جمهوری اسلامی ایران

وزارت آموزش و پرورش

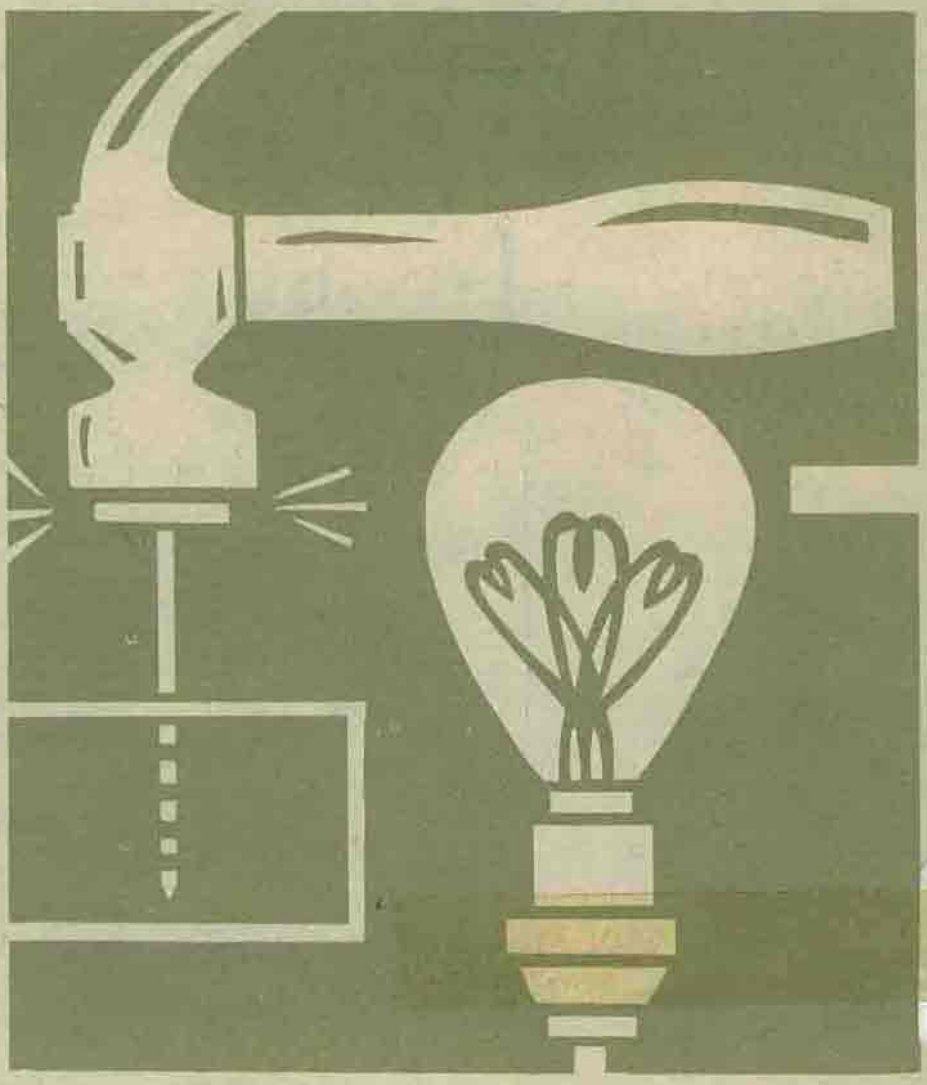
تجدید نظر شده

سال چهارم

آموزش متوسطهٔ عمومی

علوم تجربی

فیزیک



۲۸۸

بسم الله الرحمن الرحیم

فیزیک

سال چهارم

آموزش متوسطه عمومی

علوم تجربی

۵۳۸ ۷۰۵۳۸ سعع ب ۸۲،۳

پدیدآورندگان

مؤلفان ● ابوالقاسم قلمسیاه ● محمدعلی پیغامی
کارشناس اسفندیار معتمدی
صفحه پرداز حسن فخارزاده
رسام خسرو مدبریان
چاپ از چاپخانه دفتر انتشارات سازمان انرژی اتمی ایران

حقوق مادی این اثر متعلق به وزارت آموزش و پرورش است

۱۳۶۰

فهرست

فصل ۱ ــ حرکت بر روی خط راست ، سرعت ــ شتاب	۱
فصل ۲ ــ دینامیک ذره ــ قانونهای نیوتن درباره‌حرکت	۳۳
فصل ۳ ــ حرکت بر مسیر دایره‌ای میدانهای جاذبه	۵۵
فصل ۴ ــ کار ــ انرژی	۷۴
فصل ۵ ــ حرکات ارتعاشی و امواج	۹۳
فصل ۶ ــ صوت	۱۲۰
فصل ۷ ــ میدانهای الکتریکی ، پتانسیل و ظرفیت الکتریکی	۱۵۳
فصل ۸ ــ القای مغناطیسی ــ جریان القایی	۱۷۰
فصل ۹ ــ جریان متناوب	۱۸۷
فصل ۱۰ ــ نور	۲۱۰

۱

حرکت بر روی خط راست

سرعت ـ شتاب

آموزش فیزیك پایه ، معمولا ازمکانیك کلاسیك شروع می‌شود. اهمیت مکانیك به‌این سبب است که آموختن رشته‌های دیگر فیزیك مستلزم فراگرفتن این شاخه از دانش است .

مکانیك شاخه‌ای ازدانش فیزیك است که درباره چگونگی‌حرکت و سکون اجسام وعلل و شرایط آنها گفتگو می‌کند و خود به دو قسمت سینماتیك[1] و دینامیك[2] تقسیم می‌شود . سینماتیك دربارهٔ چگونگی انواع حرکت‌ها بدون ذکرعلل آنها به‌بحث تحلیلی وریاضی می‌پردازد و در واقع سرآغاز علم مکانیك است. دینامیك ازعلل‌حرکت وسکون اجسام‌بحث می کند وخودبدوقسمت استاتیك[3] (که ازتعادل اجسام درحال سکون گفتگو می کند) وسینتیك[4] (که به‌بحث دربارهٔ تغییرحرکت دراثر نیرو می‌پردازد) تقسیم می‌شود.

شما درکتاب فیزیك سال اول با حرکتهای ساده و اصطلاحات سرعت و شتاب آشنا شده‌اید . دراین‌جا بابحث تحلیلی و ریاضی پیشرفته‌تری مطالب مورد بحث را دنبال خواهیدکرد .

حرکت اجسام ـ می‌دانیم جهان پراز اجسامی‌است که در حرکتند ، از ذرات کوچك مانند ملکولهای هوا و ذرات‌گرد وغبار معلق درهوا تا کهکشانهای بزرگ . اتمهای درون اجسامی هم‌که به‌ظاهرساکن هستند دائماً درحال ارتعاشند. حرکت وسرعت‌بعضی ازاین اجسام که ساخته دست انسانند ، مانند اتومبیلها و موشکها قابل‌کنترل است ، ولی حرکت طبیعی پاره‌ای ازاجسام چنان پیچیده است که‌به‌آسانی نمی‌توان آن را بررسی‌کرد . مثلا یکی ازحرکتهای بسیار متداول طبیعی افتادن برگ ازدرخت است .

۱ـ Cinematique (به‌زبان فرانسوی) که به‌زبان انگلیسی Kinematics گفته می‌شود

۲ـ Dynamics ۳ـ Statics

۴ـ Cinetique (به‌زبان فرانسوی) که به‌انگلیسی Kinetics گفته می‌شود .

برگ دراین حرکت می‌چرخد ومی‌پیچد و به‌جلو و عقب و به‌چپ وراست می‌رود تـا به زمین برسد . چنین‌حرکتی هم‌که می‌توان‌آن‌را متداولترین‌حرکت طبیعی دانست ازحرکت یك ماشین پیچیده‌تر است . علاوه براین به‌ندرت ممکن است دوبـرگ حرکت یکسان داشته باشند. چنانچه بخواهیم حرکت‌افتادن برگ را مطالعه کنیم باید هربرگ را کـه می‌افتد جداگانه درنظر بگیریم .

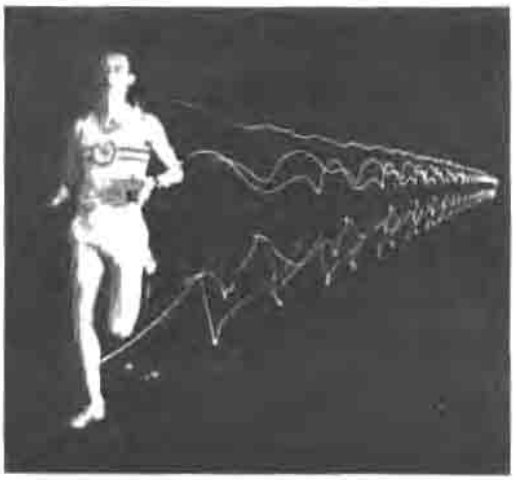
پرسش۱-۱ـ چه‌نفعی ازمطالعه جزئیات چنین حرکتی عاید ما می‌شود ؟

دراین کتاب ما حرکات ساده‌ای را موردبحث قرار می‌دهیم کـه بتوانیم نمونه‌های آنهـا را در آزمایشگاه ایجاد وبررسی کنیم. زیرا حرکات‌پیچیده موجود در طبیعت تـرکیبی از این حرکت‌های ساده هستند .

دراین بخش ، ما حرکت بر روی خط راست (یعنی حرکت یك‌بعدی) را بررسی می‌کنیم و پس از آن‌کـه علت حرکت را بیان کردیم حرکت بر مسیر منحنی (یعنی حرکت دوبعدی) مانند حرکت‌پرتابه‌ها وحرکت برمسیر دایـره‌ای را دربخشهای بعد مورد بحث قرار خواهیم داد. درتمام این‌حرکتها از «مدل ذره‌ای» استفاده خواهیم کرد یعنی جسم متحرك را درصورتی‌که فقط حرکت‌انتقالی داشته باشد درحکم یك ذره می‌گیریم .

سرعت متوسط ـ می‌دانیدکه خارج قسمت مسافت پیموده شده توسط یك متحرك برزمـان حرکت را سرعت متوسط متحرك گویند یعنی :

$$\text{سرعت متوسط متحرك} = \frac{\text{مسافت پیموده شده}}{\text{زمان حرکت}}$$

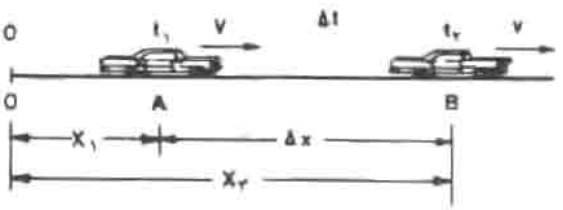


شکل ۱-۱- هریك‌از اندامهای یك‌دونده حرکت پیچیده‌ای‌دارد، ولی‌می‌توان دونده را درمسیرحرکت خود درحکم یك‌ذره‌دانست.

دراین‌جا بحث تحلیلی و ریاضی دقیقتری را درباره این سرعت دنبال می‌کنیم .

درنظربگیریم‌که متحرکی ، مثلا یك اتومبیل از مبدأ O روی یك خط راست شروع به حـرکت می‌کند (شکل ۱ـ۲) و درلحظهٔ t_1 ازنقطه A و در لحظهٔ t_2 ازنقطه B می‌گذرد. اگرفاصله نقاط A وB را از مبدأ O به‌ترتیب بـه x_1 و x_2 نشان دهیم مسافتی‌که متحرك می‌پیماید تا ازنقطه A به‌نقطه B برسد برابر:

$$\Delta x = x_2 - x_1$$



شکل ۱-۲ ـ سرعت متوسط برابر است با خارج قسمت مسافت پیموده شده برزمان

است و زمانی که این فاصله توسط متحرك پیموده می‌شود برابر

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

است . بنابراین سرعت متوسط متحرك بین دو نقطه A و B از این رابطه حساب می‌شود :

$$\bar{v} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad (۱-۱)$$

مثال ـ در یك مسابقه شنای ۱۰۰ متر ، شناگری طول ۵۰/۰۰ متری استخر شنا را در یك رفت و برگشت درمدت ۵۶/۰۰ ثانیه پیموده است. اگرمدت رفت۲۷/۰۰ثانیه ومدت برگشت ۲۹/۰۰ ثانیه طول‌کشیده باشد سرعت متوسط‌کل این‌شناگر و سرعتهای متوسط او در رفت و برگشت چه اندازه بوده است ؟

الف) سرعت متوسط کل‌شناگر :

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{۲ \times ۵۰/۰۰ m}{۵۶/۰۰ s} = ۱/۷۸۶ \frac{m}{s}$$

ب) سرعت متوسط شناگر به‌هنگام رفت :

$$\bar{v}_1 = \frac{۵۰/۰۰ m}{۲۷/۰۰ s} = ۱/۸۵۲ \frac{m}{s}$$

ج) سرعت متوسط شناگر دربرگشت :

$$\bar{v}_2 = \frac{۵۰/۰۰ m}{۲۹/۰۰ s} = ۱/۷۲۴ \frac{m}{s}$$

در اغلب موارد مبدأ سنجش حرکت طوری انتخاب می‌شود که $x_1 = ۰$ باشد دراین صورت $t_1 = ۰$ است ومعادله (۱-۲) به‌صورت زیر نوشته می‌شود :

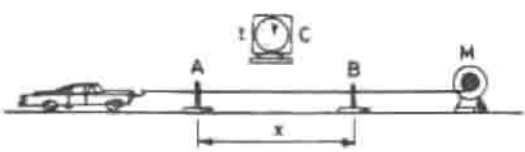
$$\bar{v} = \frac{x}{t} \qquad (۱-۲)$$

پرسش ۱-۲ـ واحدهای سرعت راکه با آنها آشنائی دارید نام ببرید .

پرسش ۱-۳ـ بادردست داشتن سرعت‌متوسط آیا می‌توان مسیرحرکت و وضع متحرك را در هر لحظه مشخص نمود ؟

حرکت با سرعت ثابت « حرکت یکنواخت » ـ متحرکی که درزمانهای‌مساوی مسافتهای مساوی‌طی کندسرعتش‌ثابت، یابه عبارت‌دیگر، حرکتش یکنواخت است. نمونه این حرکت‌درطبیعت کم‌است ولی‌میتوان‌در آزمایشگاه‌آن را ایجاد و بررسی‌کرد. درشکل(۱-۳) آزمایش ساده‌ای برای تحقیق حرکت یکنواخت‌طرح‌ریزی شده است‌که شماهم می‌توانید مشابه‌آن‌را در آزمایشگاه انجام دهید .

یك ماشین سواری‌کوچك ازنوع اسباب بازی روی میز افقی قرار دارد و با رشته نخی‌که به‌دور یك قرقره می‌پیچد کشیده می‌شود . قرقره روی محوریك موتور کوچك‌که حرکت آن قابل تنظیم است نصب شده است . حرکت موتور طوری تنظیم می‌شودکه محورآن یك‌دور درثانیه بزند وقطرقرقره که نخ به‌دورآن پیچیده می‌شود معلوم ، مثلا ۲/۵ سانتیمتر است . دونشانه A و B به فاصله‌کم ازیك دیگر درمسیر حرکت گذارده می‌شود و فاصله بین آنها ، یعنی x با خط‌کش میلیمتری اندازه‌گرفته می‌شود . با به‌کار افتادن موتور ، ماشین به‌راه می‌افتد و لحظه‌ای که مقابل نشانه A می‌رسد کرونومتر به‌کار می‌افتد ولحظه‌ای هم‌که مقابل



شکل ۱-۳- روش تجربی برای اندازه‌گرفتن سرعت یك متحرك.

نشانه B می‌رسد کرونومتر متوقف می‌گردد . در نتیجه زمان t که متحرك فاصله x را می‌پیمایدروی کرونومتر مشخص می‌گردد . بادورکردن نشانه‌ها ازیك‌دیگر می‌توان آزمایش را چندبار تکرار ونتایج حاصل را درجدولی یادداشت نمود .

فرض کنیدکه این آزمایش پنج‌بار تکرار شده ونتایج به‌دست‌آمده اندازه‌هائی‌باشدکه درجدول ۱-۱

جدول ۱-۱

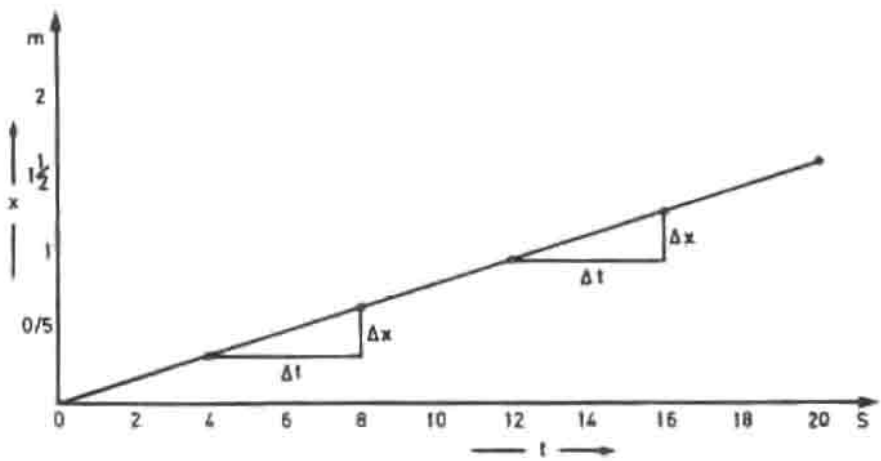
تعداد آزمایشها	مسافت پیموده شده x(m)	زمان‌حرکت t(s)	سرعت‌متوسط حساب شده $\overline{v}\frac{m}{s}$
۰	۰	۰	—
۱	۰/۳۱۴	۴/۰	۰/۰۷۸۵
۲	۰/۶۲۸	۸/۰	۰/۰۷۸۵
۳	۰/۹۴۲	۱۲/۰	۰/۰۷۸۵
۴	۱/۲۵۶	۱۶/۰	۰/۰۷۸۵
۵	۱/۵۷۰	۲۰/۰	۰/۰۷۸۵

نوشته شده‌است . برای پیداکردن رابطهٔ بین x و t بهتر این است کـه نمودار تغییرات این دوکمیت نسبت به‌هم‌رسم‌شود. اگر مقادیرt که درجدول۱-۱ مندرج است روی محور افقی و مقادیـر x روی محور عمود برآن برده شود نقاطی به دست می‌آید که ازوصل‌کردن آنهـا به یکدیگر یك خط راست مطابق شکل (۱-۴) حاصل شود .

این خط ازمبدأ x=۰ و t=۰ نیزمی‌گذرد و نشان می‌دهد که دوکمیت x و t مستقیماً با هـم متناسبند یعنی نسبت $\frac{x}{t}$ مقدار ثابتی است ، این مقدار ثابت‌که درستون‌آخر سمت چپ جدول نوشته شده است مسافتی است کـه متحرك در واحد زمان می‌پیماید یا به‌عبارت دیگر سرعت متحرك است که آن را به v نمایش می‌دهیم ، بنابراین

$$v=\frac{x}{t} \qquad (۱-۳)$$

پرسش ۱-۴- می‌دانید $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ شیب این خط است . به‌کمك اعداد مندرج در جدول (۱-۱)نشان



شکل ۱-۴- نمودار تغییرات x و t که در آزمایش حرکت اتومبیل به دست آمده است.

دهیدکه این شیب مقدار ثابتی است .

بدنیست یادآور شویم که آزمایش بالا ، آزمایشی ساده برای نشان دادن یك قانون ساده مکانیکی است و منظور این است که استفاده ازروش علمی برای تحقیق در بارهٔ یك پدیده بازگو شود .

