔ دور آن درمدت معینی متناسب است با برق‌مصرف شده درمدار و دستگاه برحسب کیلووات ساعت مدرج شده‌است . سرعت دوران به‌واسطهٔ یك قرص آلومینیمی **M** که بین دو مغناطیس نعلی شکل قرارگرفته است خود بخود تنظیم می‌شود و به علت تولید جریان القایی در این قرص ، بمحض اینکه جریان قطع شد دستگاه نیز از حرکت باز می‌ماند .



شکل ۲۹۱

محاسبهٔ بهای برق مصرف شده ـ چنانکه در مباحث پیش‌گفتیم اگر توان مصرف‌شده یك‌کیلووات باشد ، انرژی مصرف شده دریك ساعت را یك کیلووات ساعت (۳۶۰۰ کیلوژول) نامند . بهای برق معمولاً از روی‌کیلووات ساعت (**kWh**) تعیین می‌گردد.

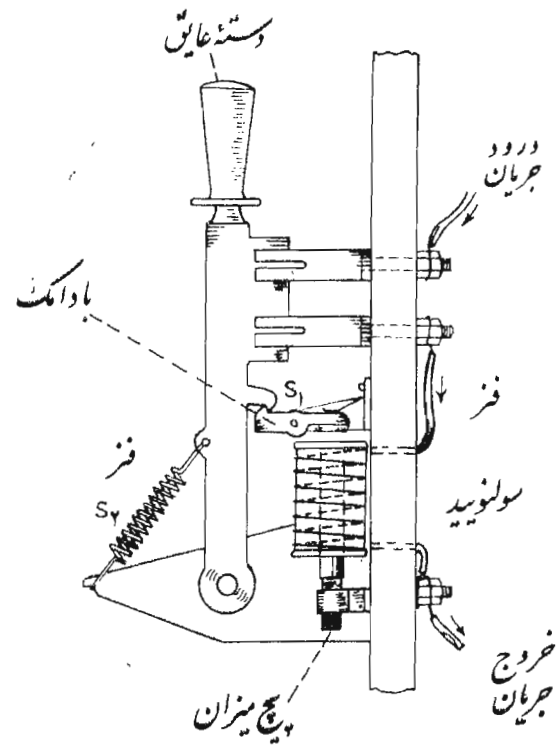
مثال - در خانه‌ای ۱۰ چراغ ۱۰۰ واتی موجود است که در شبانه روز ۵ ساعت روشن هستند ، مصرف برق ماهانه چقدر است درصورتی‌که بهای هرکیلووات ساعت برق ۲/۵ ریال باشد ؟

حل - انرژی الکتریکی مصرف شده در هرساعت مساوی است با

وات ساعت $۱۰ \times ۱۰۰ = ۱۰۰۰$

پس درهرشبانه‌روزه‌مصرف‌برق مساوی خواهدبودبا $۵ \times ۱۰۰۰ = ۵۰۰۰ \text{Wh}$ یا ۵kWh و در یك ماه مساوی $۵ \times ۳۰ = ۱۵۰\text{kWh}$. بنابراین بهای برق ماهانه مساوی $۱۵۰ \times ۲/۵ = ۳۷۵$ ریال خواهد بود .

کلید خودکار - برای اینکه شدت جریان یا اختلاف پتانسیل در مداری از حد معینی تجاوز نکند ، کلید خودکار بکار می‌برند. در داخل این کلید یك الکترواهان وجود دارد هنگامی که شدت جریان یا اختلاف پتانسیل زیادتر ازحد معینی باشد ، هستهٔ آهنی الکترواهان به طرف بالا کشیده شده و به باداماك فشار وارد می‌کند. درنتیجه فنر S_1 جمع می‌شود و



شکل ۲۹۲

باداماك از زیردستهٔ کلید رد می‌شود وفنر [illegible] را به عقب می‌کشد ، کلید باز می‌شود ومدار قطع می‌گردد (شکل ۲۹۲). فیوزهای خودکار روی همین اصل ساخته شده‌اند .