پرسش ۱-۵- روش علمی که درآزمایش مورد بحث به‌کار رفته چگونه است ؟

معادلهٔ حرکت یکنواخت - اگرسرعت حرکت معلوم باشد مسافتی که متحرك در زمان t می‌پیماید از رابطهٔ ۱-۲ که معادلهٔ حرکت یکنواخت است حساب می‌شود .

$$x = v \cdot t \qquad (۱-۲)$$

مثال - هواپیمائی با سرعت ثابت $۷۲۰ \frac{km}{h}$ درحرکت است . چه‌مسافتی را این هواپیما در مدت ۵ دقیقه می‌پیماید .

- داریم

$$x = v \cdot t = ۷۲۰ \frac{km}{h} \times \frac{۵}{۶۰} h = ۶۰ km$$

پرسش ۱-۶ - درحرکت یکنواخت ، زمان حرکت را ازچه رابطه‌ای حساب می‌کنید .

سرعت و تندی - درگفتگوهای روزانه «سرعت» و «تندی» اغلب به صورت دوکلمهٔ مترادف به‌کار می‌روند و سی با بیانی دقیقتر کلمهٔ « سرعت » را چنانکه می‌دانید به عنوان یك کمیت اسکالر و کلمهٔ «تندی» را به عنوان یك کمیت برداری به کار می‌بریم .

پرسش ۱-۷- کمیتهای اسکالرو برداری را با سابقه‌آشنائی که درباره آنها دارید تعریف کنید.

کلمه « سرعت » فقط معرف‌اندازه تندی‌است و جهت وراستای حرکت را مشخص نمی‌کند . در حرکت برروی خط راست ، سرعت و تندی ازلحاظ مقدار با هم برابرند و راستای آنها نیز یکی است ولی درحرکت‌برمسیرمنحنی، اگرهم اندازه «سرعت» ثابت باشد « تندی » را نباید ثابت دانست زیرا راستای‌آن تغییرمی‌کند. باوجود این اگرمتحرکی با سرعت ثابت برروی خط راست حرکت کند و جهت حرکت‌آن مشخص باشد بهتر این است که اصطلاح « تندی » را به‌کار بریم ولی اگرمتحرک برمسیر منحنی یا برروی خط راست حرکت‌کند ولی‌اشاره‌ای به جهت حرکت آن نشود می‌توانیم اصطلاح « سرعت » را به‌کار بریم .

دیمانسیون سرعت (یاتندی) - دیدیم که سرعت خارج‌قسمت مسافت برزمان است. یعنی خارج‌قسمت کمیت « طول » برکمیت « زمان » . درفیزیك چنین متداول است‌که می‌گویند سرعت دارای دیمانسیون طول برزمان است . اگرطول را به L و زمان را به T نمایش‌دهیم دیمانسیون (رابطهٔ ابعادی) سرعت به‌صورت $\frac{L}{T}$ یا $LT^{-۱}$ نوشته می‌شود . خاصیت دیمانسیون‌این است‌که نشان می‌دهد یك کمیت فرعی مثلا سرعت ، چگونه با کمیتهای اصلی مانند طول و زمان ارتباط دارد .

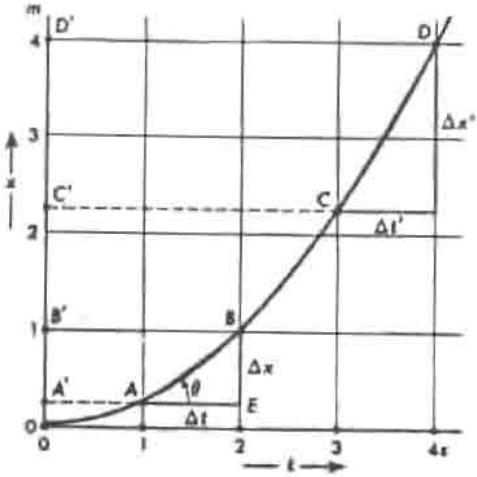
هر کمیت فرعی که درفیزیك بکارمی‌رود دارای دیمانسیونی است‌که رابطهٔ آن کمیت را باکمیتهای

اصلی[1] مشخص می کند . شما ضمن بررسی هریك از این کمیتها دیمانسیون آن را نیز به آسانی می‌توانید پیدا کنید .

تندی لحظه‌ای ـ وقتی که تندی یك متحرك ثابت نباشد یعنی با گذشت زمان تغییر کند بدیهی است متحرك در زمانهای مساوی مسافتهای مساوی نخواهد پیمود . در این صورت برای متحرك « تندی متوسط » و یا « تندی لحظه‌ای » درنظر گرفته می‌شود . تندی متوسط مانند سرعت متوسط از رابطهٔ $\bar{v}=\frac{x_2-x_1}{t_2-t_1}$ حساب می‌شود ، ولی با این تندی موقعیت متحرك مشخص نمی گردد . « تندی لحظه‌ای » یعنی تندی که متحرك در هر لحظه از زمان دارد . چون یك لحظه دوام ندارد متحرك نمی‌تواند در یك لحظه مسافتی را طی کند بنابراین تندی لحظه‌ای مفهوم تندی متحرك در هر نقطه از مسیر را پیدا می کند و محاسبهٔ آن با روش خاص ریاضی انجام می‌شود .

درنظر بگیریم که آزمایشی با ماشین کوچك شکل (۱ـ۳) انجام گرفته و نموداری مطابق شکل ۱ـ۵ به دست آمده است . نقاط A' و B' و C' و ... که روی محور عمودی نمایش داده شده‌اند به ترتیب معرف فواصل ماشین از مبدأ O در ثانیه‌های متوالی هستند . چون فاصله این نقاط از یکدیگر مساوی نیست تندی متحرك نیز ثابت نیست .

اینك تندی متوسط ماشین را در فاصلهٔ AB



شکل ۱ـ۵ ـ نمودار مسافت ـ زمان برای متحرکی که با تندی متغیر حرکت می‌کند .

حساب می کنیم. این تندی چنانکه گفتیم برابراست با

$$\bar{v}=\frac{\Delta x}{\Delta t}$$

دراینجا Δx برابراست با $A'B'$ و Δt زمانی است که مسافت Δx پیموده شده است (طبق شکل ازیك ثانیه تا دوثانیه) . Δx و Δt دوضلع عمود برهم مثلث قائم‌الزاویه AEB هستند و نسبت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ شیب خط AB است که برابر $tg\theta$ است . اگر نقطه B را به A نزدیك و نزدیکتر کنیم اندازه‌های Δx و Δt کوچك وکوچکتر می‌شوند . وقتی که Δt به صفرخیلی نزدیك می‌شود خارج قسمت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ به تندی متحرك درنقطه A خیلی نزدیك می گردد ودرحد(یعنی وقتی که Δt صفر می‌شود و B بر A منطبق می گردد)

۱ـ در دستگاه واحدهای بین‌المللی (SI)، هفت کمیت به‌عنوان کمیتهای اصلی انتخاب شده‌است که عبارتند ازطول ، جرم ، زمان ، شدت جریان ، شدت نور ، دما ، مل (ملکول گرم). این کمیتها درضمیمه آخر کتاب تعریف شده‌اند .

به‌نام « تندی لحظه‌ای » نامیده می‌شود . بنابراین

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad (۴-۱)$$ تندی لحظه‌ای

(lim علامت حد است)

این حد را بنابه‌قرارداد ریاضی به $\frac{dx}{dt}$ نمایش می‌دهند پس :

$$v = \frac{dx}{dt} \qquad (۵-۱)$$

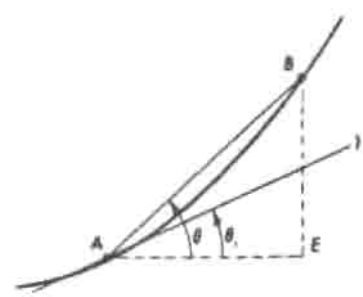
dx و dt هردو بینهایت کوچکند وخارج‌قسمت $\frac{dx}{dt}$ دراصطلاح ریاضی حد نسبت نمو تابع x به‌نمو متغیر t است‌وقتی‌که Δt به‌سمت‌صفرمیل کند می‌دانید که این حد مشتق x نسبت t است . بنابراین تندی لحظه‌ای مشتق مسافت نسبت به‌زمان است.

پرسش ۱-۸- چون dx و dt هردو بینهایت کوچکند آیا لازم است v نیز بینهایت‌کوچك باشد؟

درشکل ۱-۶ به‌طور واضح نشان داده شده است که وقتی نقطه B به A نزدیك می‌شود زاویه θ تغییر می‌کند و درحد یعنی وقتی که $\Delta t = 0$ می‌گردد خط AB درنقطه A به‌صورت مماس برمنحنی درمی‌آید و می‌توانیم بنویسیم :

$$v = \frac{dx}{dt} = tg\theta_1 \qquad (۶-۱)$$

یعنی : تندی لحظه‌ای درهرلحظه t برابرشیب خط مماس برمنحنی « مسافت ـ زمان » است و این خود تعبیر هندسی مشتق است .



شکل ۱-۶- تندی لحظه‌ای برابر $tg\theta_1$ است .

حرکت شتابدار

وقتی که متحرکی دارای تندی ثابت نباشد حرکت آن شتابدار است .

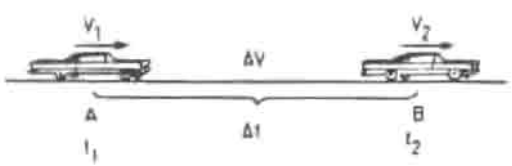
شتاب ، چنانکه می‌دانید ، تغییر تندی در واحد زمان است . یعنی :

$$\text{شتاب} = \frac{\text{تغییر تندی}}{\text{مدت تغییر تندی}}$$

اتومبیل به هنگام سرعت‌گرفتن دارای شتاب مثبت و در وقت پائین‌آوردن سرعت به‌قصدایستادن دارای شتاب منفی است . دیمانسیون شتاب $\frac{\frac{L}{T}}{T}$ یا $\frac{L}{T^2}$ و یا LT^{-2} و واحد آن در دستگاه بین‌المللی واحدها $\frac{m}{s^2}$ است .

شتاب متوسط ـ متحرکی، مثلا یك اتومبیل را در نظر بگیریم‌که روی خط راست AB با شتاب در حرکت است (شکل ۱-۷) .

اگردرلحظهٔ t_1 که اتومبیل ازنقطه A می‌گذرد



شکل ۱-۷- حرکت شتابدار یك اتومبیل در مدتمعین

دارای تندی v_1 و درلحظهٔ t_2 که از B می‌گذرد دارای تندی v_2 باشد تغییر تندی آن $\Delta v = v_2 - v_1$ است که درمدت $\Delta t = t_2 - t_1$ صورت گرفته است بنابراین اندازه شتاب متوسط متحرك دراین مدت برابر با

$$\bar{a} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (۱-۶) \qquad \text{اندازه شتاب متوسط}$$

پرسش ۱-۹ ـ چه راههائی برای شتاب دار کردن حرکت یك متحرك بین دونقطه ازمسیرازحرکت پیشنهاد می‌کنید ؟

برای این‌که مفهوم شتاب متوسط بهتر درك شود نمودار تغییرات تندی متحرك را با زمان ، یا به‌عبارت دیگر نمودار «تندی ـ زمان» را برای متحرك مورد نظر رسم می‌کنیم . فرض کنید در یك آزمایش به‌کمك سرعت سنج اتومبیل ، تندی‌لحظه‌ای اتومبیلی که با حرکت شتاب‌دار شروع به حرکت کرده است درلحظات مختلف (مثلا ۲ثانیه به ۲ ثانیه) اندازه‌گیری ونتایج حاصل درجدول ۱-۲ ثبت‌شده است . شکل ۱-۸ نمودار تغییرات تندی این‌اتومبیل را در مدت ۶ ثانیه نشان می‌دهد . شتاب متوسط متحرك دراین مدت برابر است با :

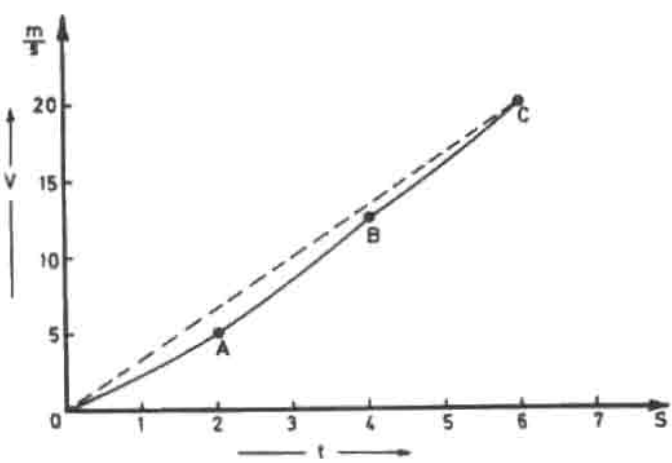
$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(۱۸\frac{m}{s}) - (۰\frac{m}{s})}{(۶^s) - (۰^s)} = ۳\frac{m}{s^2}$$

درصورتی‌که شتاب متوسط بین ۰ و ۲ ثانیه یا بین ۲ و ۴ ثانیه و ۴ و ۶ ثانیه متفاوت است . یعنی :

$$\bar{a}_{۰\text{ و }۲} = \frac{(۵\frac{m}{s}) - (۰\frac{m}{s})}{(۲^s) - (۰^s)} = ۲/۵\frac{m}{s^2}$$

جدول ۱-۲

زمان به‌ثانیه	تندی به متر برثانیه	تندی‌به کیلومتر درساعت
۰	۰	۰
۲	۵	۱۸
۴	۱۲/۵	~ ۴۵
۶	۱۸	~ ۶۵



شکل ۱-۸

$$\bar{a}_{۲\text{و}۲}=\frac{(۱۲/۵\frac{m}{s})-(۵\frac{m}{s})}{(۴^s)-(۲^s)}=۳/۷۵\frac{m}{s^۲}$$

$$\bar{a}_{۲\text{و}۶}=\frac{(۱۸\frac{m}{s})-(۱۲/۵\frac{m}{s})}{(۶^s)-(۴^s)}=۲/۷۵\frac{m}{s^۲}$$

پرسش ۱-۱۰- شتاب متوسط این حرکت بین لحظات ۲ ثانیه و ۶ ثانیه چه اندازه است ؟

بدیهی است $\bar{a}=\frac{\Delta v}{\Delta t}$ شیب خط راست oc است ونشان می‌دهدکه اگر متحرك با شتاب ثابتی حرکت کند نمودار تندی ـ زمان آن یك خط راست است .

پرسش ۱-۱۱- نمودار تندی ـ زمان متحرکی که باتندی ثابت حرکت می‌کند به‌چه‌صورت است؟

شتاب لحظه‌ای ـ شتاب لحظه‌ای یعنی شتاب در هر لحظه اززمان یا به‌عبارت دیگر شتاب متحرك درهر نقطه از مسیرحرکت . این شتاب مانند تندی لحظه‌ای به روش خاص ریاضی حساب می‌شود وبرای این منظور باید در رابطهٔ $\bar{a}=\frac{\Delta v}{\Delta t}$ ، زمان Δt را بینهایت کوچك بگیریم ، یعنی Δt را به‌سمت صفر میل دهیم . دراین‌صورت Δv نیز به‌سمت صفرمیل می‌کند وکسر $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ به‌سوی حدی میل می‌نماید که اندازهٔ‌آن شتاب لحظه‌ای متحرك درهرنقطه ازمسیر حرکت است یعنی :

$$a=\lim_{\Delta t\to ۰}\frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (۷-۱)$$ شتاب لحظه‌ای

این حد را بنا به قرارداد ریاضی به $\frac{dv}{dt}$ نمایش می‌دهند . بنابراین

$$\boxed{a=\frac{dv}{dt}} \quad (۸-۱)$$

چون $\frac{dv}{dt}$ نمایش مشتق تابع v نسبت به متغیر t است اندازهٔ شتاب لحظه‌ای a برابر است با اندازهٔ مشتق تندی v نسبت به زمان t .

پرسش ۱-۱۲- با رسم یك شکل نشان‌دهید که شتاب لحظه‌ای در هـرلحظهٔ t برابر شیب خط مماس برنمودار تندی ـ زمان است .

مثال ـ تندی متحرکی برحسب $\frac{m}{s}$ طبق رابطهٔ $v=۱۰\sqrt{t}$ با جذر زمـان t متناسب است. شتاب این حرکت را درلحظهٔ $t=۱۰^s$ ثانیه حساب‌کنید .

ـ رابطه $v=۱۰\sqrt{t}$ رابه‌صورت $v=۱۰t^{\frac{۱}{۲}}$ می‌نویسیم . شتاب لحظه‌ای مشتق این رابطه است یعنی :

$$a=\frac{dv}{dt}=۱۰\times\frac{۱}{۲}t^{\frac{۱}{۲}-۱}=۵t^{-\frac{۱}{۲}}=\frac{۵}{\sqrt{t}}$$

به ازاء $t=۱۰^s$ داریم :

$$a=\frac{۵}{\sqrt{۱۰}}=\frac{۵\sqrt{۱۰}}{۱۰}\approx\frac{۵}{۱۰}\times۳/۱۶=۱/۵۸\frac{m}{s^۲}$$

حرکت برروی خط راست با شتاب ثابت

اگرسرعت[۱] متحرکی در زمانهای مساوی‌متوالی یکسان تغییر کند شتاب متحرك ثابت است . نمودار

۱ـ چون درحرکت برروی خط راست تندی وسرعت ازلحاظ مقدار برابرند درصورتی‌که جهت حرکت منظور نشود می‌توان اصطلاح سرعت را بـه جای تندی به‌کاربرد و در هرحال سرعت اندازه بردار تندی است

«سرعت ـ زمان» این حرکت ، چنانکه گفتیم ، خط راستی است که شیب آن برابر اندازه شتاب متحرک است . اگر سرعت متحرک در حال افزایش باشد حرکت تندشونده و شتاب مثبت است ، مانند هواپیمائی که روی باند پرواز فرودگاه سرعت می‌گیرد تا به پرواز درآید . اگر سرعت متحرک در حال کاهش باشد حرکت کندشونده و شتاب منفی است ، مانند حرکت هواپیمایی در حال پروازی که روی باند فرودگاه می‌نشیند تا متوقف شود . چون حرکت بر روی خط راست صورت می‌گیرد بردارهای تغییر مکان و تندی و شتاب هر سه در راستای این خط هستند .

پرسش ۱-۱۳ ـ در حرکت با شتاب ثابت آیا تفاوتی بین شتاب لحظه‌ای و شتاب متوسط وجود دارد؟

اگر در مبدأ زمان (که معمولا آن را لحظهٔ $t_0 = 0$ می‌گیریم) سرعت متحرک را به v_0 و در لحظهٔ t سرعت آن‌را به v نمایش دهیم شتاب ثابت متحرک از رابطهٔ زیر حساب می‌شود

$$a = \frac{v - v_0}{t - t_0} = \frac{v - v_0}{t} \qquad (۹-۱)$$

در حرکت تند شونده v از v_0 بزرگتر و a مثبت است ولی در حرکت کند شونده v از v_0 کوچکتر و شتاب منفی است . v_0 را «سرعت اولیه» متحرک می‌نامند .

مثال ۱ ـ اتومبیلی با شتاب ثابت از حال سکون به حرکت درمی‌آید و پس از ۲ ثانیه سرعتش به $18\frac{km}{h}$ می‌رسد شتاب حرکت این اتومبیل را حساب کنید .

ـ چون اتومبیل از حال سکون به حرکت درمی‌آید سرعت اولیه آن (یعنی v_0) صفر است

سرعت $18\frac{km}{h}$ برحسب متر بر ثانیه برابر است با $\frac{18 \times 1000^m}{3600^s} = 5\frac{m}{s}$ بنابراین :

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{(5\frac{m}{s}) - (0\frac{m}{s})}{2^s}$$

$$= \frac{5\frac{m}{s}}{2^s} = 2/5\frac{m}{s^2}$$

مثال ۲ ـ یک هواپیمای بوئینگ ۷۴۷ جمبوجت با سرعت $160\frac{m}{s}$ روی باند فرودگاه می‌نشیند و ۳۲ ثانیه طول می‌کشد تا کاملا متوقف شود . اگر حرکت هواپیما با شتاب ثابت کند شود شتاب آن را حساب کنید .

ـ سرعت اولیه هواپیما $v_0 = 160\frac{m}{s}$ و سرعت آخری آن $v = 0$ و مدت حرکت $t = 32^s$ است بنابراین

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{(0\frac{m}{s}) - (160\frac{m}{s})}{32^s} = -\frac{160\frac{m}{s}}{32^s} = -5\frac{m}{s^2}$$

علامت منفی نشان می‌دهد که بردار شتاب در خلاف جهت بردار تندی است ، به عبارت دیگر حرکت کند شونده است .

شکل ۱-۹ـ بوئینگ ۷۴۷ جمبوجت یکی از بزرگترین هواپیماهای مسافربری جهان

محاسبهٔ سرعت لحظه‌ای و مسافت پیموده شده ـ سرعت لحظه‌ای متحرك ، در حرکت بـر روی خط راست ، وقتی‌که شتاب ثابت است از رابطهٔ (۱ـ۹) حساب می‌شود .

$$v = at + v_0 \qquad (۱۰-۱)$$

مسافت x راکه متحرك درمدت t مـی‌پیماید از رابطه زیر می‌توان حساب‌کرد :

$$x = \bar{v}\, t$$

$\bar{v}$ سرعت متوسط متحرك است کـه برابر میانگین عددی v و v_0 است یعنی :

$$\bar{v} = \frac{v + v_0}{2}$$

بنابراین

$$x = \frac{v + v_0}{2} t \qquad (۱۱-۱)$$

روابط (۱ـ۱۰) و (۱ـ۱۱) دو رابطه‌مهم و اساسی هستندکه توسط آنها سرعت لحظه‌ای متحرك و مسافت پیموده شده پس ازگذشت زمان t حساب می‌شود. ازترکیب این دورابطهٔ اساسی‌دو رابطه‌دیگر بین سرعت ومسافت وزمان به دست می‌آید که در محاسبهٔ سرعت یا مسافت نیز زیاد بکار می‌روند :

اگر در رابطه (۱ـ۱۱) به جای v طرف‌دوم رابطهٔ (۱ـ۱۰) را بگذاریم خواهیم داشت:

$$x = \frac{(at + v_0) + v_0}{2} \cdot t = \frac{at^2 + 2v_0 t}{2}$$

و یا

$$x = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t \qquad (۱۲-۱)$$

این رابطه وقتی به‌کار می‌رود کـه شتاب و سرعت اولیه و زمان حرکت معین باشند وبخواهیم مسافت پیموده شده را حساب کنیم . اگر در رابطه (۱ـ۱۱)به‌جای t معادل‌آن‌را ازرابطه $t = \frac{v - v_0}{a}$ قرار دهیم خواهیم داشت :

$$x = \left(\frac{v + v_0}{2}\right)\left(\frac{v - v_0}{a}\right) = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

و یا

$$v^2 - v_0^2 = 2ax \qquad (۱۳-۱)$$

به‌کمك این رابطه مسافت طی شده از روی سرعتهای اولی و آخری و شتاب حرکت حساب می‌شود .

پرسش ۱ـ۱۴ـ اگرمتحرك از حال سکون با شتاب ثابت شروع به‌حرکت کند یعنی سرعت اولیه آن (v_0) صفرباشد معادلات (۱ـ۱۰) و (۱ـ۱۱) و (۱ـ۱۲) و (۱ـ۱۳) به‌چه صورت درمی‌آیند؟

مثال ۱ـ یك هواپیمای بوئینگ ۷۴۷ روی باند پرواز فرودگاه با شتاب ثابت $۴\ \frac{m}{s^2}$ بـه راه می‌افتد و ۴۰ ثانیه طول مـی‌کشد تا از زمین بلند شود مطلوبست :

الف) سرعت هواپیما در لحظهٔ بلند شدن از زمین .

ب) مسافتی‌که روی باند پرواز می‌پیماید .

ـ الف) سرعت اولیه هواپیما $v_0 = ۰$ است

به‌ازاء $a=۴\frac{m}{s^۲}$ و $t=۴۰^s$ ، سرعت هواپیما درلحظهٔ بلند شدن برابر است با

$$v=at+v_۰=\left(۲\frac{m}{s^۲}\right)\left(۴۰s\right)+\left(۰\frac{m}{s}\right)=۱۶۰\frac{m}{s}$$

ب) مسافتی که هواپیما روی زمین‌می‌پیماید برابر است با :

$$x=\frac{۱}{۲}at^۲+v_۰t=\frac{۱}{۲}\left(۴\frac{m}{s^۲}\right)\left(۴۰s\right)^۲+۰=۳۲۰۰m$$

یا ۳/۲ کیلومتر

مثال ۲- ترنی که باسرعت $۸/۰\frac{m}{s}$ روی‌ریل راست و افقی درحرکت است دراثر افزایش نیروی موتور شتاب می‌گیرد و باشتاب ثابت $۰/۲۰\frac{m}{s^۲}$ مسافت ۱/۵۰۰ کیلومتر را می‌پیماید . سرعت آن درپایان این مسافت چه اندازه است ؟

ـ سرعت‌اولیه ترن $v_۰=۸/۰\frac{m}{s}$ ومسافت پیموده شده $x=۱۵۰۰m$ و شتاب حرکت $a=۰/۲۰\frac{m}{s^۲}$ است . سرعت آخری ترن‌ازرابطهٔ زیر حساب می‌شود

$$v^۲=۲ax+v_۰^۲$$

یا

$$v^۲=۲\times\left(۰/۲۰\frac{m}{s^۲}\right)\left(۱۵۰۰m\right)+\left(۸/۰\frac{m}{s}\right)^۲=۶۶۴\left(\frac{m}{s}\right)^۲$$

وازآنجا

$$v=۲۵/۷۷\frac{m}{s}$$

یکی از مهمترین حرکتهای با شتاب ثابت « حرکت سقوط آزاد » اجسام است . «سقوط‌آزاد» یعنی حرکت یك‌جسم درنزدیکی سطح‌زمین درصورتی که بجز نیروی جاذبهٔ زمین نیروی دیگری برجسم وارد نشود . به‌عبارت دیگر اگر جسمی در اثر وزن‌خود سقوط می‌کند ، اثرمقاومت هوا برآن ناچیز باشد . درفیزیك سال اول با این حرکت آشنا شده‌اید ، در این‌جا باشرح تجربی بیشتری‌آن‌را دنبال‌خواهید کرد.

سقوط آزاد اجسام

سقوط اجسام ازقرنها پیش ذهن انسان‌متفکر را به خود مشغول داشته است . ارسطو فیلسوف یونانی (۳۲۲-۳۸۴ پیش‌ازمیلاد مسیح) معتقد بود که اجسام سنگینتر تندتر از اجسام سبکتر سقوط می‌کنند . این قضاوت بامشاهدات عادی ، که مثلا یك برگ درخت کندتر از یك قطعه سنگ سقوط می‌کند مطابقت داشت. قریب دوهزارسال طول‌کشید تانظریه‌ای برخلاف عقیده ارسطو تولد یافت .

درسال ۱۵۹۰ میلادی گالیله نظریهٔ ارسطورا دربارهٔ سقوط اجسام ردکرد و اظهار داشت : اگر مشاهده می‌شودکه اجسام با سرعتهای متفاوت‌درهوا سقوط می‌کنند علت این‌تفاوت وجود هوا ومقاومت آن درمقابل حرکت اجسام است . اگراثر مقاومت هوا حذف شود همهٔ اجسام بزرگ وکوچك ، چه‌سبك وچه‌سنگین بایك شتاب سقوط می‌کنند . گالیله برای اثبات نظرخود ، گلوله های کوچك به سنگینیهای متفاوت را باهم ازبالای برج معروف پیزا رهاکرد . چون اثرمقاومت هوا برحرکت این‌اجسام ناچیز بود باهم به سطح زمین رسیدند . شما هم بایك آزمایش ساده می‌توانید این مطلب را تاییدکنید : یك صفحه

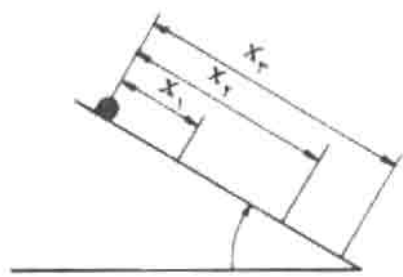
کاغذ ویك جسم کوچك سنگین مثلا یك تکه سنگ را باهم ازیك نقطه رها کنید سنگ خیلی زودتر ازصفحه کاغذ به‌زمین می‌رسد ولی اگر صفحه کاغذ را مچاله کرده به شکل گلوله کوچکی درآوریدوتکه سنگ و گلوله کاغذ را باهم ازهمان نقطه رها کنید هردو تقریباً باهم به سطح زمین می‌رسند .

آزمایشهای گالیله دربارهٔ سقوط اجسام نه‌تنها خط بطلان برعقایدفلسفی نادرست‌آن زمان کشیدبلکه نشان داد بهترین روش برای کشف قوانین طبیعت «روش‌تجربی» است ، در زمان گالیله امکان اندازه گیری‌های مستقیم و دقیق روی حرکت تند سقوط اجسام وجود نداشت به همین جهت گالیله برای پی‌بردن به‌قانون سقوط آزاد اجسام از حرکت یك گلوله برسطح شیب‌دار که نسبت به‌سقوط‌آزادکندتر است استفاده‌کرد . اودلیل انتخاب سطح شیب دار را با این فرضیه توجیه‌کرد : اگر جسمی‌که سقوط آزاد می‌کند شتاب ثابتی داشته باشد گلوله‌ای‌هم کـه روی سطح صیقلی شیب‌دار حرکت مـی‌کند (شکل ۱ـ۱۵) نیز دارای شتاب ثابت است با این تفاوت‌که شتاب کمتری دارد . بنابراین اگـر برای جسمی‌که سقوط آزاد می‌کند $\frac{x}{t^2}$(نسبت‌فاصله‌پیموده شده به‌مجذور زمان) مقدار ثابتی باشد این نسبت برای گلوله‌ای هم که ازبالای سطح شیب‌دار بدون اصطکاك ازحال سکون به‌حرکت درمی‌آید ومسافتهای مختلف را درزمانهای متفاوت مـی‌پیماید نیز مقدار ثابتی است یعنی

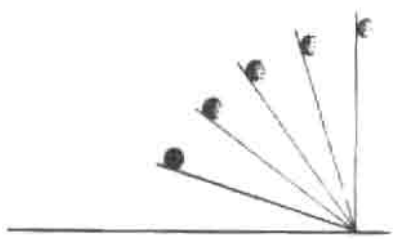
$$\frac{x_1}{t_1^2}=\frac{x_2}{t_2^2}=\frac{x_3}{t_3^2}=\ldots\ldots=Cte$$

پرسش ۱-۱۵- این نسبت ثابت چیست ؟

گالیله در یك سری آزمایشهای دیگر شیب سطح را تغییر داد و دریافت وقتی که زاویه شیب سطح‌بزرگ‌می‌شود نسبت $\frac{x}{t^2}$ نیز بزرگ می‌شود ، یعنی شتاب حرکت افزایش می‌یابد ولی این نسبت برای هریك اززاویه‌های شیب بازهـم مقدار ثابتی است‌که بستگی به‌مسافتی‌که گلوله می‌پیماید ندارد[1]



الف ـ نسبت $\frac{x}{t^2}$ مقدار ثابتی است



ب ـ وقتی‌که شیب سطح افزایش می‌یابد نسبت $\frac{x}{t^2}$ نیز افزایش می‌یابد . وقتی‌که زاویهٔ شیب سطح به 90° می‌رسد جسم در راستای قائم سقوط آزاد می‌کند.

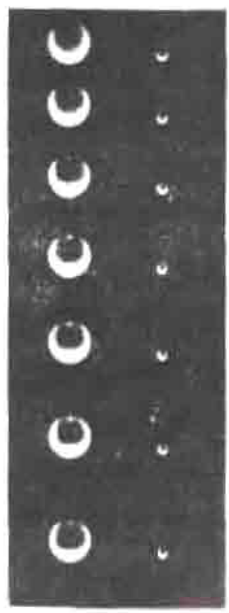
شکل ۱-۱۵- آزمایش باسطح شیب دار گالیله

۱ـ برای این‌که گلوله روی یك خط راست حرکت کند کافی است‌که درشیار مستقیم مناسبی که سرتاسر یك تخته‌دراز تعبیه می‌شود وسطح این شیارکاملا صیقلی است حرکت نماید .

درآخر گالیله چنین استدلال کرد : درحالت‌ویژه‌ای که زاویهٔ شیب ۹۰ درجه می‌شود گلوله درراستای قائم پایین می‌افتد و این همان حالت سقوط آزاد جسم است ، براساس این استدلال نسبت $\frac{x}{t^2}$ در این حالت بازهم ثابت می‌ماند (هرچند گالیله نتوانست بگوید که مقدار عددی این نسبت چیست) .

پرسش ۱-۱۶- به نظرشما چه اشکالی در کار آزمایش گالیله بود که به‌جای ادامهٔ اندازه‌گیری به‌استدلال متوسل شد ؟

امروزه باپیشرفت دانش وفن ، مطالعهٔ سقوط اجسام آسان شده است وبه راههای مختلفی صورت می‌گیرد . شکل ۱-۱۱ عکسی است که به هنگام سقوط آزاد دوگلوله به وزنهای متفاوت با عکاسی استروبوسکپی[1] گرفته شده است . دوگلوله باهم‌بدون سرعت اولیه رها شده‌اند وزمان بین هردو تصویر متوالی $\frac{1}{30}$ ثانیه است .



شکل ۱-۱۱- نمایش سقوط آزاد دوگلوله به وزنهای مختلف که با عکاسی استروبوسکپی گرفته شده است .

عکاسی استروبوسکپی نظیر عکاسی معمولی است جز این که منبع نور ، منحصراً یك لامپ استروبوسکپی است .

درمدت‌عکس‌برداری‌دیافراگم دوربین بازاست وآزمایش دراتاق تاریك انجام می‌شود تانوری که جسم متحرك را روشن می‌کند منحصراً نور حاصل ازلامپ استروبوسکپی باشد . این لامپ آذرخشهای (فلاشهای) درخشانی تولید می‌کند که می‌توان‌تعداد آنها را درثانیه به‌دلخواه تنظیم کرد . چون مدت درخشیدن هر آذرخش فقط درحدود ده‌میلیونیم ثانیه ($10 \times 10^{-6}s$) است حرکت جسمی‌که سقوط می‌کند به‌صورت یك رشته عکسهای مجزا ومتوالی برروی صفحهٔ عکاسی ظاهر می‌شود وتعداد عکسها درهرثانیه برابر تعداد آذرخشها درثانیه است .

پرسش ۱-۱۷- آیا با این عکسهای متوالی می‌توان قانون سقوط‌آزاد را بدست‌آورد .

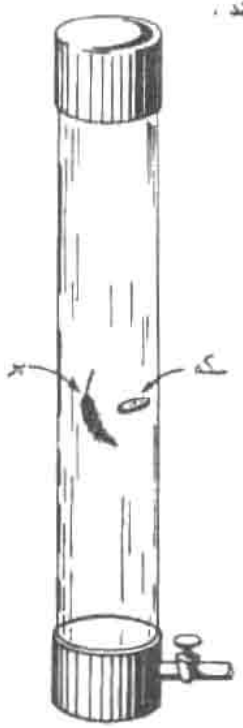
وقتی‌که یك‌گلوله چوبی ویك گلوله فولادی باهم ازیك ارتفاع درهوا رها می‌شوند آزمایش‌دقیق نشان می‌دهد که گلوله چوبی اندکی ازگلوله‌فولادی عقب‌می‌ماند وهرچه‌ارتفاع سقوط بیشتر باشد عقب ماندن گلوله چوبی بیشتر است . علت ، چنانکه گفتیم، وجود اصطکاك هواست که دراثر حرکت نسبی جسم وهوا به وجود می‌آید . هرچه جرم حجمی جسم کمتر باشد اثرمقاومت‌هوا برآن محسوس‌تراست: مثلا اجسامی مانند پر مرغ یا برگ درخت که سطح

---

[1] Stroboscopic photography-1

تماسشان با ملکولهای هوا زیاد است به‌آرامی در هوا سقوط می‌کنند .

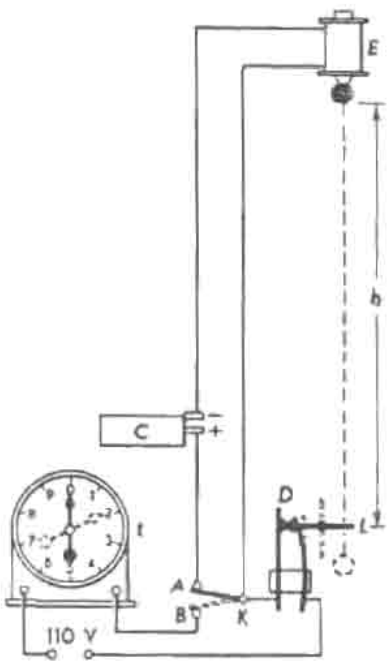
درجائی که هوا نباشد یك پرمرغ و یك سکه هردو با یك شتاب سقوط می‌کنند . این واقعیت را می‌توان بایك‌آزمایش ساده طبق شکل (۱–۱۲) نشان داد : یك پرمرغ ویك‌سکه فلزی درون لوله شیشه‌ای است . وقتی‌که هوای درون لوله خالی شود ولوله را برگردانندپرمرغ‌وسکه باهم‌به‌ته لوله سقوط می‌کنند ولی هنگامی‌که لوله پر ازهوا است پرمرغ خیلی دیرتر از سکه به ته لوله می‌رسد . درجائی که هوا نیست همهٔ اجسام با شتاب یکسان سقوط می‌کنند .



شکل ۱–۱۲– یك سکهٔ فلزی ویك‌پرمرغ درخلأ با هم سقوط می‌کنند

درسال ۱۹۷۰ میلادی یکی از فضانوردان امریکائی به‌نام دیوید اسکات[1] در سطح کرهٔ ماه از ارتفاع معینی یك‌چکش ویك پرمرغ را با هم رها کرد ومیلیونها نفردرزمین به‌وسیلهٔ تلویزیون مشاهده کردندکه چکش وپرمرغ درکنار هم سقوط کرده و با هم به‌سطح ماه رسیدند . چون کرهٔماه فاقد آتمسفر است می‌توان گفت که‌آزمایش اسکات در خلأ کامل انجام گرفته است .