ضمیمه

شار یا **فلو و شدت نور** - می‌دانیم‌که اجسام در هردما ازخود انرژی به شکل خاصی تابش می‌کنند. این انرژی را انرژی تابشی می‌نامند . هرچه دمای جسم‌بالاتر باشد شدت تابش‌آن بیشتر است . شدت یك تابش را با مقدار انرژیی‌که ازیك سطح عمودبرمسیرآن درواحد زمان می‌گذرد مشخص می‌کنند. این‌مقدار انرژی را **شار** یا **فلوی** تابش می‌نامند. مثلاً فلوی تابش خورشید درزمین‌درحدود ۱۳۰۰ وات در هرمترمربع است . از یك چراغ ۱۰۰واتی در هر ثانیه ۱۰۰ ژول انرژی تابش می‌شود ، لیکن قسمت کوچکی از این انرژی‌به صورت **نورمرئی** است زیرا ازتمام تابشی‌که از جسم‌گرمی پراکنده می‌شود فقط‌آن قسمت‌که طول موجش بین ۰/۴ تا ۰/۸ میکرون است برچشم اثر دارد . **این فلوی نورمرئی در همهٔ منابع نور یکسان نیست . هرچه این فلو زیادتر باشد شدت نورمنبع نور زیادتر است** . در فصل اول اشاره شدکه واحد شدت‌نور شمع است.واحد دقیق‌تروثابت‌ترآن **شدت‌نور مرئیی است‌که‌از یك‌سانتیمترمربع پلاتین دردمای‌گداز بطورعمودی‌خارج می‌شود.** لیکن از طرفی با اختراع چراغهای جدید و بزرگ و ازطرف دیگر با توجه به‌اینکه رنگ منابع نورانی یکی نیست ، احتیاج به واحد دیگری محسوس گشت . فرض کنیم که برروی کره‌ای به شعاع یك متر (شکل ۲۹۳) مربعی به مساحت یك مترمربع جدا کرده و از لبه‌های آن به مرکز کره وصل کنیم . زاویهٔ حجمی که بدین طریق در مرکز کره درست می‌شود یك **رایان فضایی** (Steradian) نامیده می‌شود . حال اگر یك شمع

شکل ۲۹۳

(واحد) در مرکز کره قرار دهیم ، فلوی نورانیی را که داخل این زاویه می‌تابد یك **لومن** (Lumen) می‌نامند. عددی‌که برروی پاره‌ای ازلامپهای الکتریکی می‌نویسند فلوی نورانی‌آن درتمام جهات است. مثلا روی چراغهای مات (کریپتون) ۱۵۰۰ لومن نوشته می‌شود ، یعنی فلوی نورانی آن در تمام جهات ۱۵۰۰ لومن است . بنابراین فلو در یك رادیان فضایی عبارت خواهد بود از $\frac{۱۵۰۰}{۴\pi} = ۱۲۰$ لومن (زیراکه‌کل زاویهٔ اطراف یك‌نقطه، ۴πرادیان فضایی است).یعنی فلوی این چراغ ۱۲۰ برابرفلوی یك شمع است. به‌عبارت دیگر شدت نوراین لامپ ۱۲۰ شمع می‌شود . با توجه به‌آنچه‌گفته شد، شدت نور منابع مختلف را می‌توان چنین تعریف‌کرد :

شدت نورهرمنبع مساوی با فلوی نورانی‌آن است در یك رادیان فضایی .

مسائل متفرقه

نور

۱ ـ آینهٔ مقعری از یك جسم حقیقی تصویری حقیقی می‌دهد و مقدار بزرگنمایی آن γ است . جسم را به جای تصویر قرار می‌دهیم . تصویر در محل جسم تشکیل می‌شود (چرا؟) و بزرگنمایی دراین حالت مساوی γ' است. مقدار γ' را نسبت به γ محاسبه کنید .

۲ـ شخصی جلو یك‌آینهٔ مقعر به شعاع انحنای ۴۰cm صورت خود را نگاه می‌کند فاصلهٔ صورت ازآینه ۱۰cm وقطردهانهٔ‌آینه ۸cm است. اولاً این شخص تصویر صورت خود را درچه فاصله‌ای ازخود مشاهده می‌کند؟ ثانیاً بزرگنمایی چقدر است؟ ثالثاً اگرچشم برروی محور اصلی آینه فرض شود چه طولی از صورت خود را درآینه می‌بیند ؟

۳ـ شعاع آینهٔ مقعر تلسکوپ کوه پالومار ۳۳ متر است . قطر تصویر خورشید را درآن حساب کنید ، درصورتی‌که قطرظاهری خورشید $۳۲'$ است.

۴ـ محورهای اصلی دوآینهٔ مقعر به‌فاصلهٔ کانونی مشترك f برهم منطبقند و آینه‌ها مقابل هم قرار دارند . نقطهٔ نورانی A بر روی محور اصلی طوری قرار دارد که تصویر نهایی‌آن برخودش منطبق است . محل نقطهٔ A را تعیین کنید ، در صورتی که فاصلهٔ دو آینه d باشد (مثال عددی : $f = ۳۶cm$ و $d = ۸cm$) .

۵ ـ با استفاده از فرمول آینه‌ها تعیین کنید که در چه شرایطی ممکن است آینهٔ محدب تصویر حقیقی ایجاد کند ، یعنی $x' > ۰$ باشد .

۶ـ شعاع یك آینهٔ محدب اتوموبیل ۳۲cm و قطر دایرهٔ دهانهٔ آن ۱۰cm است . اگر چشم راننده بر روی محور اصلی آینه به فاصلهٔ ۶۴cm از آن فرض شود ، قطر میدان آینه را در ۱۰متری آن تعیین کنید و آن را با قطر میدان یك آینهٔ تخت با همان شرایط مقایسه کنید .