تحقیق قانون سقوط‌آزاد با آزمایش– شکل ۱–۱۳ طرح یکی از آزمایشهای متعددی را که در تحقیق قانون سقوط آزاد اجسام بکار رفته است نشان می‌دهد. دراین‌آزمایش گلولهٔ فولادی کوچکی از



شکل ۱–۱۳– آزمایش سقوط آزاد اجسام

David R. Scott -1

ارتفاعهای مختلف سقوط می‌کند و زمان سقوط برای هرمسافت اندازه‌گرفته می‌شود. چون به‌علت کوچك بودن ارتفاعهای سقوط، زمانهائی که دراین آزمایش اندازه‌گیری می‌شود ازیك‌ثانیه کوچکتراست برای اندازه‌گیری زمان ازیك کرونومتر الکتریکی استفاده می‌شود که برحسب صدم ثانیه مدرج‌است.

برای این‌که هنگام براه انداختن و متوقف کردن کرونومتر خطائی‌توسط‌آزمایش‌کننده دراندازه‌گیری واردنشود ازکلید الکتریکی استفاده می‌شود. وقتی که‌کلید الکتریکی روی وضعیت A است جریانی توسط باتری C در آهنربای الکتریکی E برقرار می‌شود واین آهن‌ربا گلولهٔ فولادی را آماده برای افتادن نگه می‌دارد. همین که‌کلید K روی وضع B زده می‌شود مدار آهن‌ربای الکتریکی قطع‌می گردد وگلوله می‌افتد ولی درهمین‌لحظه مدار کرونومتر الکتریکی بسته می‌شود وکرونومتر به‌راه‌می‌افتد و لحظه‌ای که‌گلوله به‌کلید L برخورد می‌کند مدار الکتریکی کرونومتردرمحل‌اتصال D قطع‌وکرونومتر متوقف می‌شود. به‌این ترتیب زمانی‌که گلوله ارتفاع h را می‌پیماید با دقت صدم ثانیه روی کرونومترمعین می گردد. می‌توان‌آهن‌ربای‌الکتریکی را ازجای اولیه بالا وبالاتر برد و آزمایش را تکرار کرد و مسافتها و زمانهای اندازه‌گرفته شده را در جدولی ثبت نمود. فرض کنید آزمایش ۵ بار انجام شده ونتایج حاصل درجدول ۱-۳ ثبت‌گردیده‌است.

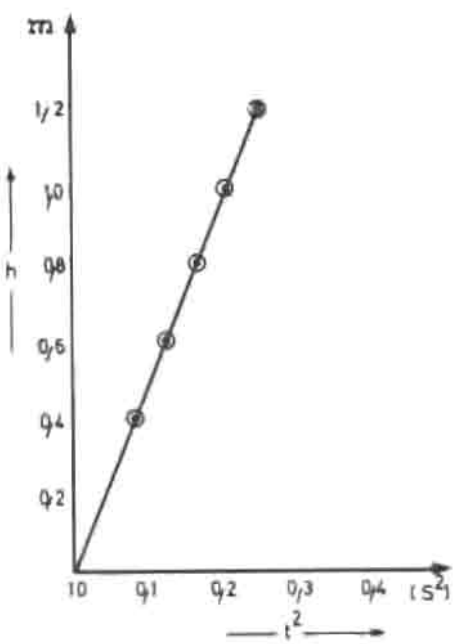
مشاهده می‌شودکه نسبت $\frac{h}{t^2}$ مقدار ثابتی است که اندازهٔ متوسط آن تا دو رقم معنی‌دار $۴/۹ \frac{m}{s^2}$ است ونشان می‌دهدکه h متناسب با t^2 است یعنی:

$$h_{(m)} = ۴/۹\ t^2_{(s^2)} \quad \text{و یا}$$

بنابراین نمودار تغییرات h با t^2 خط راستی است که شیب آن ۴/۹ است (شکل ۱-۱۴)

جدول ۱-۳

شماره آزمایش	ارتفاع سقوط m ≈ (h)	زمان‌سقوط s ≈ (t)	$\frac{h}{t^2}(\frac{m}{s^2})$	$\frac{2h}{t^2}(\frac{m}{s^2})$
—	۰	۰	۰	۰
۱	۰/۴۰	۰/۲۸۵	۴/۹	۹/۸
۲	۰/۶۰	۰/۳۵	۴/۹	۹/۸
۳	۰/۸۰	۰/۴۳	۴/۹	۹/۸
۴	۱/۰۰	۰/۴۵	۴/۹	۹/۸
۵	۱/۲۰	۰/۴۹۵	۴/۹	۹/۸



شکل ۱-۱۴- نمودار تغییرات h با t^2 درسقوط آزاد

است؟

نتیجه این آزمایش نشان می‌دهد که اگر مقاومت هوا ناچیز بیاشد حرکت سقوط آزاد یك جسم در مجاورت زمین حرکتی است با شتاب ثابت که به صورت $h=\frac{1}{2}gt^2$ است ، شتاب افتادن جسم راکه ناشی ازجاذبهٔ زمین است چنان‌که می‌دانید به «g» نمایش می‌دهند ، بنابراین معادلهٔ حرکت سقوط‌آزاد جسم بدون سرعت اولیه چنین است :

$$h=\frac{1}{2}gt^2 \qquad (۱۴-۱)$$

و شتاب g از رابطهٔ بالا چنین حساب می‌شود :

$$g=\frac{2h}{t^2} \qquad (۱۵-۱)$$

اگر به جای h و t مقادیری را که طبق جدول ۱ـ۳ ازآزمایش به‌دست آمده است بگذاریم اندازهٔ متوسط g تا دو رقم معنی‌دار برابر خواهد شد با $g=۹/۸\frac{m}{s^2}$

هرگاه درآزمایشهائی نظیر این‌آزمایش اجسامی به جرمهای متفاوت به‌طور آزاد سقوط کنند نتایج حاصل درحدود دقت آزمایش یکسان خواهد بود ، بنابراین g معرف شتاب سقوط آزاد کلیه اجسام است .

چنانچه بخواهیم سرعت حرکت جسمی راکه بدون سرعت اولیه سقوط آزاد می‌کند پس‌ازگذشت زمان t یا پس‌از پیمودن مسافت h معین کنیم کافی است‌که در روابط (۱ـ۱۰) و (۱ـ۱۲) v_0 راصفر بگیریم وبه‌جای شتاب a حرف g را قرار دهیم و v بم دراین صورت خواهیم داشت :

$$V=g.t \qquad (۱۶-۱)$$

و یا

$$V=\sqrt{2gh} \qquad (۱۷-۱)$$

پرسش ۱ـ۱۹ ـ چگونه می‌توانید رابطه $v=gt$ رامستقیماًازرابطهٔ $h=\frac{1}{2}gt^2$ به‌دست‌آورید؟ چگونه می‌توانید فرمول $v=\sqrt{2gh}$ را ازترکیب دو رابطه $v=gt$ و $h=\frac{1}{2}gt^2$ به دست آورید؟

شتاب جاذبه درنقاط مختلف زمینـ شتاب جاذبه زمین را یا به‌عبارت دیگر شتاب سقوط آزاد اجسام را درنقاط مختلف سطح کره زمین با دقت اندازه گرفته‌اند ومعلوم شده است‌که این‌شتاب مقدارثابتی نیست وازنقطه‌ای به‌نقطهٔ دیگر جزئی تغییرمی‌کند. با آن که تغییرات g جزئی است و اثر محسوسی بر اغلب مسائل عملی ندارد ولی بهتر این است‌که از وجود آنها آگاه باشیم . به‌طورکلی اندازه g درسطح زمین بین کمترین مقدار $۹/۷۸۰۴\frac{m}{s^2}$ (در استوا یعنی‌درعرض جغرافیائی صفروسطح تراز دریا) وبیشترین مقدار $۹/۸۳۲۱\frac{m}{s^2}$ (در دو قطب شمال وجنوب یعنی در عرض جغرافیائی $\pm ۹۰^\circ$) تغییر می‌کند .

تغییرات g بستگی به‌چند عامل مهم‌ازجمله ، فاصلهٔ نقاط از مرکز زمین ، دوران زمین ، نامنظم بودن ساختمان طبقات زمین دارد . اندازه‌گیریهای دقیق و دائمی نشان می‌دهدکه حتی جزر و مدآب اقیانوسها و دریاها نیز در تغییر g مؤثراست ولی این تغییرات خیلی کم ودرحدود میلیونیم است .

نظر به‌ثابت نبودن مقدار g درنقـاط مختلف زمین، ادارهٔ اوزان‌ومقیاسات بین‌المللی برای کارهای عملی ، اندازه استاندارد g را $۹/۸۰۶۶۵ \frac{m}{s^۲}$ قـبول کرده است ، ولی در عمل معمولا g را $۹/۸۰ \frac{m}{s^۲}$ منظور می‌دارند .

پرتاب در راستای قائم ـ وقتی که جسمی بـا تندی اولیه $v_۰$ در راستای‌قائم به طرف بالا پرتاب می‌شود تندی آن به‌تدریج کم می‌گردد تا این‌که دریك نقطه به‌صفر برسد . جسم دریك لحظه دراین نقطه متوقف می‌شود سپس به طرف زمین سقوط مـی‌کند و در صورتی‌که اثراصطکاك هوا برآن ناچیزباشد باهمان تندی‌که به‌بالا پرتاب شده بود به‌جای پرتاب اولیهٔ خود برمی‌گردد .

آزمایش و محاسبه نشان می‌دهدکه زمان لازم برای رسیدن جسم به‌بالاترین نقطه مسیر برابر زمانی است که جسم ازاین نقطه دوباره به‌مبدأ پرتاب خود برمی‌گردد .

پرسش ۱ـ۲۰ـ آیا در هرنقطهٔ دیگر از مسیر حرکت ، اندازه‌تندی جسم دروقت بالارفتن ، برابر اندازه تندی‌آن به‌هنگام پائین آمدن است ؟

برای محاسبهٔ سرعت وزمان حرکت ومسافت پیموده شده می‌توان رابطه‌های (۱ـ۱۰) و (۱ـ۱۱) و (۱ـ۱۲) و (۱ـ۱۳) را به‌کار برد ، کافی است که دراین رابطه‌ها به‌جای شتاب a شتاب جاذبه g وبه‌جای مسافت x ارتفاع h گذارده شود. بنابراین:

$$v = v_۰ + gt \qquad (۱۸-۱)$$

$$h = \frac{v + v_۰}{۲} t \qquad (۱۹-۱)$$

$$h = v_۰ t + \frac{۱}{۲} g t^۲ \qquad (۲۰-۱)$$

$$v^۲ - v_۰^۲ = ۲gh \qquad (۲۱-۱)$$

یادآوری ـ وقتی که می‌خواهید روابط بالا را درحل مسائل بکار برید ، به هنگام عـددگذاری نکات زیر را رعایت‌کنید .

۱) نقطه پـرتاب را مبدأ سنجش فاصله‌هـا بگیرید .

۲) فاصله‌های بالای مبدأ را مثبت وفاصله‌های پائین مبدأ را منفی بگیرید .

۳) تندیهای روبه‌بالا را بـا علامت مثبت و تندیهای روبه‌پائین را باعلامت منفی انتخاب‌کنید.

۴) علامت شتاب g راکه همواره روبه‌پائین است همیشه منفی بگیرید .

۵) درصورتی که جهت محورها رو به پائین مثبت انتخاب شودمقدارکمیتهای فوق تغییرعلامت می‌دهند .

اینك چند مثال :

مثال ۱ـ سنگی در راستای قـائـم با تندی $۳۹/۲ \frac{m}{s}$ روبه‌بالا پرتاب می‌شود . چه‌زمانی طول می‌کشد تا به بالاترین نقطه مسیر خود (نقطه‌اوج) برسد ؟ (مقاومت هوا را ناچیز فرض‌کنید) .

ـ اگربراساس نکات فوق جهت روبه‌بالا را مثبت بگیریم اندازه کمیتهای مورد لزوم با رعایت علامت عبارتست از :

$$v_۰ = ۳۹/۲ \frac{m}{s} \quad و \quad g = -۹/۸۰ \frac{m}{s^۲}$$

درلحظه‌ای‌که سنگ به‌نقطهٔ اوج خودمی‌رسد

$v=0$ است و خواهیم

$$v=v_0+gt$$

و

$$t=\frac{v-v_0}{g}$$

اگرمقادیر عددی را با رعایت علامت آنها دراین معادله بگذاریم خواهیم داشت :

$$t=\frac{0-39/2\frac{m}{s}}{-9/80\frac{m}{s^2}}=4/0s$$

مثال ۲ـ ازبالای یك بلندی‌که تا سطح زمین $78/4m$ فاصله دارد توسط یك‌کمان تیری باتندی $29/4\frac{m}{s}$ در راستای قائم به طرف بالا پرتاب می‌شود . اگراثر مقاومت هوا بر آن ناچیز باشد .

الف ـ تاچه ارتفاعی‌نسبت به مبدأ پرتاب ، تیر بالا می‌رود ؟

ب ـ چه زمانی طول می‌کشد تا به‌نقطه‌اوج خود برسد ؟

پ ـ پس‌ازگذشت چه زمانی به مبدأ پرتاب برمی‌گردد ؟

ت ـ با چه سرعتی به سطح زمین می‌رسد ؟

ج ـ مدت‌کل حرکت آن چند ثانیه است ؟

الف : داریم

$$v_0=29/4\frac{m}{s} \quad و \quad g=-9/80\frac{m}{s^2}$$

در نقطهٔ اوج $v=0$ است و h ازرابطهٔ زیرحساب می‌شود :

$$v^2=v_0^2+2gh$$

و یا

$$h=\frac{v^2-v_0^2}{2g}=\frac{(0)-(29/4\frac{m}{s})^2}{2\times(-9/8\frac{m}{s^2})}$$

$$h=\frac{-864/4\frac{m^2}{s^2}}{-19/60\frac{m}{s^2}}=44/1\,m$$

ب ـ زمان لازم برای رسیدن بـه نقطه اوج ازرابطهٔ زیر حساب می‌شود :

$$v=v_0+gt$$

یا

$$t=\frac{v-v_0}{g}$$

به ازاء $v=0$ و $v_0=29/4\frac{m}{s}$

و $g=-9/80\frac{m}{s^2}$ داریم

$$t=\frac{0-29/4\frac{m}{s}}{-9/80\frac{m}{s^2}}=3/0s$$

پ ـ زمـان رفتن و برگشتن جسم را به‌مبدأ پرتاب از رابطهٔ زیر حساب می‌کنیم

$$h=v_0t+\frac{1}{2}gt^2$$

چون درمبدأ پرتاب $h=0$ است کافی است دراین رابطه h را صفربگیریم یعنی :

$$0=v_0t+\frac{1}{2}gt^2=t\left(v_0+\frac{1}{2}gt\right)$$

دراین‌جادوجواب‌به‌دست می‌آید: یکی $t=0$ که لحظهٔ پرتاب‌است ودیگری

$$t=-\frac{2v_0}{g}$$

که جواب مسأله ، یعنی زمان رفت‌وبرگشت است ومقدارآن برابر است با :

$$t=-\frac{2\times29/4\frac{m}{s}}{-9/80\frac{m}{s^2}}=6/0s$$

ت ـ سرعت جسم به‌هنگام رسیدن بـه زمین

از سطح زمین رو به‌بالاست .

ج ـ برای حساب‌کردن مدت کل حرکت کافی است که در رابطهٔ

$$v = v_0 + gt$$

این مقادیررا قرار دهیم :

$$v = -۴۹/۰ \frac{m}{s} \text{ و } v_0 = ۲۹/۴ \frac{m}{s}$$

$$g = -۹/۸۰ \frac{m}{s^۲} \text{ و }$$

دراین‌صورت داریم :

$$t = \frac{v - v_0}{g} = \frac{-۴۹/۰ \frac{m}{s} - ۲۹/۴ \frac{m}{s}}{-۹/۸۰ \frac{m}{s^۲}}$$

$$= \frac{-۷۸/۴ \frac{m}{s}}{-۹/۸۰ \frac{m}{s^۲}} = ۸/۰ \, s$$

$$v^۲ = v_0^۲ + ۲gh$$

به‌ازاء $g = -۹/۸ \frac{m}{s^۲}$ و $v_0 = ۲۹/۴ \frac{m}{s}$

و $h = -۷۸/۴ m$ داریم :

$$v^۲ = \left(۲۹/۴ \frac{m}{s}\right)^۲ + ۲ \times \left(-۹/۸۰ \frac{m}{s^۲}\right) \times$$

$$\left(-۷۸/۴ \, m\right) = ۸۶۴/۴ \frac{m^۲}{s^۲} +$$

$$۱۵۳۶/۶ \frac{m^۲}{s^۲} = ۲۴۰۱ \frac{m^۲}{s^۲}$$

باجذرگرفتن ازاین عدد دوجواب به‌دست‌آید:

یکی $v = +۴۹/۰ \frac{m}{s}$ودیگری $v = -۴۹/۰ \frac{m}{s}$

ازاین دو جواب آن‌که علامت منفی دارد جواب سؤال است . جواب با علامت مثبت برابر تندی

خودتان آزمایش کنید

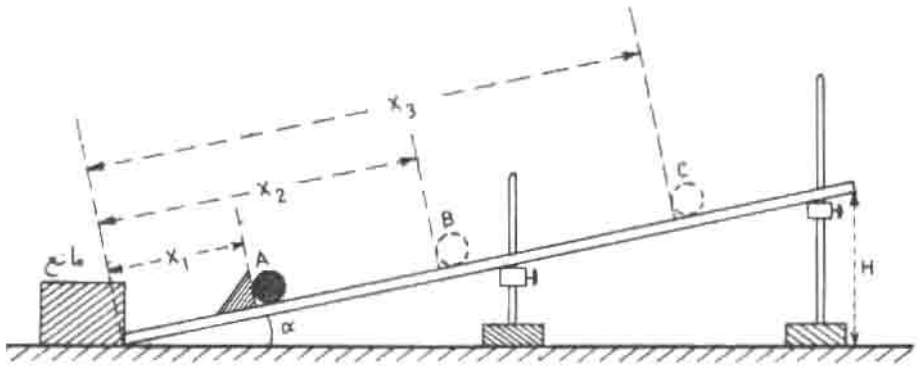
I ـ به‌کمك سطح شیب‌دار ، قانون سقوط آزاد اجسام را به‌دست آورید وسائل لازم : تخته درازی‌که در سرتاسر وسط‌آن‌شیار نسبتاً گودی تعبیه شده وسطح این شیار به‌خوبی صیقلی است .

کرونومتر یا ساعت‌کرونومتردار .

گلوله فولادی کوچك .

الف ـ یك سرتخته را روی سطح افقی میز یازمین قرار دهید ویا مانع یاگیره‌ای ازلغزیدن آن جلوگیری کنید . این مانع جلو ادامهٔ حرکت گلوله را تیز می‌گیرد . سردیگرتخته را تا ارتفاع‌مناسب «h» بالابیاورید وآن را روی‌گیره‌ای‌که به‌پایه‌ای بسته‌اید استوارکنید (شکل ۱-۱۵).

اگر طول تخته d باشد نسبت $\frac{h}{d}$ راکه برابر $\sin\alpha$ است به‌جای شیب سطح‌انتخاب‌کنید. زیرا اندازه‌گیری این‌نسبت‌آسانتراز اندازه‌گیری $tg\alpha$ است (α زاویه سطح شیب‌داربا‌سطح افقی است) .



شکل ۱-۱۵- سطح شیب‌دار برای تحقیق قانون سقوط آزاد اجسام

گلولهٔ فولادی را از نقاط مختلف سطح شیب‌دار، مانند A و B و C و ... رها کنید و زمان رسیدن آن را به پائین سطح اندازه بگیرید و نتایج را در جدولی مانند جدول ۱-۴ بیرید (آزمایش را برای هریك از مسافتها دست‌کم سه‌بار تکرار کنید و میانگین زمانهای اندازه‌گرفته شده را حساب کنید).

جدول ۱-۴

شماره آزمایش	x (مسافت پیموده شده به متر)	t (زمان حرکت به ثانیه)	$\frac{x}{t^2}$ (به $\frac{m}{s^2}$)	شتاب حرکت (به $\frac{m}{s^2}$)

توجه داشته باشید که مسیر حرکت گلوله کاملا خط راست باشد. یعنی اگر تخته بلند و سنگین است وسط آن شکم ندهد. برای کنترل این موضوع پایه وگیره دیگری در صورت لزوم وسط تخته بگذارید وشیب تخته را دروسط نیز بیازمائید. t^2 را روی محور افقی و x را روی محور عمود برآن ببرید ونمودار تغییرات $\frac{x}{t^2}$ را رسم کنید وقانون حرکت را نتیجه بگیرید.

ب ـ با تغییردادن ارتفاع h شیب سطح را ۲ و ۳ و ... برابر کنید وزمان حرکت گلوله را برای یك مسافت معین x در شیبهای مختلف اندازه بگیرید و درجدولی مانند جدول ۱-۵

$\frac{h}{d}$ نسبت	t=زمان حرکت برای مسافت معین x	شتاب $= \frac{2x}{t^2}$	$\frac{\text{شتاب}}{\text{شیب سطح}}$

ببرید ، سپس روی کاغذ میلیمتری نموداری رسم کنید که محور افقی آن نمایش شیب سطح ($\frac{h}{d}$) و محور عمودی آن نمایش شتاب حرکت باشد . با ادامه دادن نمودار ، وقتیکه نسبت $\frac{h}{d}$ به ۱ می‌رسد (یعنی زاویه سطح شیب دار با سطح افقی 90° می‌شود) وجسم سقوط آزاد می‌کند شتاب آن را بدست آورید .

II ـ درصورتی که دستگاهی مانند دستگاه شکل ۱ـ۱۳ برای مطالعهٔ سقوط آزاد اجسام درآزمایشگاه دبیرستان موجود است قانون سقوط آزاد اجسام را مستقیماً بررسی کنید .

به‌این پرسشها پاسخ دهید

۱) ـ حرکت یکنواخت برروی یك‌خط راست‌را دریك جمله کوتاه‌تعریف کنید . چه‌نمونه‌هائی ازاین‌نوع حرکت را می‌شناسید ؟

۲) ـ سرعت لحظه‌ای‌را تعریف کنید ورابطهٔ ریاضی‌آن را بنویسید . چه فرقی بین سرعت لحظه‌ای وسرعت متوسط است ؟

۳) ـ درچه نوع حرکتی سرعت لحظه‌ای و سرعت متوسط با هم برابرند ؟

۴) ـ حرکت یك اتومبیل دریك جاده چه‌نوع حرکتی است ؟ دربارهٔ آن بحث کنید .

۵) ـ چگونه می‌توانید به‌کمك یك نمودار مسافت ـ زمان که در اختیار دارید سرعت متوسط متحرك بین دولحظهٔ t_1 و t_2 را معین کنید ؟ چگونه سرعت لحظه‌ای متحرك را درلحظهٔ t_1 یا t_2 معین می‌کنید ؟ اگراین نمودار خط راست باشد آیا تفاوتی بین این دوسرعت مشاهده می‌شود ؟

۶) ـ درنظر بگیرید که سرعت‌سنج یك‌اتومبیل برای‌وقتی که اتومبیل خالی وقطرچرخهای برنده (معمولا چرخهای عقب) ۰٫۶۰ متر است درجه بندی شده است .

الف ـ اگر چرخهای این اتومبیل باچرخهائی که قطرآنها ۰/۷۰ متر است عوض شوند سرعت واقعی اتومبیل وقتی کـه عقربه سرعت‌سنج $۵۰\frac{Km}{h}$ را نشان می‌دهد چه اندازه است ؟

ب ـ اگرفشار بادلاستیکهای اتومبیل کم باشد واتومبیل با ظرفیت کامل مسافر حرکت کندسرعتی که روی‌سرعت‌سنج دراین حالت خوانده می‌شود آیا از سرعت حقیقی اتومبیل‌کمتر است یابیشتر؟ توضیح دهید .

۷) ـ آیا دو جملهٔ زیر در بارهٔ حرکت یك جسم درست است؟ در بارهٔ جواب خود توضیح دهید

۱ـ اگراندازه تندی ثابت باشد شتاب الزاماً صفر خواهد بود .

۲ـ اگرشتاب ثابت باشد حرکت الزاماً برروی خط راست خواهد بود .

۸)ـ دریك تلویزیون‌معمولی‌دسته پرتو الکترون درمـدت ۰/۰۳۰ ثانیه تصویر کاملی را که برتمام صفحه تلویزیون تشکیل می‌شود ازبالا تاپائین به‌طور افقی خط به‌خط جاروب می‌کند . اگر هرتصویر از ۵۲۵ خط تشکیل شود و عرض صفحه تلویزیون تقریباً ۰/۵۰ متر (۲۰ اینچ) باشد سرعت حرکت این دسته پرتو برروی صفحه تلویزیون چه‌اندازه است ؟

۹) ـ بایك شکل نشان دهیدکه اندازه مسافت طی شده توسط یك متحرك برابر اندازه سطح محصور بین نمودار سرعت ـ زمان ومحور تمایش زمان است .

۱۰) ـ اگر مستقیماً دو رابطه $x=v\cdot t$ و $v=a\cdot t$ را با هم ترکیب کنید رابطهٔ $x=at^2$ را به‌دست خواهیدآورد . دراین‌جا چه چیز نادرست است ؟

۱۱) ـ هر کمیتی که به‌طور یکنواخت تغییر کند مقدار متوسط‌آن برابر با نصف مجموع دومقدار اولی وآخری‌آن‌کمیت است . این‌موضوع را دربارهٔ هر کمیتی که مایلید بیازمائید: مثلا سن متوسط ۵ نفرکه سن‌آنان به‌ترتیب ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ سال است چیست ؟

۱۲) ـ مفهوم شتاب ثابت این است که در زمانهای متوالی و متساوی Δt ، اندازه‌های Δv یکی هستند . از مطالب زیرکدامشان به‌نحوی این مفهوم‌را درست بیان می‌کنند؟

الف ـ Δv متناسب با Δt است .

ب ـ مقدار ثابت $=\frac{\Delta v}{\Delta t}$ است .

پ ـ نمودار سرعت ـ زمان یك خط راست است .

ت ـ v متناسب با t است .

۱۳) ـ رابطهٔ $v^2-v_0^2=2ax$ را از ترکیب دو رابطهٔ $x=\frac{1}{2}at^2+v_0 t$ و $v=at+v_0$ مستقیماً بدست آورید .

۱۴) ـ با محاسبه نشان دهیدکه

الف ـ اگر گلوله‌ای درشم
شود تا ارتفاع $h=\frac{v_0^2}{2g}$ بالامی‌رود.

ب ـ درلحظه‌ای‌که به مبدأ پرتاب برمی‌گردد سرعت آن نیز برابر v_0 است .

۱۵) ـ اگرشتاب حرکت جسمی ثابت باشدآیا ممکن است جهت یا راستای تندی‌آن‌جسم تغییر کند ؟ مثال بزنید .

این مسأله‌ها را حل کنید

۱) ـ درمسابقه‌های ورزشی جهانی(المپیك) ۱۹۶۸ میلادی در مسابقات دو مردان ، رکوردهائی به شرح زیر به‌دست آمده است :

۱- ۱۰۰ متر در ۹/۹ ثانیه
۲- ۲۰۰ متر در ۱۹/۸ ثانیه
۳- ۴۰۰ متر در ۴۳/۸ ثانیه
۴- ۸۰۰ متر در ۱ دقیقه و ۴۴/۳ ثانیه
۵- ۱۵۰۰ متر در ۳ دقیقه و ۳۴/۹ ثانیه
۶- ۵۰۰۰ متر در ۱۴ دقیقه و ۵ ثانیه
۷- ۱۰۰۰۰ متر در ۲۹ دقیقه و ۲۷/۴ ثانیه

الف ـ سرعت متوسط هردونده را حساب کنید .

ب ـ مسافت را روی محور افقی وسرعت را روی محور عمود برآن ببرید و نمودار مسافت ـ سرعت را برای این نتایج تامسافت ۵۰۰۰ متر به‌دست‌آورید .

۲) ـ یك‌فضانورد باسفینهٔ فضائی خود در ارتفاع ۶۵۰ کیلومتری بالای سطح زمین در مدت ۱ ساعت و ۳۲ دقیقه و ۱۰ ثانیه یك دور به‌گرد زمین می‌گردد . اگرشعاع متوسط زمین ۶۳۷۰ کیلومتر باشد سرعت متوسط حرکت سفینه را حساب کنید .

جواب : تقریباً $8\frac{km}{s}$

۳) ـ سرعت پخش امواج رادیوئی درخلأ خیلی نزدیك به $3\times10^8\frac{m}{s}$ است . فاصله نزدیکترین ستاره[1] از زمین $4/06\times10^{16}$ متر است . اگر فرض کنیم که این ستاره دارای

---

۱) نام این ستاره Alpha Centauri است .

سیاراتی باشدکه برروی آنها موجودات پیشرفته‌ای زندگی کنند وآنان امواج رادیوئی به طرف زمین بفرستند چه مدت طول می‌کشد تا این امواج به‌زمین برسد .

جواب : $۱/۳۵ \times ۱۰^{۸}$ ثانیه یا تقریباً ۴/۳ سال

۴) ـ یك هواپیمای چهار موتوره ملخ‌دارکه سرعت پروازآن $۶۰۰ \frac{km}{h}$ است ازفرودگاه تهران به‌مقصد لندن پرواز می‌کند . یکساعت و چهل دقیقه بعد ، یك هواپیمای جت که‌سرعت پروازآن $۹۲۰ \frac{km}{h}$ است از همین فرودگاه به مقصد لندن پرواز می‌نماید .

الف ـ چه مدت طول می‌کشد تا دوهواپیما به‌هم برسند .

ب ـ چه‌مسافتی دوهواپیما دراین مدت پیموده‌اند .

جواب : الف : ۳ ساعت و ۷/۵ دقیقه

ب : ۲۸۷۵km

۵) ـ دو هواپیما با هم از دو باند پرواز یك فرودگاه به‌مقصد یك شهر پرواز می‌کنند . سرعت پروازیکی ازاین‌دو هواپیما $۴۵۰ \frac{km}{h}$ وسرعت پرواز دیگری $۶۷۰ \frac{km}{h}$ است هواپیمای تندرو ۴۰ دقیقه زودتر ازهواپیمای دیگر به‌مقصد می‌رسد . مطلوبست :

الف ـ فاصله دوشهر

ب ـ مدت پرواز هریك از دوهواپیما

جواب : الف ـ ۹۱۴ km

ب ـ ۲ ساعت و ۱/۸۲ دقیقه و

۱ ساعت و ۲۱/۸۲ دقیقه

۶) ـ سرعت متوسط شما درهریك ازدوحالت زیرچیست ؟

الف ـ اگر ۱۰۰ مترمسافت را باسرعت $۵/۰ \frac{m}{s}$ بدوید و ۱۰۰ متر مسافت دیگر را باسرعت $۱/۰ \frac{m}{s}$ راه بروید .

ب ـ اگر درمدت ۱۰۰ ثانیه با سرعت $۵/۰ \frac{m}{s}$ بدوید و در مدت ۱۰۰ ثانیه دیگر با سرعت $۱ \frac{m}{s}$ راه بروید.

جواب : الف ـ $\sim ۱/۷ \frac{m}{s}$

ب ـ $۳/۰ \frac{m}{s}$

۷) ـ یك اتومبیل نصف مسیری را باسرعت $۱۰۰ \frac{km}{h}$ و نصف دیگررا باسرعت $۶۰ \frac{km}{h}$

جواب : $۷۵\frac{km}{h}$

۸) ـ یک‌هواپیمای جت روی باند پرواز ازحال سکون شروع به‌حرکت می‌کند و پس از ۴۵/۰ ثانیه باسرعت $۸۰/۰\frac{m}{s}$ اززمین بلند می‌شود. اگرشتاب این‌حرکت‌ثابت باشدمطلوبست

الف ـ اندازه این شتاب

ب ـ مسافتی‌که هواپیما پیش ازپرواز ، روی زمین می‌پیماید .

پ ـ نسبت مسافتهائی‌که این هواپیما درثانیه چهل وپنجم وثانیه یکم می‌پیماید .

جواب :

الف ـ $\approx ۱/۷۸\frac{m}{s^۲}$

ب ـ $۱۸۰۰m$

پ ـ ۸۹

۹) ـ موتورسواری ازحال سکون به‌راه می‌افتد وپس ازپیمودن مسافت $۱۲۰m$ سرعتش به $۳۰/۰\frac{m}{s}$ می‌رسد. مطلوبست شتاب متوسط حرکت‌موتورسوارومدتی که‌این مسافت‌رامی‌پیماید.

۱۰) ـ یك اتومبیل سواری ازحال‌سکون به حرکت درمی‌آید ودرمدت ۱۲/۰ ثانیه با شتاب $۱/۸۰\frac{m}{s^۲}$ حرکت می‌کند تا سرعت‌آن به v برسد . سپس مدت ۸/۰ ثانیه با این‌سرعت ثابت v به‌حرکت خود ادامه می‌دهد وبعد ترمز می‌شود وپس از ۱۰/۰ ثانیه متوقف می‌گردد. مطلوبست :

الف ـ سرعت v

ب ـ شتاب حرکت اتومبیل موقعی‌که ترمز شده است (فرض کنید این شتاب ثابت بوده است) .

پ ـ کل مسافتی‌که اتومبیل پیموده است .

۱۱) ـ راننده‌ای‌که اتومبیل خودرا باسرعت $۷۲\frac{km}{h}$ درجاده‌ای می‌راند ناگهان متوجه مانعی درجلوخود می‌شود وترمز می‌کند . اگرزمان عکس‌العمل راننده ۰/۵ ثانیه باشد (زمان عکس‌العمل‌زمانی است‌که راننده پس ازمشاهده مانع پای خود را روی ترمزمی‌گذارد) وحرکت اتومبیل باشتاب $۵\frac{m}{s^۲}$ کند شود ، راننده از لحظهٔ دیدن مانع پس از پیمودن چه مسافتی اتومبیل را متوقف می‌کند ؟

جواب : $۵۰m$

۱۲) ـ دو ترن بکی باتندی $۶۰\frac{km}{h}$ و دیگری با تندی $۸۰\frac{km}{h}$ روی یك ریل مستقیم و افقی به طرف یکدیگر درحرکتند . وقتی فاصله آنها ازیکدیگر به ۲ کیلو متر می‌رسد هریك ازدورانندهٔ ترن دیگر را مقابل خود می‌بینند و هردو باهم ترمز می‌کنند . اگر در اثر ترمز حرکت هریك ازترنها باشتاب ثابت $۱\frac{m}{s^۲}$ کند شود معین کنید آیا دو ترن بههم برخورد می‌کنند یا نه ؟

۱۳) ـ اتومبیلی که درسریك چهارراه پشت چراغ قرمزمتوقف است پس‌ازسبزشدن چراغ با شتاب $۴/۰\frac{m}{s^۲}$ به راه می‌افتد . درهمین لحظه کامیونی با سرعت $۳۶\frac{km}{h}$ ازاین اتومبیل‌سبقت می‌گیرد و از چهار راه مـی‌گذرد . اگر کامیون با این سرعت ثابت بـه حرکت خود ادامه دهد معین کنید :

الف ـ پس ازگذشت چه‌زمانی اتومبیل دوباره به‌کامیون می‌رسد ؟

ب ـ سرعت اتومبیل درلحظهٔ رسیدن به‌کامیون چه‌اندازه است ؟

جواب : الف ـ $۵s$

ب ـ $۲۰\frac{m}{s}$

۱۴) ـ لکوموتیوی ازحال سکون باشتاب ثابت $۱/۰\frac{m}{s^۲}$ شروع به حـرکت مـی‌کند . ۱۰/۰ ثانیه بعداتومبیلی ازهمان مکان باشتاب ثابت $۲/۰\frac{m}{s^۲}$ درجاده‌ای موازی با مسیرحرکت لکوموتیو ازحال سکون نیز به راه می‌افتد . معین‌کنید :

الف ـ زمانی راکه لازم است تا اتومبیل به‌لکوموتیو برسد .

ب ـ مسافتی راکه هردو وسیله پیموده‌اند .

پ ـ سرعتهای اتومبیل ولکوموتیو را درلحظه‌ای‌که به‌هم می‌رسند .

جواب : الف ـ $\approx ۲۴/۱s$

ب ـ $\approx ۵۸۱m$

پ ـ $۴۸/۲\frac{m}{s}$ و $۳۴/۱\frac{m}{s}$

۱۵) ـ اتومبیلی که ساکن است به راه مـی‌افتد و در ۵/۰ ثانیه اول بـا شتاب ثابت $۳/۶۰\frac{m}{s^۲}$ و در ۴/۰ ثانیه بعد باشتاب $۲/۵\frac{m}{s^۲}$ و در ۵/۰ ثانیه دیگرباشتاب $۱/۶\frac{m}{s^۲}$حرکت می‌کند مطلوبست :

الف ـ بیشترین سرعت اتومبیل دراین حرکت .

ب ـ مسافت کل پیموده شده .

پ ـ رسم نمودار سرعت ـ زمان این حرکت .

جواب : الف ـ $۳۶/۰ \frac{m}{s}$

ب ـ $۲۹۷/۰m$

۱۶) ـ از دست یك کارگرساختمان که روی چوب بستی کارمی‌کند چکشی بدون سرعت اولیه رها می‌شود وپس از ۳/۶۰ ثانیه به‌سطح زمین می‌رسد . اثرمقاومت هوا برحرکت چکش ناچیز است :

الف ـ کارگر درچه ارتفاعی از سطح‌زمین است .

ب ـ چکش با چه سرعتی به‌سطح زمین برخورد می‌کند .

جواب : الف ـ $۶۳/۵m$

ب ـ $۳۵/۳ \frac{m}{s}$

۱۷) ـ گلوله‌ای درشرایط خلأ در راستای قائم به‌طرف بالاپرتاب شده و پس‌از ۴ ثانیه به مبدأ پرتاب اولیه برگشته است . تاچه ارتفاعی این گلوله بالا رفته وبا چه سرعتی پرتاب شده است ؟

جواب : $۱۹/۶m$ و $۱۹/۶ \frac{m}{s}$

۱۸) ـ سنگی در شرایط خلأ ازیك بلندی بدون سرعت اولیه رها می‌شود و با سرعت v پس‌از زمان $t=\frac{v}{g}$ به سطح زمین می‌رسد . زمانی‌که لازم است تا سنگ به نیمه مسیر خود برسد برابر است با :

۱ـ $\frac{v}{۴g}$ ۲ـ $\frac{v}{۲g}$ ۳ـ $\frac{v\sqrt{۲}}{g}$ ۴ـ $\frac{v\sqrt{۲}}{۲g}$

با محاسبه جواب درست را به دست‌آورید .

۱۹) ـ ازیك نقطه‌که تاسطح زمین $۱۰/۰m$ فاصله دارد گلوله‌کوچك وسنگینی درراستای قائم به‌طرف بالا پرتاب می‌شود . این گلوله به‌هنگام برگشت ، فاصله بین نقطه پرتاب وزمین را درمدت ۱/۰ ثانیه می‌پیماید مطلوبست :

الف ـ سرعت پرتاب اولیه .

ب ـ سرعت گلوله در لحظهٔ برخورد به زمین .