۷- جسم AB برمحور اصلی یك آینهٔ مقعر به‌شعاع ۲۴cm و به‌فاصلهٔ ۱۵cm از آن واقع است . اولاً محل تصویر آن را با رسم و محاسبه بدست آورید. ثانیاً به فاصلهٔ ۵۰cm ازاین آینه یك آینهٔ تخت عمود برمحور اصلی آن قرار می‌دهیم ، محل آخرین تصویر را بدست آورید . ثالثاً اگر به جای آینهٔ تخت یك آینهٔ محدب به شعاع ۲۰cm قرار دهیم محل آخرین تصویر را بدست آورید. رابعاً به جای آینهٔ محدب یك‌آینهٔ مقعر با همان شعاع قرار می‌دهیم . محل آخرین تصویر را پیدا کنید . همچنین مسیر یك دستهٔ باریك شعاع نور را درحالات مختلف رسم کنید .

۸- ضریب شکست یك محیط شفاف $\sqrt{2}$ است . زاویهٔ حد آن را از راه رسم و محاسبه پیدا کنید .

۹- در ظرفی $12cm^3$ آب $(n=\frac{4}{3})$ و $3cm^3$ بنزین $(n=\frac{3}{2})$ می‌ریزند. تعیین‌کنید اگر ازبالا نگاه کنیم ته ظرف چقدر بالاتر دیده می‌شود.

۱۰- ضخامت شیشهٔ یك آینه ۱۵mm و ضریب شکست آن $\frac{3}{2}$ است . ثابت کنید که این دستگاه معادل یك آینهٔ تخت ساده است که سطح منعکس - کننده‌اش 5mm جلوتر از سطح نقره اندود باشد .

۱۱ - قاعدهٔ یك منشور شیشه‌ای مثلث متساوی‌الساقین ABC و زاویهٔ رأس آن $A=36^\circ$. یك دسته اشعهٔ نور متوازی بطور عمود بر وجه BC (مقابل A) به منشور می‌تابد . ضریب شکست منشور باید چقدر باشد تا اشعه به موازات امتداد تابش از منشور خارج شود ؟

۱۲- یك شعاع نور با زاویهٔ تابش 90° به یك وجه منشوری به ضریب شکست ۱/۵ می‌تابد . زاویهٔ رأس منشور چقدر باید باشد که فقط همین شعاع از منشور خارج شود ؟

۱۳- ضریب شکست منشوری به زاویهٔ رأس 60° ، برای نور سرخ ۱/۴۹ و برای نور بنفش ۱/۵۱ است . ۱- زاویهٔ مینیمم انحراف و زاویهٔ تابش مربوط بدان رابرای ضریب شکست متوسط منشور (۱/۵) حساب کنید. ۲ - برای این زاویهٔ تابش مقدار زاویهٔ انحراف را برای نورهای سرخ و بنفش بدست آورید .

۱۴- عدسی همگرایی تصویریك نقطهٔ نورانی را روی پردهٔ P می‌اندازد. بین عدسی و پرده یك تیغهٔ متوازی‌السطوح به ضخامت 3cm و ضریب شکست $\frac{3}{2}$ قرار می‌دهیم . تعیین کنید که پرده را چقدر و در چه جهت باید حرکت داد تا دوباره تصویر بر روی آن بیفتد .

۱۵- فاصلهٔ کانونی عدسی یك دستگاه عکاسی ۱۰cm است. اگر صفحهٔ حساس 0/5mm تغییر محل دهد ، باز تصویر روی آن واضح است . از چه فاصله‌ای به بالا برای این عدسی بینهایت محسوب می‌شود ؟

۱۶- جسمی به فاصلهٔ ۱۶cm از یك عدسی همگرا قرار دارد. اگرآن را 2cm از عدسی دور کنیم تصویر ۱۲cm تغییر محل می‌دهد. فاصلهٔ کانونی عدسی چقدر است ؟

۱۷- قطر دایرهٔ تصویر خورشید در یك عدسی ۱۵mm است . فاصلهٔ کانونی آن چقدر است (قطر ظاهری خورشید $\frac{1}{100}$ رادیان است) ؟

۱۸- جسم AB به‌فاصلهٔ 10cm جلویك عدسی به‌همگرایی (۲۰ —) دیوپتری قرار دارد . در پشت این عدسی و به فاصلهٔ 12cm از آن ، عدسی همگرایی به همگرایی ۵ دیوپتری می‌گذاریم . جا و نوع آخرین تصویر را بدست آورید و بزرگنمایی دستگاه را حساب کنید .

۱۹ - برای تعیین فاصلهٔ کانونی یك عدسی واگرا ، عدسی همگرای نازکی به‌همگرایی ۲۵ دیوپتری به‌آن می‌چسبانیم وجسمی را به‌فاصلهٔ 10cm از آن قرار می‌دهیم . تصویر جسم در ۱۰ سانتیمتری عدسی می‌افتد . فاصلهٔ کانونی عدسی واگرا چقدر است ؟

۲۰- قطر دایرهٔ تصویر ماه را بر روی شبکیهٔ یك چشم سالم حساب کنید. قطر ظاهری ماه ۳۳ دقیقه وفاصلهٔ عدسی چشم تا شبکیه 15mm است.