جواب : الف ـ $۵/۱ \frac{m}{s}$ ب ـ $۱۲/۹ \frac{m}{s}$

۱ـ۱) عملاً هیچ ، جزایی که بخواهیم ادعا کنیم که حرکتی را مطالعه کرده‌ایم .

۱ـ۲) متر بر ثانیه (واحد دستگاه بین‌المللی) ، سانتیمتر بر ثانیه (برای سرعتهای کم) کیلومتر بر ساعت (برای وسائط نقلیه) ، میل[1] بر ساعت یا «گره» (برای هواپیمائی و کشتیرانی) .

برای هواپیماهای خیلی سریع که با سرعت صوت یا بیشتر از آن پرواز می‌کنند واحدی به‌نام «ماخ[2]» به‌کار برده می‌شود . بنابه‌قرارداد $1\,\text{Mach} = 340\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$

۱ـ۳) نه ، مسیر حرکت و وضع متحرک در هر لحظه ، با تعیین موقعیت متحرک نسبت به‌مبدأ (یا نسبت به‌راستاهای معین) و همچنین با تعیین تندی لحظه‌ای آن معین می‌شود .

۱ـ۴) با توجه به جدول ۱ـ۱ داریم :

Δt (s)	Δx (m)	$\frac{\Delta x}{\Delta t}\ (\frac{\text{m}}{\text{s}})$
۴ـ۰ـ۴	۰/۳۱۴ـ۰ـ۰/۳۱۴	$\frac{۰/۳۱۴}{۴}$ـ۰/۰۷۸۵
۸ـ۴ـ۴	۰/۶۲۸ـ۰/۳۱۴ـ۰/۳۱۴	۰/۰۷۸۵
۱۲ـ۸ـ۴	۰/۹۴۲ـ۰/۶۲۸ـ۰/۳۱۴	۰/۰۷۸۵
۱۶ـ۱۲ـ۴	۱/۲۵۶ـ۰/۹۴۲ـ۰/۳۱۴	۰/۰۷۸۵
۲۰ـ۱۶ـ۴	۱/۵۷۰ـ۱/۲۵۶ـ۰/۳۱۴	۰/۰۷۸۵

۱ـ۵) اندازه‌گیری منظم ، تنظیم نتایج حاصل از اندازه‌گیری به‌صورت یک جدول ، رسم نمودار و نتیجه‌گیری .

۱ـ۶) از رابطهٔ $t = \frac{x}{v}$

۱ـ میل ، فاصله متوسط دو نقطه از سطح زمین است که طول جغرافیایی آن دو متساوی و اختلاف عرض جغرافیائی آنها برابر یک دقیقه است

میل برحسب قرارداد ۱۸۵۲ متر است . نگارنده این واحد فقط در دریانوردی و هواپیمائی مجاز است

۲ـ Mach

۱-۷) کمیتهای برداری یعنی کمیتهائی کـه علاوه برمقدار ، دارای راستا و جهت نیز هستند مانند تندی ، شتاب ، نیرو .

کمیتهای اسکالر راستا وجهت ندارند مانند جرم ، زمان ، دما .

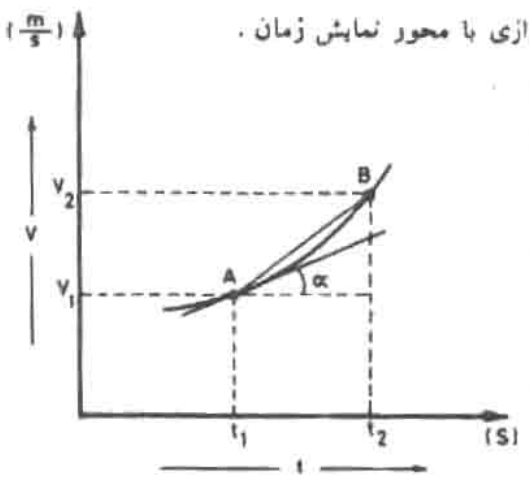
۱-۸) ۴ه ، خارج قسمت دوبینهایت کوچك لازم نیست بینهایت کوچك باشد . مثلا یك فوتون نور در زمان بینهایت‌کوچك $۱۰^{-۲۵}$ ثانیه مسافت بینهایت‌کوچکی درحدود ۳×۱۰^{-۱۷} متر را می‌پیماید ، ولی خارج قسمت این دوبینهایت کوچك یعنی $\frac{۳\times۱۰^{-۱۷}\mathrm{m}}{۱۰^{-۲۵}\mathrm{s}}$ عدد بزرگ $۳\times۱۰^{۸}\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ است .

۱-۹) برای این‌که حرکت جسمی شتابدار شود ، چنان‌که می‌دانید ، باید برآن نیروئی اثرکند (قانون دوم نیوتن) . بنابراین به‌هرطریقی‌که بتوانیم برجسمی نیرو واردکنیم واین نیرو سبب حرکت جسم شود تا مدتی‌که نیرو برآن‌جسم اثر می‌کند حرکت جسم‌شتابدارخواهد بود.

$$a_{۲,۶}=\frac{(۱۸-۵)\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{(۶-۲)\mathrm{s}}=\frac{۱۳}{۴}=۳/۲۵\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^{۲}} \qquad (۱۰-۱)$$

۱-۱۱) به‌صورت یك خط راست موازی با محور نمایش زمان .

۱-۱۲) اگرشتاب متحرکی‌ثابت‌نباشد نمودارتندی‌ـزمان‌حرکت‌این‌متحرك‌خطراست نخواهد بود در این صورت انـدازه شتاب لحظه‌ای متحرك در هـرلحظه طبق شکل ۱ـ ۱۷ برابر شیب خط مماس برنمودار درآن لحظه است .



شکل (۱-۱۷) نمودار سرعت ـ زمان

۱-۱۳) از لحاظ مقدار نه ، زیـرا اندازه هردو شتاب یکی است .

۱-۱۴) به‌صورت زیر :

$$v=at$$

$$x=\frac{v}{۲}t$$

$$x=\frac{۱}{۲}at^{۲}$$

$$v^{۲}=۲ax$$

شکل ۱-۱۷

۱-۱۶) ـ اشکال اندازه‌گیری زمان ، زیرا وسیله اندازه‌گیری زمان درعصر گالیله ساعت آبی بود که بوسیله آن اندازه‌گیری زمانهای کوتاه امکان نداشت .

۱-۱۷) بلی ، مثلا شکل ۱-۱۷ سقوط یك گلوله‌را نشان می‌دهدکه باعکاسی استروبوسکپی گرفته شده است . زمان بین دو وضع متوالی گلوله معلوم است مسافتهای پیموده شده نیز از روی خط‌کش مدرجی که در عکس دیده می‌شود معین می‌گردد .

۱-۱۸) این نمودار بصورت یك سهمی است‌که به‌آسانی می‌توانید آن را روی کاغذ میلیمتری رسم‌کنید .

۱-۱۹) رابطهٔ $v=gt$ مشتق معادله $h=\frac{1}{2}gt^2$ است و فرمول $v=\sqrt{2gh}$ از حذف t بین دو رابطه دیگر به دست می‌آید .

۱-۲۰) بلی ، مثلا اگرجسمی باتندی اولیه v_0 در راستای قائم روبه‌بالا پرتاب شود و اندازه تندی آن در نقطه‌ای به فاصله y از مبدأ پرتاب v باشد در شرایط خلأ داریم:

$$v_0^2 - v^2 = 2gy$$

و یا $v=\sqrt{v_0^2 - 2gy}$. این جسم تا ارتفاع h بالا می‌رود و دربرگشت ، موقعی‌که به همین نقطه می‌رسد نسبت به نقطه اوج به اندازه مسافت $h-y$ پائین آمده است بنابراین دارای تندی v' است که اندازه آن از رابطهٔ زیر حساب می‌شود :

$$v'^2 - 0 = 2g(h-y)$$

و یا $$v'^2 = 2gh - 2gy$$

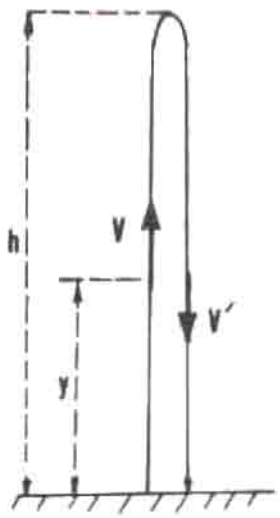
چون $2gh = v_0^2$ است

پس $v'^2 = v_0^2 - 2gy$

و با

$$v' = \sqrt{v_0^2 - 2gy} = v$$

اندازه این سرعتها باهم برابر ولی‌جهت آنها مخالف یکدیگر است (شکل ۱-۱۸).



شکل ۱-۱۸

۲

دینامیك ذره

قانونهای نیوتن در باره حرکت

دربخش پیش حرکت اجسام را از دیدگاه «سینماتیك» بررسی کردیم ، یعنی بدون این که علت حرکت را بیان کنیم ، کمیتهائی چون مسافت وزمان و سرعت و شتاب را تعریف کردیم وروابط میان این کمیتها را مورد بحث قراردادیم . دراین بخش می‌خواهیم علت به‌حرکت درآمدن اجسام‌را بررسی کنیم وبرای این منظور باید مفاهیم جرم و نیرو را در معادلات حرکت وارد کنیم . دراین‌صورت حرکت را از دیدگاه « دینامیك » بررسی خواهیم کرد . نیوتن ، چنانکه می‌دانید ، نخستین دانشمندی بودکه به‌طور اصولی مفاهیم جرم و نیرو را در حرکت واردکرد و سه‌قانون اساسی دینامیك راکه به‌نام خود او «قوانین نیوتن در حرکت» نامیده می‌شوند وضع نمود .

شما در فیزیك سال اول با این قوانین به‌خوبی آشناشده‌اید . دراین‌جا به‌طور کاملتری بحث را دنبال خواهیدکرد .

قانونهای نیوتن دربارهٔ حرکت - دربخش ۱ ضمن مطالعه حرکت ساده اجسام متوجه شدیم که یك جسم می‌تواند یا درحال‌سکون باشد ، یا باسرعت ثابت برروی خط راست حرکت کند و یا دارای حرکت شتابدار باشد . سکون وحرکت یکنواخت وحرکت شتابدار پدیده‌هائی هستندکه باید علت آنها توضیح داده شود یعنی باید بتوان به پرسشهائی مانند پرسشهای زیر پاسخ داد :

چرا وقتی ظرفی مثلا روی یك میز گذاشته شده است ساکن می‌ماند ؟

چرا وقتی که‌یك‌قطعه‌یخ خشك (بی‌اکسیدکربن جامد) روی سطح افقی صیقلی ضربه‌کوتاهی می‌بیند مدت درازی به‌طور یکنواخت در امتداد خط‌راست حرکت می‌کند ؟ چرا هنگامی‌که جسمی سقوط آزاد می‌کند تندی آن مرتباً افزایش می‌یابد ؟ ومانند اینها ...

پاسخ این‌گونه پرسشهای مربوط به‌حرکت‌را به‌طورمستقیم یا غیرمستقیم می‌توان درسه قانون کلی حرکت که نیوتن‌آنها را درکتاب اصول خود بیان‌کرده است جستجوکرد .

قانون اول نیوتن

هرجسمی حالت سکون یاحرکت مستقیم‌الخط یکنواخت خود را ادامه می‌دهد مگر آنکه نیروئی (یا نیروهائی) ازخارج برآن اثرکند[1]

تمایل اجسام بهماندن درحالت سکون یا در حال حرکت یکنواخت ، چنان‌که می‌دانید ، «ماند» یا «اینرسی» نامیده می‌شود ، وبههمین جهت قانون اول نیوتن را « قانون ماند » یا «قانون اینرسی» نیز می‌گویند .

ماند یـا اینرسی خاصیت همهٔ اجسام است. یعنی اجسام مادی دارای این خاصیت هستند که در برابر هرتغییری که دروضع و تندی آنهـا حاصل شود مقاومت می‌کنند: آنهاکه ساکنند می‌خواهند درحال سکون باقی بمانند و آنها که در حرکتند می‌خواهند بدون تغییر تندی (ازلحاظ جهت ومقدار) برحرکت خود برخط راست ادامه دهند ، مگراین که نیروی (یا نیروهای) خارجی ، آنهـا را مجبور بـه‌تغییر تندی نماید .

پرسش ۲-۱- چراتوصیه می‌شودکه سرنشینان اتومبیل هنگام حرکت درجاده‌هاکمربندنجات که در اتومبیل نصب است ببندند ؟

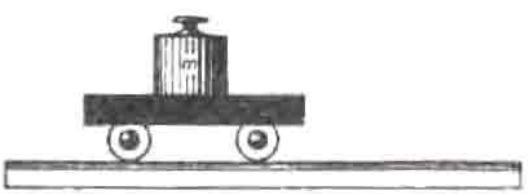
پرسش ۲-۲ - چرا درجاده‌ای‌کـه سطح آن یخ‌بندان است اتومبیل نمی‌تواند ازپیچ جاده تبعیت کند و درامتداد خط راست ازجاده خارج می‌شود ؟

هرچه اینرسی جسمی بـزرگتر باشد مقاومت آن در برابر تغییر وضعیت و تندی بیشتر و بنابراین نیروی لازم برای تغییردادن وضع حرکت یاسکون آن بزرگتر است. بههمین‌علت است‌که براه‌انداختن یك ترن یا یك‌کشتی ازحال‌سکون و رساندن سرعت آن به حد لازم دشوار است و نیروی زیادی بایـد اعمال شود .

پرسش ۲-۳ - اگراصطکاك نباشد آیا برای ثابت نگاهداشتن تندی جسم متحرك نیروئی لازم است ؟

درکتاب فیزیك سال اول برای مجسم کردن قانون ماند با آزمایشهای ساده‌ای آشنا شده‌اید‌کـه مراجعه به‌آنها توصیه می‌شود . دراین‌جا نیز برای نشان دادن خاصیت ماند آزمایشهای دیگری بیان می‌شودکه خود به‌آسانی می‌توانید آنها را انجام دهید .

شکل ۲-۱ - چهارچرخـه‌کـوچکی رانشان می‌دهدکه روی یك‌صفحه صیقلی (مثلا ورقه‌متوائی صاف یا ورقه فلزی صیقلی) برسطح میزی قراردارد وبرای این‌که اینرسی آن زیـاد شود وزنه‌ای روی آن قرار داده شده است[2]. هرگاه صفحه را از زیر چهارچرخه بهسرعت به‌طرف راست یـا چپ بکشیم



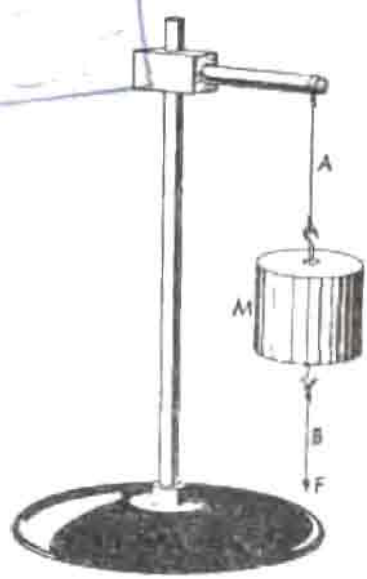
شکل ۲-۱- اگرصفحهٔ صافی زیرچهارچرخه را بسرعت از زیر آن بکشیم چهارچرخه درجای خود ساکن می‌ماند.

۱- بیان این قانون بهصورتی‌که دراینجا آمده ترجمه همانست‌که نیوتن درکتاب اصول‌خود بیان کرده است .

۲- برای‌انجام این‌آزمایش می‌توانید ازیك‌اتومبیل کوچك ازنوع اسباب‌بازی استفاده‌کنید.

چرخها به‌علت اصطکاك کمی که با صفحه دارند می‌چرخند ولی چهارچرخه در جای خود ساکن می‌ماند .

شکل ۲-۲- وزنه یك‌کیلوگرمی M را نشان می‌دهد که توسط پاره‌نخ A به‌پایه‌ای آویزان است و ازپائین توسط پاره‌نخ دیگر B ازهمان جنس نخ A کشیده می‌شود اگر نیروی کشش F راکم‌کم وبتدریج زیاد کنیم نخ A پاره می‌شود ، زیرا نیروی کشش وارد برنخ A مجموع نیروی F و سنگینی وزنه M است ولی اگر نیروی F را ناگهانی به صورت یك ضربه سریع واردکنیم‌نخ B زودتر پاره می‌شودزیرا اثر نیروی F دریك لحظه کوتاه برنخ B خیلی زیاد است و پیش از آن‌که جرم M به‌سبب اینرسی خود فرصت انتقال ضربه را به‌نخ A داشته باشد نخ B پاره می‌شود .

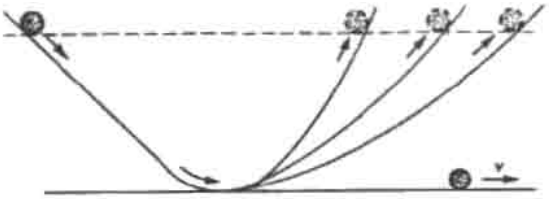


شکل ۲-۳- اگر نیروی کشش F به‌آرامی افزایش یابد نخ در A پاره می‌شود ولی اگر نیروی کشش F به‌سرعت و ناگهانی وارد شود نخ در B پاره می‌شود .

اینرسی‌وحرکت - آزمایشهای بالا فقط نخستین قسمت قانون اول نیوتن یعنی حالت سکون اجسام را نشان می‌دهد - برای مطالعه تجربی قسمت دوم این‌قانون باید عملا اثر هرگونه نیروی خارجی بر حرکت جسم را ازبین ببریم .

قسمت دوم قانون اول نیوتن را باید دیگر یادآور می‌شویم : اگرجسمی دارای حرکت‌یکنواخت باشد به‌حرکت یکنواخت خود در امتداد خط راست ادامه خواهد داد مگر این‌که تحت اثر نیروی یا (نیروهای) خارجی قرارگیرد . مفهوم این‌قانون‌این است‌که وقتی جسمی باتندی ثابت برروی خط راست حرکت می‌کند مانندحالت سکون درحال تعادل‌است یعنی برآیند نیروهای وارد برآن صفراست .

گالیله پیش ازنیوتن متوجه این موضوع‌شده بود ، وی به‌هنگام مطالعه سقوط آزاد اجسام دراثر نیروی جاذبه ، پیشگوئی کرد که گلوله‌ای‌که روی یك سطح شیب‌دار صیقلی از ارتفاع معینی بدون سرعت اولیه رها می‌شود اگر پس‌از رسیدن به‌پائین سطح برروی سطح‌شیب‌دار صیقلی‌دیگری بالابرود، شیب این سطح هرچه‌باشد ، تقریباً به‌همان ارتفاعی که ازآنجا سرازیر شده است خواهد رسید . هرچه شیب سطح دوم‌کمتر باشد گلوله مسافت بیشتری برروی آن خواهد پیمود (شکل ۲-۳) . چنانچه گلوله پس‌از رسیدن به‌پائین سطح شیب دار اولی ، روی سطح افقی (که شیب‌آن صفراست) قرارگیرد دیگرنمی‌تواند تا ارتفاع اولیه خود بالا برود ، در نتیجه ، برروی چنین سطحی اگر اصطکاك نباشد ، بدون تغییر تندی درامتداد خط راست به‌حرکت‌خود تا ابد ادامه می‌دهد . ولی درعمل به‌علت وجود اصطکاك ، گلوله پس از پیمودن مسافت محدودی

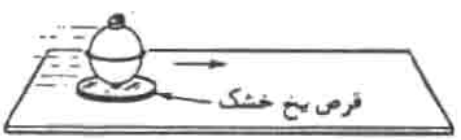


شکل ۲-۳- نمایش آزمایش اینرسی

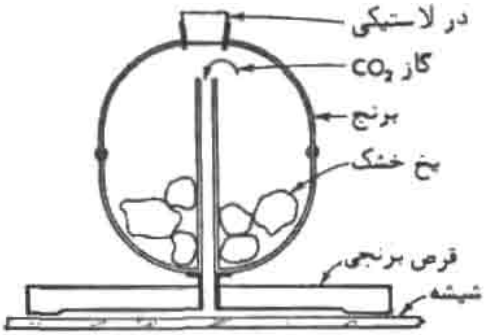
متوقف می‌شود .

پرسش ۲-۴ - آیا وزن یك جسم درحرکت آن جسم برروی سطح افقی نقشی دارد ؟

یکی ازوسائل آزمایشگاهی جالب برای نشان دادن خاصیت اینرسی « قرص یخ خشك » است[1] (شکل۲-۴) . دراین اسباب نیروی اصطکاك بسیار کم است زیرا قرص فلزی که برروی صفحه شیشه‌ای افقی می‌لغزد عملا برلایه‌ای ازگاز CO_2 حاصل از یخ خشك قرار می‌گیرد واصطکاك جامد با جامد ازبین می‌رود . هرگاه به‌این قرص ضربه ملایمی



شکل ۲-۵- نشان دادن خاصیت اینرسی در جسمی که با کندی ثابت حرکت می‌کند .



شکل۲-۶- طرحی ازمقطع قائم «قرص‌یخ‌خشك»

وارد شود تا مدت زیادی روی سطح افقی صیقلی حرکت خواهدکرد . بدیهی است خاصیتی که جسم را درحال این حرکت نگاه می‌دارد اینرسی آن‌است.

باید در نظر داشت که ازبین بردن نیروی اصطکاك به‌طور کامل عملی نیست . گرچه دراین آزمایش اصطکاك جامد باجامد از بین می‌رود ولی اصطکاك ملکولهای گاز وجود دارد . می‌توان تصورکردکه اگر اصطکاك به‌طور کامل حذف شود چیزی مانع ادامه حرکت جسم نخواهد بود .

اینرسی وجرم - گفتیم که اینرسی یك‌جسم‌یعنی مقاومتی که جسم درمقابل تغییر تندی از خود نشان می‌دهد . اندازه این‌مقاومت یا به‌عبارت دیگر اندازه

۱- شکل ۲-۵ طرحی ازمقطع قائم این اسباب را نشان می‌دهد ، یك بالون فلزی از جنس برنج یا مس به قطر تقریباً ۱۰ سانتیمترکه جدار نازکی دارد روی قرص فلزی مسطحی‌بضخامت تقریباً ۲ سانتیمتر وبه قطرتقریباً 15 سانتیمتر لحیم شده است. شبیه این بالونهای فلزی به‌عنوان‌شناور دربعضی وسائل (مانندکولر آبی) بکارمی‌رود ومی‌توان آنرا از ابزارفروشان خریداری‌کرد و اسباب را ساخت سطح زیرین قرص درحدود چند دهم میلیمتر کود است . در وسط این قرص‌سوراخی تقریباً به قطر ۰/۵ سانتیمتر تعبیه شده است . یك لوله کوتاه فلزی نیز از این سوراخ گذشته و در وسط ظرف نصب‌است تامانع بسته شدن سوراخ توسط قطعه‌های یخ خشك شود ، دربالای بالون سوراخ بزرگتری است که ازآن یخ خشك‌را وارد ظرف می‌کند واین سوراخ با یك چوب‌پنبه به‌خوبی بسته می‌شود .

اینوسی «جرم» نامیده می‌شود. واحد هردو کمیت جرم واینرسی در دستگاه بین‌المللی واحدها (SI) کیلوگرم است [1].

جرم کلمهٔ آشنائی است که اغلب مترادف وزن است. گرچه وزن وجرم با هم بستگی دارند ولی دوچیز کاملا متفاوتند. وزن نیرواست یعنی نیروئی که درمیدان جاذبه برجسم وارد می‌شود، درصورتی که جرم اندازه مقاومتی است که جسم درمقابل شتاب گرفتن ازخود نشان می‌دهد. راجع به‌رابطهٔ جرم و وزن در صفحه‌های بعد گفتگو خواهیم کرد.

قانون دوم نیوتن

قانون دوم نیوتن آن‌طور که خود او بیان کرده چنین است:

هرگاه جسمی تحت تأثیر نیروی ثابتی [2] واقع شود وشتاب بگیرد این شتاب با نیرو نسبت مستقیم و با جرم جسم نسبت معکوس دارد.

یعنی $$a \propto \frac{F}{m}$$

رابطهٔ بالا به‌صورت یك تناسب است. اگر برای سه کمیت نیرو وجرم وشتاب واحدهای مناسبی اختیارشود قانون بالا در معادلهٔ زیر خلاصه می‌شود

$$a = \frac{F}{m}$$

و یا

$$F = m\,a \qquad (۲-۱)$$

شتاب × جرم = نیرو

این رابطه یکی از روابط مهم واساسی مکانیك است که جوابگوی بسیاری از مسائل است. در دستگاه بین‌المللی واحدها، چنان که می‌دانید، شتاب برحسب متر برمجذور ثانیه $(\frac{m}{s^2})$ وجرم برحسب کیلوگرم (kg) و نیرو برحسب نیوتن (N) است. بنابراین

$$F_{(N)} = m_{(kg)} \cdot a_{(\frac{m}{s^2})}$$

ازاین رابطه «نیوتن» واحد نیرو تعریف شود:

$$1N = 1kg \times 1\frac{m}{s^2}$$

یعنی یك نیوتن نیروئی است که به‌جرم یك کیلوگرم شتاب یك متر برمجذور ثانیه بدهد.

پرسش ۲-۵ ـ چه‌نیروئی لازم است تا به‌جرم یك گرم شتاب یك سانتیمتر برمجذور ثانیه بدهد؟

پرسش ۲-۶ ـ اگر دیمانسیون جرم را به M نمایش دهیم دیمانسیون نیرو چیست؟

رابطه ۲-۱ نشان می‌دهد که شتاب همواره درجهت نیرواست [3] زیرا شتاب و نیرو هردو کمیتهای برداری هستند ولی جرم یك کمیت اسکالر است.

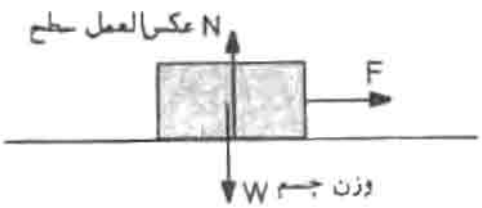
مثال ـ چه‌نیروی ثابت وافقی لازم است تا به جسمی به‌جرم $0.50\,kg$ برروی یك سطح افقی بدون اصطکاك شتاب $0.50\,\frac{m}{s^2}$ بدهد؟

ـ دراین مثال وزن جسم در حرکت آن مؤثر نیست زیرا راستای آن بر سطح افقی عمود است و با نیروی عکس‌العمل سطح که آن‌هم بر این سطح عمود است خنثی می‌شود.

۱ـ برای به‌یادآوردن تعریف کیلوگرم به جدول واحدهای اصلی SI آخر کتاب مراجعه کنید.

۲ـ نیروکمیت برداری است وهنگامی ثابت است که اندازه وجهت آن هردو ثابت باشند.

۳ـ بازهم یادآور می‌شویم که دربیان قانونهای نیوتن جسم موردنظر درحکم ذره است وحرکت دورانی ندارد.



شکل۲-۶- نیروئی که بجسم شتاب می‌دهد فقط F است

به‌ازاء $m = ۵۰/۰ kg$ و $a = ۵/۰ \frac{m}{s^۲}$ داریم

$$F = ma = ۵۰/۰ kg \times ۵/۰ \frac{m}{s^۲} = ۲۵۰ N$$

بدیهی است اگر بیک نقطه از جسم متحرکی چند نیرو باهم اثرکند شتاب حرکت جسم متناسب با برایند این نیروها وهم‌جهت باآن خواهد بود .

وزن و جرم ـ وقتی‌که جسمی به‌جرم m درمجاورت سطح زمین به‌طور آزاد سقوط می‌کند تنها نیروی مؤثر برآن نیروی جاذبهٔ زمین است . راستای‌این نیرو قائم وجهتش روبه‌پائین است ومی‌دانیم‌که این نیرو وزن جسم نامیده می‌شود . شتاب افتادن‌جسم، که‌آن را به g نمایش داده‌ایم ، دراثرهمین نیرواست جهت این‌شتاب نیز به‌طرف پائین است .

اگربخواهیم قانون دوم نیوتن را برای این حرکت بکار بریم باید در رابطه $F = ma$ به جای نیروی F ، وزن جسم (کـه آن را به w نمـایش می‌دهیم) و به‌جای a ، شتاب جاذبه (یعنی g) را قراردهیم . بنابراین رابطه $F = ma$ برای‌اجسامی که در اثر وزن خود باشتاب g به‌طور آزاد سقوط می‌کنند به‌این صورت نوشته می‌شود :

$$w = m \cdot g \qquad (۲-۲)$$

شتاب‌جاذبه × جرم = وزن

توجه به این نکته مهم است که : وزن یك جسم برابر mg ، یعنی حاصل‌ضرب جرم آن جسم در شتاب جاذبه است چه جسم درحال سقوط آزاد باشد وچه بدون حرکت درجائی قرارگرفته باشد .

وزن مانندنیرو کمیت برداری‌است زیرا علاوه برمقدار دارای جهت نیز هست و با واحـد نیوتن سنجیده می‌شود. چون شتاب g درنقاط مختلف‌سطح کره زمین تغییرمی‌کند وزن جسم‌هم درنقاط مختلف زمین مقدارثابتی نیست .

پرسش ۲-۷ ـ فرض کنید یك سفینه فضائی سرنشین‌دار درفضا از زمین و اجرام آسمانـی دیگر آن‌قدر دور است‌که هیچ میدان جاذبه‌ای برآن اثر نمی‌کند ودربی‌وزنی مطلق است سرنشینان این‌سفینه چگونه می‌توانند نشان دهندکـه اجسام درون آن درحالت سکون هم جرم خودرا دارا می‌باشند ؟

بنابررابطهٔ $w = mg$ می‌توان گفت‌که g در واقع وزن واحد جرم است . دراین صورت وزن یك جسم برابراست باحاصل‌ضرب‌جرم جسم دروزن واحد جرم . براساس این تعریف g برحسب نیوتن برکیلوگرم $\left(\frac{N}{kg}\right)$ بیان می‌شود . اگر g را برابر $۹/۸۰ \frac{N}{kg}$ بگیریم وزن یك‌وزنه به‌جرم‌یك‌کیلوگرم برابر ۹/۸۰ نیوتن است وچنانکه می‌دانید این‌نیرو را «یك‌کیلوگرم‌نیرو[۱]» می‌نامند .

۱ـ تعریف استاندارد کیلوگرم نیرو چنین است ، $1 kgf = ۹/۸۰۶۶۵ N$

اندازه حرکت وقانون دوم نیوتن ـ می‌دانید که حاصل‌ضرب جرم یك جسم در تندی آن را اندازه حرکت [1] جسم گویند یعنی :

تندی × جرم = اندازه حرکت	(۳-۲)
$P = m \cdot v$	

اندازه حرکت P یك کمیت برداری است که با تندی v هم‌جهت [2] و دیمانسیون آن MLT^{-1} است وباواحد کیلوگرم متر بر ثانیه $\left(kg\frac{m}{s}\right)$ سنجیده می‌شود .

باتوجه به‌تعریف اندازه حرکت می‌توان گفت که تمام اجسام متحرك دارای اندازه حرکت هستند. اندازه حرکت یك جسم کوچك که باتندی زیادحرکت می‌کند ممکن است برابر اندازه حرکت یك جسم بزرگ که با تندی کم حرکت می‌نماید باشد. مثلا اندازه‌حرکت‌یك گلوله‌یك‌کیلوگرمی که‌باتندی $۶۰\frac{m}{s}$ حرکت می‌کند برابر اندازه‌حرکت یك انسان به‌جرم ۶۰ کیلوگرم است‌که باتندی $۱\frac{m}{s}$ راه می‌رود .

پرسش ۲-۸ ـ اندازه حرکت یك گلوله‌تفنگ به‌جرم ۱۲ گرم‌که باتندی $۴۰۰\frac{m}{s}$ پرتاب می‌شود چه اندازه است ؟

با استفاده از مفهوم اندازه حرکت ، چنانکه می‌دانید، می‌توان قانون‌دوم نیوتن را به‌طرزبهتری به‌صورت زیر بیان کرد :

تغییر اندازه حرکت در واحدزمان برابر است با نیروئی‌که برجسم وارد می‌شود و درجهتی‌است که نیرو برجسم اثر می‌کند . یعنی :

$$\text{نیرو} = \frac{\text{تغییر اندازه حرکت}}{\text{زمان تغییر}}$$

و یا

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} \qquad (۴-۲)$$

اگرجرم‌جسم‌را ثابت بگیریم رابطهٔ بالارا به صورت زیر می‌توانیم بنویسیم :

$$F = m\frac{\Delta v}{\Delta t} \qquad (۵-۲)$$

چنانچه‌نیروی F درمدتی‌که برجسم‌اثرمی‌کند ازلحاظ جهت ومقدارثابت باشد $\frac{\Delta v}{\Delta t} = a$ که‌شتاب حرکت است ثابت می‌ماند و چون $a = \frac{v - v_0}{t}$ است بنابراین

$$F = m\frac{v - v_0}{t} \qquad (۶-۲)$$

مثال ـ اتومبیلی به‌جرم ۱۲۰۰/۰kg باسرعت $۴۵/۰\frac{km}{h}$ درجاده مستقیم وافقی درحرکت‌است . چه نیروی ثابتی لازم است تا درمدت ۸/۰ ثانیه سرعت آن را به $۹۰/۰\frac{km}{h}$ برساند ؟

ـ داریم

$$m = ۱۲۰۰kg \text{ و } v_0 = \frac{۴۵ \times ۱۰۰۰}{۳۶۰۰} = ۱۲/۵\frac{m}{s}$$

و

$$t = ۸/۰s \text{ و } v = \frac{۹۰/۰ \times ۱۰۰۰}{۳۶۰۰} = ۲۵/۰\frac{m}{s}$$

۱ـ اصطلاح اندازه حرکت از زمان نیوتن بکار رفته است و امروز اصطلاح Momentum به‌جای آن به‌کار می‌رود .

۲ـ می‌توان گفت که اندازه حرکت P برداری است که بزرگی آن m برابر بزرگی بردار V است .

بنابراین

$$F = m\frac{v - v_0}{t}$$

$$= 12000/0\,kg\frac{25/0\frac{m}{s} - 12/5\frac{m}{s}}{8/0\,s}$$

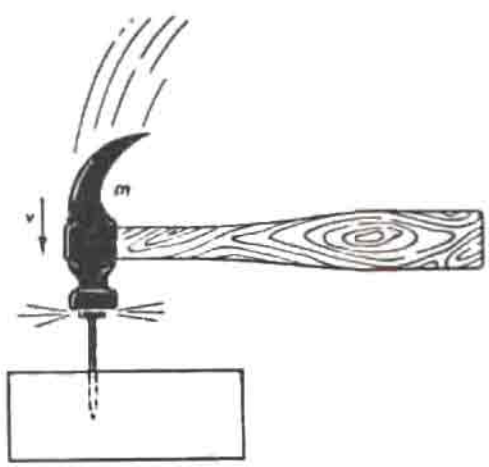
$$= \frac{15000\,kg\frac{m}{s^2}}{8/0} = 1875N$$

ضربه

اگر دوطرف رابطهٔ $F = m\frac{v - v_0}{t}$ را در زمان t ضرب کنیم رابطهٔ جدیدی بین کمیتهای نیرو و جرم و تندی و زمان به‌دست می‌آید که مفهوم دیگری دارد:

$$F \cdot t = mv - mv_0 = m\Delta v \qquad (۷-۲)$$

$F \cdot t$ یعنی حاصل‌ضرب نیرو درمدت اثر نیرو را « ضربه » می‌نامند . رابطهٔ (۲ـ۷) نشان‌می‌دهد که اگر برجسمی ضربه‌ای (چه در زمانی کوتاه وچه درمدتی دراز) وارد شود و در اثر این ضربه تندی جسم تغییرکند اندازه ضربه برابر میزان « تغییر اندازه حرکت »



شکل۲-۷. ضربه چکش میخ را در تخته فرو می‌برد

جسم خواهد بود .

وقتی که جسمی از حالت سکون در اثر ضربه به‌حرکت در می‌آید سرعت اولیه‌آن $v_0 = 0$ است و معادله (۲ـ۷) به‌صورت زیر در می‌آید.

$$Ft = mv \qquad (۸-۲)$$

یعنی جسم ساکن پس از دریافت ضربه Ft ، اندازه حرکت mv را پیدا می‌کند. عکس این مطلب نیز درست‌است، یعنی‌جسم متحرکی هم‌که دارای اندازه حرکت mv است با اعمال ضربه $-Ft$ متوقف می‌شود. علامت منفی دراین‌جا نشان می‌دهدکه نیروی F در خلاف جهت تندی v برجسم اثر می‌کند.

مثال میخ و چکش‌که درشکل ۲ـ۷ نشان داده شده است مفهوم ضربه را به خوبی نشان می‌دهد.

سر چکش به جرم m با سرعت v به میخ برخورد می‌کند و نیروی بزرگی در زمان‌کوتاه t که کسر کوچکی از ثانیه است برمیخ وارد می‌سازد و دراثر این‌ضربه میخ کمی در تخته‌فرو می‌رود. اگر F اندازه متوسط نیروی وارد برمیخ دراین زمان کوتاه t باشد، اندازه ضربه برابر است با :

$$\text{ضربه} = Ft \qquad (۹-۲)$$

مثال ـ جرم سر یک‌چکش $1/50\,kg$ است وباسرعت $6/0\frac{m}{s}$ به‌سرمیخ بزرگی زده می‌شود و میخ در یک تخته فرو می‌رود . اگر مدت ضربه $0/0010\,s$ باشد مطلوبست :

الف ـ اندازه ضربه

ب ـ اندازه متوسط نیروی وارد برمیخ

ـ داریم $m = 1/50kg$ و $v = 6/0\frac{m}{s}$

و $t = 0/0010s$

الف ـ برای محاسبه ضربه کافی است در رابطهٔ $Ft=mv$ به‌جای m و v مقادیر داده شده را بگذاریم

$$Ft=mv=۱/۵۰kg\times۶/۰\frac{m}{s}=۹/۰kg\frac{m}{s}$$

ب ـ اندازه متوسط نیروی F که برمبنع اعمال می‌شود برابر است با

$$F=\frac{mv}{t}=\frac{۹/۰\frac{kgm}{s}}{۰/۰۰۱۰s}$$
$$=۹۰۰۰N=۹/۰\times۱۰^{۳}N$$

نیروی ۹۰۰۰ نیوتن خیلی بزرگ به‌نظر می‌رسد ولی زمان تاثیر آن خیلی کوتاه است .