۲۱- تصویر حقیقی AB بر روی پرده‌ای افتاده است . در 20cm جلو این تصویریك عدسی واگرا قرار می‌دهیم‌که مانع تشکیل آن تصویرشود. این عدسی تصویر دیگری می‌دهد حقیقی‌که در ۴۰ سانتیمتری آن واقع است. فاصلهٔ کانونی عدسی را حساب کنید .

۲۲- ابژکتیف یك دستگاه عکاسی از دو عدسی تشکیل شده است ، یکی همگرا به فاصلهٔ کانونی 200mm ودیگری واگرا به‌فاصلهٔ کانونی 50mm که در 155mm پشت عدسی همگرا قرار دارد . جسمی به طول ۱۰ متر در یك کیلومتری واقع است. تعیین‌کنید جا و طول تصویرآن را دراین دستگاه. اگر بخواهند به جای آن دو فقط یك عدسی همگرا قرار دهند که تصویری به‌همان اندازه ایجاد کند فاصلهٔ کانونی این عدسی چقدر باید باشد ؟

۲۳ - تعیین کنید همگرایی عدسی یك چشم سالم در چه حدودی تغییر می‌کند ($d=15cm$ و $D=\infty$) و در صورتی‌که تغییرات همگرایی عدسی چشم برای همه یکسان باشد ، حدود رؤیت را برای یك چشم نزدیك بین (متر ۱ $=D$) حساب‌کنید .

۲۴- مشخصات یك میکروسکوپ از این قرار است : $f_1=5mm$ و $f_2=20mm$ و فاصلهٔ دو عدسی ۲۰cm، چشم ناظر درکانون تصویرچشمی و آخرین تصویر در ∞ است. ۱- اگر بخواهیم که تصویر در ۲۵ سانتیمتری چشم باشد ، میکروسکوپ را نسبت به جسم چقدر باید حرکت داد ؟ ۲ - در این‌حالت درشتنمایی میکروسکوپ چقدراست ($d=25cm$)؟ ۳- می‌خواهند از جسم یك تصویرحقیقی بر روی صفحهٔ حساسی که ۲۵cm پشت چشمی واقع است حاصل شود (میکروگرافی). فاصلهٔ جسم از ابژکتیف وهمچنین بزرگنمایی دستگاه را در این حالت حساب کنید .

۲۵- فاصلهٔ کانونی شیئی وچشمی یك دوربین بترتیب ۹۰cm و ۱۸mm و قطر دهانهٔ شیئی ۷۵ میلیمتر و آخرین تصویر در ∞ است . ۱ - فاصلهٔ دو عدسی چقدر است ؟ ۲ - محل تصویر شیئی را در چشمی بدست آورید (دایرهٔ اوکولر) . ۳- درشتنمایی دوربین چقدر است ؟

۲۶ - با دوربین مسئلهٔ پیش ، دایره‌ای به قطر ۵cm را که در فاصلهٔ ۲۰ متری است نگاه می‌کنیم . تعیین کنید تحت چه زاویه‌ای با دوربین دیده می‌شود و اگر با چشم بخواهیم دایره را تحت همان زاویه ببینیم چقدر باید به‌آن نزدیك شویم ؟

۲۷- فواصل کانونی شیئی و چشمی یك دوربین گالیله بترتیب ۱۵cm و ۳cm است . فاصلهٔ دو عدسی را درحالات زیر بدست آورید :

۱- تصویر در ∞ است . ۲- تصویر در ۲۵ سانتیمتری چشم ناظر که به عدسی چشمی چسبیده است تشکیل شده است . ۳ - تصویر حقیقی و در ۵ سانتیمتری پشت چشمی است .

۲۸ - بر یك عدسی تخت و محدب که شعاع انحنای آن ۲۵/۶cm است یك دسته نور متوازی شامل نورهای سرخ و بنفش می‌تابد. ضریب شکست عدسی برای نور سرخ $n_1=1/512$ و برای نور بنفش $n_2=1/532$ است . فواصل کانونی عدسی را برای این دو نور حساب کنید . به‌این عدسی

یك عدسی نازك تخت و مقعر می‌چسبانیم . ضریب شکست‌آن برای دونور فوق بترتیب $n'_1=1/610$ و $n'_2=1/650$ است . شعاع انحنای سطح مقعر این عدسی چقدر باشد تا کانون دستگاه دوعدسی برای نورهای سرخ و بنفش برهم منطبق باشد (ابژکتیف آکروماتیك) .

۲۹- دوعدسی، یکی همگرا به فاصلهٔ کانونی ۶۰cm و دیگری واگرا به فاصلهٔ کانونی ۲۰cm ، به فاصلهٔ ۴۱cm از یکدیگر قرار گرفته‌اند . دستگاه دارای یك محور اصلی مشترك وعدسی همگرا متوجه به خورشید است. قطرظاهری خورشید $\frac{1}{100}$ رادیان است . در چه فاصله از عدسی واگرا صفحهٔ حساسی را بایدگذاشت تا تصویرخورشید برآن تشکیل شود . ابعاد این تصویر و بزرگنمایی دستگاه را حساب‌کنید .

۳۰- با ذره‌بینی به فاصلهٔ کانونی ۳cm جسمی به طول ۰/۳ میلیمتر را نگاه می‌کنند، چشم درکانون تصویر ذره‌بین است . توان ذره‌بین و زاویه‌ای که جسم‌باآن دیده می‌شود چقدراست درصورتی‌که حداقل رؤیت ناظر ۲۴cm باشد ؟ درشتنمایی ذره‌بین و حداقل فاصلهٔ دو نقطه‌ای را که چشم می‌تواند با این ذره‌بین از هم تفکیك‌کند حساب کنید درصورتی‌که قدرت تفکیك چشم یك دقیقه باشد .

۳۱- فاصلهٔ کانونی شیئی و چشمی یك میکروسکوپ بترتیب ۵mm و ۲۴mm و جسم در ۶/۱ میلیمتری شیئی است . طول میکروسکوپ چقدر باید باشدکه‌آخرین تصویر مجازی در ۲۷۰ میلیمتری چشم تشکیل شود (چشم چسبیده به‌چشمی است)؟ اگر d ۲۵cm باشد درشتنمایی دستگاه چقدراست؟

۳۲- فواصل‌کانونی عدسیهای یك‌دوربین‌گالیله ۳۰cm و ۳cm است. دوربین به طرف خورشید و آخرین تصویر در ∞ است . به فاصلهٔ ۲۵cm پشت چشمی پرده‌ای قرار داده و این عدسی راآنقدرجابجا می‌کنند تا تصویر خورشید بر روی صفحه بیفتد . ۱- مسیر نور را رسم کنید . ۲- حساب کنید چقدر و در چه جهت چشمی تغییر محل داده است ؟ ۳ - ابعاد تصویر را بر روی پرده حساب‌کنید . درصورتی‌که تصویر یکی از لکه‌های خورشید برروی پرده مساوی ۰/۵mm باشد اندازهٔ حقیقی‌آن را برحسب R شعاع‌کرهٔ زمین، حساب‌کنید. قطر ظاهری خورشید $\frac{1}{100}$ رادیان و شعاع آن $108R$ است .

الکتریسیته

۳۳- مداری از قسمتهای زیر که بطور سری به همدیگر بسته شده‌اند تشکیل یافته است. یك مولد به‌نیروی محرکهٔ ۳۱/۵ ولت و به مقاومت داخلی $r = 1\Omega$ ویك سیم به‌مقاومت 1Ω که داخل گرماسنجی قرارگرفته‌است که ۲۰۰ گرم آب دارد و یك ظرف محتوی سولفات مس با الکترودهای طلای سفید و به مقاومت داخلی ۸ اهم . اگر دمای گرماسنج در هر دقیقه ۱/۰۲ درجه بالا رود ، تعیین‌کنید : ۱ ـ شدت جریان را ؛ ۲ـ جرم مسی را که در هر دقیقه روی قطب منفی می‌نشیند؛ ۳ـ نیروی ضد محرکهٔ ظرف تجزیه را؛ ۴ـ هرگاه به جای الکترودهای پلاتینی الکترودهای مسی‌که به همان بزرگی و به همان فاصله قرار می‌گیرند بگذاریم ، کمیتهای فوق چقدر می‌شوند ($Cu = 63/5$ و $J = 4/18$ و $F = 96000$) .

۳۴- در محلول سولفات مس دو الکترود مسی می‌گذاریم . مقاومت داخلی محلول ۱۵ اهم است . از این محلول جریانی به شدت ۱۰ آمپر عبور می‌دهیم . پس از t ثانیه ۱۱۴/۳ گرم به جرم کاتد اضافه می‌شود . در یك آزمایش دیگر بین دو قطب ولتامتر موتور الکتریکی کوچکی به‌مقاومت داخلی ۵ اهم بطور انشعاب قرار می‌دهیم وشدت جریان ۱۰ آمپر بین ولتامتر و موتور الکتریکی تقسیم می‌شود .

۱ ـ اگر مانع حرکت موتور شویم ، در همان مدت t ثانیه چندگرم برجرم کاتد اضافه می‌شود ؟

۲ـ اگرموتور بچرخد، مقدار مس رسوب شده را درهمان مدت حساب کنید . نیروی ضد محرکهٔ موتور ۱۰ولت است . توان موتور را بدست‌آورید.

۳۵- یك سیم فلزی به مقطع $2mm^2$ و به طول یك متر و به ضریب مقاومت $1\mu\Omega$ مفروض است . دو سر این سیم را به مولدی به نیروی محرکهٔ دو ولت و مقاومت داخلی 1Ω می‌بندیم . در هر ثانیه چندکالری گرما در سیم حاصل می‌شود ($J = 4/18$) ؛ همین سیم را از حدیده‌ای چنان عبور می‌دهیم که طول سیم دو برابر شود . مقدار گرمای حاصل به چه نسبت تغییر می‌کند ؟

۳۶- می‌خواهیم دمای یك لیترآب را به توسط سیم پلاتینی که داخل آن قرارگرفته است در مدت پنج دقیقه از 14° به 40° برسانیم . اگر سطح مقطع سیم $0/01mm^2$ و اختلاف پتانسیل بین دو سر آن ۱۱۰ ولت باشد

طول آن چقدر باید باشد ؟ چه مقدار الکتریسیته از مدار عبور می‌نماید (یك ژول معادل ۰/۲۴ کالری و $\rho = 11 \times 10^{-6}\Omega/cm$) ؟

۳۷- جریانی به‌شدت ۱۵ آمپر که از سیمی عبور می‌نماید در هر دقیقه ۱۰۰ کالری تولید می‌کند . این سیم از سه قطعه سیم همجنس که سطح مقاطع آنها مختلف ولی حجمشان برابر است ، تشکیل یافته است . قطعات سیم بطور سری به‌هم بسته شده‌اند . اختلاف پتانسیل بین دو سر سیمها به نسبت ۱ ، ۳ و ۵ است . حساب کنید : ۱ ـ مقاومت مجموع سه قطعه سیم را ؛ ۲ـ نسبت طول هریك از سیمها را به سیم کوتاهتر .

۳۸- قطبهای مولدی را به‌توسط سیم ورشویی به طول ۵۰ متر و به‌قطر $1mm$ به‌همدیگر مربوط می‌سازیم. ازسیم یك‌آمپرجریان عبور می‌کند. اگر طول سیم ۱۲/۵ متر باشد ، شدت جریان دو آمپر می‌شود . نیروی محرکه و مقاومت داخلی مولد چقدر است؟ می‌دانیم‌که ضریب مقاومت ورشوسیزده مرتبه بیش از ضریب مقاومت مس است و مقاومت سیمی از مس به طول ۱۰۰ متر و به‌قطر $2mm$ مساوی یك اهم است .

۳۹- از یك باتری آکومولاتور جریانی به شدت ۲ آمپر در مدت ۱۸ ساعت می‌گذرانیم. مقدار الکتریسیتهٔ جاری شده را حساب کنید. ازاین باتری برای روشن‌کردن چراغی که ۱/۵ آمپر از آن عبور می‌کند استفاده می‌کنیم. چراغ فقط بیست ساعت روشن می‌شود ، بازدهٔ باتری را حساب کنید .

۴۰ ـ ۲۰ پیل مشابه را بطور سری به هم می‌بندیم و در مدار آنها یك رئوستا به‌مقاومت متغیر R و یك آمپرسنج به مقاومت 8Ω قرار می‌دهیم . اگر $R = 8\Omega$ ، شدت جریان در مدار یك‌آمپر است . پیلها را در ۱۰ سری و دو انشعاب قرار می‌دهیم. ملاحظه می‌کنیم‌که اگر $R = 23\Omega$، شدت جریان ۰/۵ آمپر است . حساب کنید : ۱ـ نیروی محرکه و مقاومت داخلی هر یك از پیلها را ؛ ۲ـ نسبت گرمایی که در آمپر سنج در مدت معینی در هریك از آزمایشها پدید می‌آید .

۴۱- بین دو نقطهٔ A و B سه انشعاب برقرار می‌کنیم . انشعاب اولی شامل یك مولد به نیروی محرکهٔ E است و مجموع مقاومتهای این انشعاب 8Ω است و جریانی معادل ۴ آمپر از B به A جاری می‌شود . انشعاب دوم دارای مولدی به نیروی محرکهٔ E' است و مجموع مقاومت این انشعاب 10Ω

است وجریانی معادل ۲ آمپر از A به B جاری می‌شود. انشعاب سوم مقاومت سادهٔ ۲۰ اهمی است . مطلوب است : محاسبهٔ $V_A - V_B$ ، E و E′ .

۴۲ - بین دو نقطهٔ A و B پنج انشعاب برقرار است - هر انشعاب دارای دو لامپ بطور سری است . مقاومت هر لامپ ۲۲۰Ω و قدرت مصرفی هریك ۵۵ وات است . ۱ - اختلاف پتانسیل بین A و B چقدر است ؟ ۲- شدت جریان در هر انشعاب چقدر است ؟ ۳- بهای مصرف برق درصد ساعت چقدر است (قیمت هرکیلووات ساعت ۲/۵ ریال است) ؟ ۴- اگر تمام انرژی تبدیل به‌گرما شود در مدت صد ساعت چند کالری‌گرما تولید می‌شود؟

۴۳- ۱۶ پیل مشابه‌که نیروی محرکهٔ هریك ۱/۸ ولت ومقاومت داخلی هرکدام ۰/۵ اهم است اختیار می‌کنیم . پیلها را در دو سری ۸ تایی بطور انشعاب به‌همدیگر می‌بندیم و به دو قطب آنها سه مقاومت یك ، دو و سه اهمی بطور انشعاب می‌بندیم. مطلوب است شدت جریان در هرانشعاب وتوان مصرف شده در مدار خارج . اگربخواهیم در مدار خارجی ماکزیمم توان ظاهر شود پیلها را چگونه‌باید به‌همدیگروصل نمود - مقدارتوان ماکزیمم راحساب‌کنید.

۴۴- بین دو نقطهٔ A و B اختلاف پتانسیل ثابت ۱۱۰ ولت بر قرار است . بین آنها یك رئوستا و یك موتور و یك ظرف تجزیهٔ سولفات مس با الکترودهای مسی بطور سری می‌بندیم . ۱- اگر موتور حرکت نکند در ۱۸ دقیقه ۳/۵۲۵ گرم مس رسوب می‌نماید . مقاومت کل مدار را حساب نمایید. ۲- اگر موتور حرکت نماید همان مقدار مس درمدت ۳۰دقیقه بدست می‌آید. نیروی ضد محرکه و توان موتور چقدر است ؟ Cu = ۶۳

۴۵- در مداری یك مولد ، یك موتور ، یك رئوستا و یك آمپرسنج بطور سری قرار گرفته‌اند . نیروی محرکهٔ مولد ۱۰۰ ولت ، مقاومت رئوستا ۸ اهم و مقاومت داخلی موتور ۲ اهم است. از مقاومت داخلی مولد ومقاومت سیمهای اتصال و آمپرسنج صرف‌نظر می‌شود . ۱- اگر مانع حرکت موتور بشویم آمپرسنج چه شدتی را نشان می‌دهد ؟ ۲- موتور شروع به‌کار می‌کند . آمپرسنج ۵ آمپر نشان می‌دهد توان موتور و نیروی ضد محرکهٔ آن را حساب کنید . ۳- اگر در حالت دوم ولت‌سنجی به‌دو انتهای موتور ببندیم چند ولت نشان می‌دهد ؟

۴۶ - گالوانومتر G به مقاومت g = ۲۰۰Ω و مهار S به مقاومت s = ۲۰Ω به‌توسط یك سیم مقاوم R به مقاومت ۲Ω به‌مولد P وصل شده‌اند. از گالوانومتر جریان ۰/۰۱ آمپر عبور می‌نماید . اگر مهار را حذف کنیم ،

برای اینکه همان شدت از گالوانومتر عبور نماید به جای سیم مقاوم R ، باید سیم دیگر به‌مقاومت R′ = ۲۳Ω بگذاریم . مقاومت داخلی و نیروی الکتروموتوری مولد چقدر است ؟

۴۷- عقربهٔ مغناطیسی‌کوچکی می‌تواند حول نقطهٔ O بآزادی بچرخد. در امتداد عمود برحالت تعادل عقربه و به فاصلهٔ ۱۰۰cm از آن قطب شمال N مغناطیسی قرارگرفته است . ملاحظه می‌شودکه عقربه به دو درجه می‌چرخد. میدان تولید شده در نقطهٔ O چقدر است ؟ جرم مغناطیسی آهنربا را حساب کنید . مؤلفهٔ افقی میدان مغناطیسی زمین ۰/۲ گوس است .

۴۸- یك مارپیچ الکتریکی به‌طول ۵۰cm شامل ۶۰۰دورسیم است، دو سر آن را به یك انبارهٔ ۱۰ ولتی به مقاومت ۰/۵ اهم وصل می‌کنند.شدت جریان در مدار ۴ آمپراست . تعیین‌کنید : ۱ - مقاومت مارپیچ وشدت میدان داخل آن را ؛ ۲- اختلاف پتانسیل الکتریکی در دو قطب باتری را . ۳ - به دو سر مارپیچ یك مقاومت ۶ اهمی بطور انشعاب می‌بندند . شدت جریان در انباره و شدت میدان در مارپیچ را بدست آورید وانرژی حاصل از انباره را در هر دقیقه حساب کنید .

۴۹ - مقاومت داخلی یك گالوانومتر ۱۵۰ اهم است و اگر جریانی به‌شدت یك میکروآمپر ازآن بگذرد لکهٔ نورانی بر روی خط‌کش ۱۰۰درجه منحرف می‌شود . تعیین کنید چه مقاومتی بطور انشعاب به دو سر گالوانومتر باید وصل‌کرد تا اگر جریان کل ۳ میلی‌آمپر باشد لکهٔ نورانی بقدر ۲۵درجه منحرف شود. می‌خواهیم با این‌گالوانومتر جریانی را که از لامپ الکتریکی ۲۵ واتی می‌گذرد اندازه بگیریم . لامپ بطور انشعاب و گالوانومتر با یك مقاومت ۴۰۰ میکروهم مهار شده‌است. شدت جریان کل وانحراف‌گالوانومتر را حساب کنید .

۵۰ - مقاومت سولنوییدی ۴۰۰۰ اهم است . اگر جریان ۰/۱ آمپر ازآن عبور نماید میدان . اصل در داخل یك‌کوس خواهد بود. محورسولنویید عمود بر سطح نصف‌النهار مغناطیسی است . در روی محور سولنویید عقربهٔ مغناطیسی‌کوچکی قرار گرفته است و آلهٔ مقعر‌کوچکی به‌شعاع یك متر به آن نصب شده است . اگر طرفین سولنویید را به مولدی به نیروی محرکهٔ دو ولت وصل نماییم ، لکهٔ نورانی در روی خط‌کش چقدر تغییر مکان پیدا می‌نماید ؟ (طریقهٔ پوگندرف) مؤلفهٔ افقی میدان مغناطیسی زمین ۰/۲ گوس است .

پایان

درجه	رادیان	sin	tg	cotg	cos	رادیان	درجه
0	0,0000	0,0000	0,0000	∞	1,0000	1,5708	90
1	0,0175	0,0175	0,0175	57,29	0,9998	1,5533	89
2	0,0349	0,0349	0,0349	28,64	0,9994	1,5359	88
3	0,0524	0,0523	0,0524	19,08	0,9986	1,5184	87
4	0,0698	0,0698	0,0699	14,30	0,9976	1,5010	86
5	0,0873	0,0872	0,0875	11,43	0,9962	1,4835	85
6	0,1047	0,1045	0,1051	9,514	0,9945	1,4661	84
7	0,1222	0,1219	0,1228	8,144	0,9925	1,4486	83
8	0,1396	0,1392	0,1405	7,115	0,9903	1,4312	82
9	0,1571	0,1564	0,1584	6,314	0,9877	1,4137	81
10	0,1745	0,1736	0,1763	5,671	0,9848	1,3963	80
11	0,1920	0,1908	0,1944	5,145	0,9816	1,3788	79
12	0,2094	0,2079	0,2126	4,705	0,9781	1,3614	78
13	0,2269	0,2250	0,2309	4,331	0,9744	1,3439	77
14	0,2443	0,2419	0,2493	4,011	0,9703	1,3265	76
15	0,2618	0,2588	0,2679	3,732	0,9659	1,3090	75
16	0,2793	0,2756	0,2867	3,487	0,9613	1,2915	74
17	0,2967	0,2924	0,3057	3,271	0,9563	1,2741	73
18	0,3142	0,3090	0,3249	3,078	0,9511	1,2566	72
19	0,3316	0,3256	0,3443	2,904	0,9455	1,2392	71
20	0,3491	0,3420	0,3640	2,747	0,9397	1,2217	70
21	0,3665	0,3584	0,3839	2,605	0,9336	1,2043	69
22	0,3840	0,3746	0,4040	2,475	0,9272	1,1868	68
23	0,4014	0,3907	0,4245	2,356	0,9205	1,1694	67
24	0,4189	0,4067	0,4452	2,246	0,9135	1,1519	66
25	0,4363	0,4226	0,4663	2,145	0,9063	1,1345	65
26	0,4538	0,4384	0,4877	2,050	0,8988	1,1170	64
27	0,4712	0,4540	0,5095	1,963	0,8910	1,0996	63
28	0,4887	0,4695	0,5317	1,881	0,8829	1,0821	62
29	0,5061	0,4848	0,5543	1,804	0,8746	1,0647	61
30	0,5236	0,5000	0,5774	1,732	0,8660	1,0472	60
31	0,5411	0,5150	0,6009	1,664	0,8572	1,0297	59
32	0,5585	0,5299	0,6249	1,600	0,8480	1,0123	58
33	0,5760	0,5446	0,6494	1,540	0,8387	0,9948	57
34	0,5934	0,5592	0,6745	1,483	0,8290	0,9774	56
35	0,6109	0,5736	0,7002	1,428	0,8192	0,9599	55
36	0,6283	0,5878	0,7265	1,376	0,8090	0,9425	54
37	0,6458	0,6018	0,7536	1,327	0,7986	0,9250	53
38	0,6632	0,6157	0,7813	1,280	0,7880	0,9076	52
39	0,6807	0,6293	0,8098	1,235	0,7771	0,8901	51
40	0,6981	0,6428	0,8391	1,192	0,7660	0,8727	50
41	0,7156	0,6561	0,8693	1,150	0,7547	0,8552	49
42	0,7330	0,6691	0,9004	1,111	0,7431	0,8378	48
43	0,7505	0,6820	0,9325	1,072	0,7314	0,8203	47
44	0,7679	0,6947	0,9657	1,036	0,7193	0,8029	46
45	0,7854	0,7071	1,0000	1,000	0,7071	0,7854	45
		cos	cotg	tg	sin	رادیان	درجه