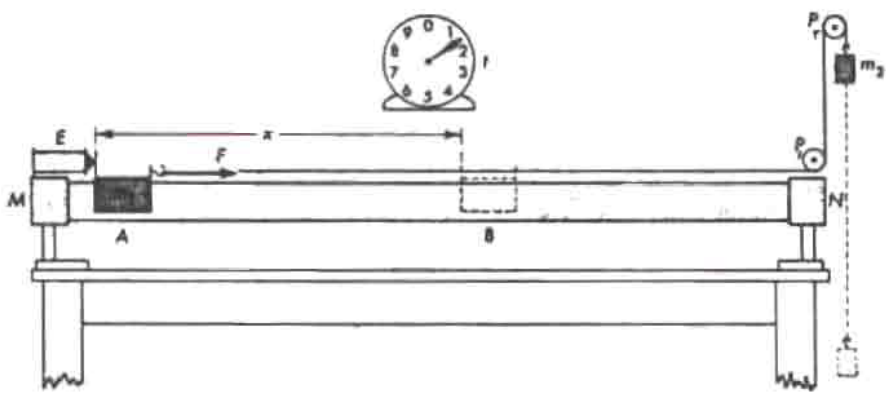
پرسش ۹-۲ ـ به نظر شما چگونه می‌توان اندازه این نیرو را عملا آزمود ؟

نیروئی که چکش را از حرکت بازمی‌دارد نیروی مقاومت تخته است که جهت آن خلاف جهت حرکت چکش (یعنی رو بالا) است .

تحقیق تجربی قانون دوم نیوتن

برای نشان‌دادن رابطهٔ بین نیروی ثابت وارد بریك جسم وتغییر اندازه حرکت حاصل ازاین نیرو می‌توان آزمایشی را که طرح آن درشکل۳ـ۸ نمایش داده شده است انجام داد :

جسم کوچك $m_۱$ توسط نخی که از شیارهای دوقرقره $P_۱$ و $P_۲$ گذشته و به وزنه کوچك آویزان $m_۲$ متصل است ، برروی ریل مستقیم وافقی MN کشیده می‌شود[۱] وشتاب می‌گیرد . هوای متراکم به درون ریل که توخالی است دمیده می‌شود و از سوراخهای ریزی که سراسر رویه بالائی ریل تعبیه شده‌است خارج می‌گردد . خروج هوا ازسوراخها سبب می‌شود که جسم $m_۱$ در مسیر حرکت خود همواره برلایه‌ای ازهوا قرار می‌گیرد وتقریباً بدون اصطکاك برروی ریل می‌لغزد . این دستگاه که بهتر است آن را تخت هوا بنامیم وسیله جدیدی است که امروزه در آزمایشگاههای فیزیك برای انجام آزمایشهای مربوط به‌مکانیك به‌کار می‌رود .



شکل ۳ـ۸ـ تخت هوا برای مطالعه دینامیك حرکات

۱ـ معمولا جسم $m_۱$ بشکل ناوه کوچکی ساخته می‌شود که به‌طور وارونه بریشته منشوری شکل ریل سوار می‌شود .

در آغاز آزمایش جسم m_1 توسط آهن ربای الکتریکی E نگاهداشته شده است . در لحظه‌ای که کلید مدار الکتریکی آهن‌ربا باز می‌شود جسم m_1 به راه مـی‌افتد و در همین لحظه ساعت الکتریکی شروع بکارمی‌کند وموقعی‌که جسم m_1 به‌نقطه‌ای مثلا B که درفاصله مشخصی از A نشان شده است می‌رسد ساعت متوقف می‌گردد و زمانی که مسافت $AB=x$ پیموده شده‌است مشخص می‌شود. آزمایش را مـی‌توان چندین‌بار برای فواصل مختلف تکرار کرد و با تعیین x و t و جرمهای m_1 و m_2 و صرفنظرکردن ازجرمهای نخ و قرقره‌ها و اصطکاک آنها $\frac{\Delta(mv)}{t}$ حساب‌کرد . دراین آزمـایش نیروی شتاب دهنده m_2g است وجرمی‌که دراثر این نیرو به‌حرکت درمی‌آید (باصرف‌نظرکردن از جرم نخ و قرقره‌ها) m_1+m_2 است بنابراین شتاب حرکت از رابطهٔ زیر به‌آسانی حساب می‌شود :

$$a=\frac{m_2g}{m_1+m_2}$$

مثلاً به ازاء

$$m_2=0/020kg \text{ (۲۰ گرم)} \quad \text{و} \quad g=9/80\frac{m}{s^2}$$

و

$$m_1=1/000kg$$

$$a=\frac{0/020kg\times 9/80\frac{m}{s^2}}{1/020kg}$$

$$=0/192\frac{m}{s^2}=19/2\frac{cm}{s^2}$$

قانون سوم نیوتن

قانون اول نیوتن رفتار یك جسم را درحالت تعادل‌بیان می‌کند و این حالتی‌است‌که برآیندنیروهای وارد برآن‌جسم صفر است . قانون دوم نیوتن‌بیان می‌کندکه اگر نیرو (یا برآیند نیروها) صفر نباشد چگونه درحرکت جسم تغییرحاصل می‌شود . قانون سوم نیوتن اثر متقابل دوجسم را بریکدیگـر بیان می‌کند . ترجمه کلمه به‌کلمه قانـون سوم ازکتاب اصول نیوتن چنین است :

برای هر عملی عکس‌العملی است مساوی با آن و درخلاف جهت‌آن . به‌عبارت دیگر عملهای دو جسم بریکدیگر همواره مساوی و در جهت مخالف هم است .

پرسش ۳-۱۰ـ منظور ازاصطلاحات عمل و عکس‌العمل دربیان این قانون چیست ؟

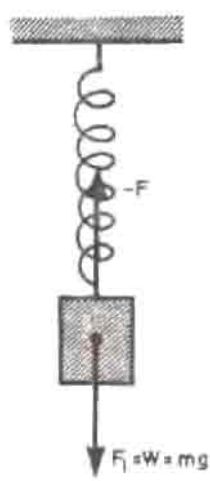
درمورد کاربرد این قانون درکتاب فیزیك سال اول با چند مثال مـانند عقب زدن تفنگ به‌هنگام خروج گلوله ازآن ، حرکت موشکها وهواسماهای جت ، راه رفتن روی زمین ، آشنا شدید . بسیاری ازمشاهدات روزانه قانون سوم نیوتن را آشکار می‌سازند :

وقتی که گوی باچوگان زده می‌شود، چوگان یك نیروی F (عمل) به‌گوی‌وارد می‌سازد. گوی‌هم نیرونی برابر F — که مساوی و در خلاف جهت F است(عکس‌العمل)برچوگان وارد می‌کند(شکل ۲-۹). ضربه Ft ازطرف چوگان به گوی ساکن اندازه حرکتی برابر mv می‌دهـد و گوی بـا سرعت زیاد v به حرکت درمی‌آید . ضربه Ft — از طرف گوی‌برچوگان سبب می‌شودکه اندازه حرکت‌اولیه چوگان کاهش یابد ولی در هرصورت ، تغییر اندازه حرکت‌گوی برابر تغییر اندازه حرکت چوگان است .

وقتی‌که وزنه‌ای به جرم m به فنری‌آویزان وبه‌حال تعادل است ، وزنه با نیروی F کـه برابر

شکل۲-۹- نیروئی که گوی به‌چوگان وارد می‌کند مساوی و در خلاف جهت نیروئی است که چوگان برگوی وارد می‌سازد

وزنش می‌باشد فنررا به‌طرف پائین می‌کشد (شکل ۲-۱۰) . فنرهم که دراثراین نیروکشیده شده است با نیروی کشسانی F — وزنه را به‌طرف بالامی‌کشد.



شکل۲-۱۰- تساوی نیروهای عمل وعکس‌العمل سبب تعادل جسم آویخته به فنر می‌شود .

تعادل است .

درپاره‌ای ازموارد اثرمتقابل نیروها به‌آسانی مشاهده نمی‌شود . مثلا وقتی که یك سیب ازشاخه درخت جدا می‌شود دراثر نیروی جاذبه‌ای که ازطرف زمین برآن وارد می‌شود به‌طرف زمین کشیده می‌شود. زمین‌هم ، در مدتی که سیب سقوط مـی کند در اثر نیروی جاذبه سیب که مساوی نیروی جاذبـه زمین و درخلاف جهت آن است به‌طرف سیب کشیده می‌شود، ولی نظر به‌بزرگی جرم زمین درمقابل سیب حرکت آن به سوی سیب محسوس نیست .

پرسش ۲-۱۱ ـ دراین مثال نقطه اثر نیروی جاذبه سیب برزمین کجاست ؟

توجه به‌این نکته مهم است که نیروهای عمل وعکس‌العمل همواره بردوجسم اثر می‌کنند نه‌یك جسم.

یك مثال از کاربردهای قوانین نیوتن

محاسبهٔ شتاب حرکت یك جسم که فقط دراثر وزن خود برسطح شیب‌دار بدون اصطکاك حرکت می‌کند .

درنظربگیریم که جسمی به جرم m و به‌وزن $w = mg$ بر روی سطح شیب‌داری که با سطح افق زاویه α می‌سازد در اثر وزن خود به‌طرف پائین می‌لغزد (شکل ۲-۱۱) نیروی وزن mg راکه در راستای قائم برجسم اثر می‌کند ، چنانکه می‌دانید، می‌توان به دو همنه عمود برهم $P = mg\sin\alpha$ و $Q = mg\cos\alpha$ تجزیه کرد . همنه $Q = mg\cos\alpha$ که عمود برسطح شیب دار است جسم را بـرسطح می‌فشارد وباعکس‌العمل سطح که آن را به N نمایش داده‌ایم وآن هم عمودبرسطح است خنثی می‌شود .

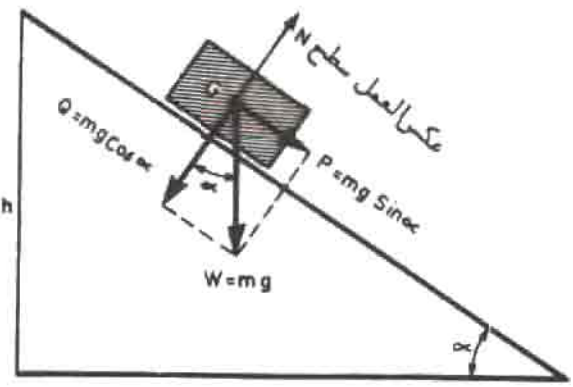
شیب‌دار می‌گردد و اگر اصطکاك سطح ناچیز باشد تنها نیروئی است که به‌جسم شتاب می‌دهد و بنا به قانون دوم نیوتن خواهیم داشت :

$$mg\sin\alpha = ma$$

و یا

$$a = g\sin\alpha \qquad (۲-۱۰)$$

می‌بینیم کـه این شتاب بستگی به‌جرم جسم ندارد. یعنی هرجسمی‌که تحت اثر وزن خود بدون اصطکاك برروی سطح شیب‌دار حرکت کند شتاب آن $g\sin\alpha$ است . بدیهی است بـه ازاء $\alpha = ۹۰^\circ$ داریم $a = g$ و این همان حالت سقوط آزاد است که در بخش ۱ در بارهٔ آن به‌تفصیل گفتگو کرده‌ایم .



شکل۲-۱۱- یك‌جسم برروی سطح شیب‌دار بدون اصطکاك در اثر نیروی $mg\sin\alpha$ شتاب می‌گیرد

همنه $P = mg\sin\alpha$ سبب حرکت جسم بـرسطح

خودتان آزمایش کنید

۱ــ به‌کمك ماشین‌آتوود[1] ضمن تحقیق قانون دوم نیوتن g شتاب جاذبه را بدست‌آورید .

ماشین آتوود اسبابی است کـه براساس قانون دوم نیوتن برای اندازه‌گیری g (شتاب جاذبـهٔ زمین) در آزمایشگاههای فیزیك طرح‌ریزی شده است .

این اسباب کـه نمونه‌ای ازآن در شکل (۲ــ۱۲) نمایش داده شده معمولا درآزمایشگاه فیزیك مـوجود است و تشکیل شده است ازدو وزنه به‌جرمهای مساوی کـه به‌دوسر رشته‌نخ سبکی‌که از روی قرقرهٔ سبك و بدون اصطکاکی می‌گذرد آویزانند . هرگاه روی یکی از وزنه‌ها سربار کوچکی گذارده شود دستگاه حرکت مـی‌کند و مسافتی که هریك از وزنه‌ها مـی‌پیماید از روی خطکش مدرجی به‌طول تقریبی ۲ متر اندازه‌گرفته می‌شود .

درصورتی کـه چنین دستگاهی درآزمایشگاه شما موجود نیست می‌توانید نمونه ساده‌تری از آن را با هم درآزمایشگاه تهیه کنید .

۱- Atwood

یکی از وزنه‌ها را مقابل صفر خطکش نگاهدارید و سربار کوچکی روی آن قرار دهید و دستگاه را آزاد بگذارید تا حرکت کند و با قرار دادن یك صفحه در طول خطکش که حرکت را متوقف می‌کند فواصل پیموده شده در زمانهای متوالی ۱ ثانیه ، ۲ ثانیه و ۳ و.... را اندازه بگیرید ونتایج اندازه‌گیری را در جدولی مانند جدول زیر ببرید وآزمایش را با یك سربارمعین چندبار تکرار وشتاب میانگین راحساب کنید .

جرم سربار m	زمان حرکت t	مسافت طی شده x	$a=\frac{2x}{t^2}$
شتاب میانگین			$\bar{a}$

اگرجرم هریك از دو وزنه را به M وجرم سربارررا به m نمایش دهیم جرم مجموع دو وزنه وسربار $2M+m$ است ونیروئی که این‌جرمها را به حرکت درمی‌آورد mg (وزن‌سربار) است . اگر ازجرم نخ وقرقره و اصطکاك صرفنظرکنیم شتاب حرکت برابر است با :

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

باتعیین m و M با ترازو و دانستن a ، شتاب جاذبه (g) را حساب‌کنید و درصورتی که با $9/8\ \frac{m}{s^2}$ اختلافی مشاهده می‌کنید علت‌را توضیح دهید .

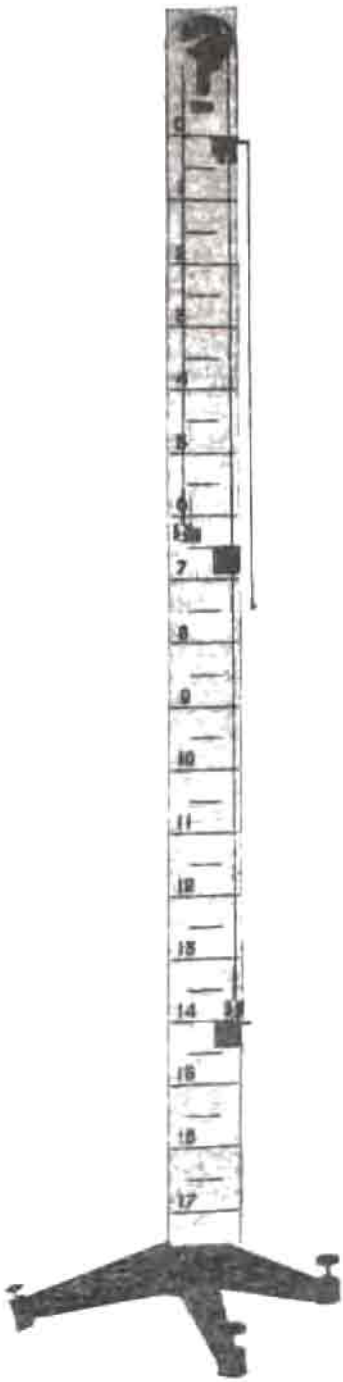
۲ــ اگرتخت هوا یاوسیله‌ای مانندآن درآزمایشگاه دراختیار دارید به‌وسیلهٔ آن قانونهای نیوتن را تحقیق‌کنید .

به این پرسشها پاسخ دهید

۱ ــ مفهومی راکه ازنیرو استنباط‌کرده‌اید دریك جمله بیان‌کنید .

۲ ــ با توجه به دیمانسیون نیرو بگوئید سه واحد اصلی‌که در تعریف واحد نیرو به‌کار رفته‌اند کدامند ؟

۳ ــ برجسمی ، مثلا یك‌کتاب ، که روی میزقرارگرفته است چه نیروهائی واردمی‌شوند؟ این نیروها را با انتخاب مقیاس مناسبی به وسیلهٔ بردار نمایش دهید .



شکل۲-۱۲- ماشین آتوود

۴ ــ یك بالون محتوی گاز سبك در هوا معلق و بدون حركت و به حال تعادل است . نظر خود را دربارهٔ نیروهائی كه بر آن وارد می‌شوند بیان كنید .

۵ ــ وقتی كه یك اتومبیل باسرعت ثابت برجادهٔ مستقیم وافقی حركت می‌كند چه نیروهائی باهم درحال تعادل دینامیكی هستند ؟

۶ ــ براساس قانون اول نیوتن توضیح دهید چرا وقتی یك اتوبوس ناگهان ازحالت سكون به‌حركت درمی‌آید مسافران آن به‌عقب رانده می‌شوند وچرا هنگامی كه درحركت‌است وناگهان ترمز می‌كند مسافران آن به‌جلو رانده می‌شوند ؟

۷ ــ این جمله درست است یا نادرست ؟ «قانون دوم نیوتن در صورتی صادق است كه نیروی اصطكاك وجود نداشته باشد » .

۸ ــ آیا تعریفی كه برای جرم دراین‌بخش شده است محدود به‌جرم اجسامی است‌كه در حال سكون هستند ؟

۹ ــ براساس قانون دوم نیوتن تعریف تازه‌ای برای شتاب غیر از تعریفی‌كه دربخش ۱ برای آن شده است بیان‌كنید .

۱۰ ــ علاوه برتعریفی كه برای جرم دراین بخش شده است آن را به صورت زیر نیز تعریف‌كرده‌اند « جرم‌هرجسم مقدار ماده‌ای است‌كه جسم را تشكیل میدهد » بنابراین برای‌جرم یك جسم دو وجه متمایز درنظر گرفته شده است ؛ یكی اندازهٔ مقاومتی‌كه جسم در مقابل تغییر تندی ازخود نشان می‌دهد ودیگری مقدار ماده‌ای‌كه جسم را تشكیل می‌دهد . كدام‌یك از این دوتعریف دقیق‌تر است ؟ به‌نظرشما آیا بهتر نیست كه به‌طور كلی تعریف اول را اینرسی وتعریف دوم را جرم بنامیم ؟ نظرخود را با استدلال بیان‌كنید .

۱۱ ــ دریك آزمایش براجسامی به‌جرمهای متفاوت عملا نیروی یكسان در زمان مساوی وارد می‌شود و آن‌ها را به‌حركت درمی‌آورد . چگونه می‌توان فهمید كه نیروی وارد برآن‌ها یكسان است ؟

۱۲ ــ ما به‌گفتهٔ بعضی ازدانشمندان وزن یك جسم‌برابر نیروئی است‌كه جسم بر تكیه‌گاه خود وارد می‌كند این تعریف را با مثالهایی‌كه دراین بخش با آنها مواجه شده‌اید تطبیق دهید.

۱۳ ــ با محاسبه نشان دهید كه نسبت وزن دوجسم دریك نقطه برابر نسبت جرم آن دو جسم است .

۱۴ ــ چرا با آن‌كه جرم یك‌جسم هرجاكه باشد یكی است وزن‌آن ازنقطه‌ای به‌نقطهٔ دیگر تغییر می‌كند ؟

۱۵ ــ با محاسبه نشان دهیدكه اگر ازیك نقطه بـه فاصلهٔ h ازیك سطح افقـی جسمی برروی سطح شیب‌دار بدون اصطكاكی بدون سرعت اولیه رهـا شود وبر روی آن بلغزد شیب

سطح هرچه باشد موقعی
به زاویهٔ شیب سطح ندارد .

۱۶ ـ چرا اندازهٔ شتاب جسمی که در شرایط خلأ به‌طرف بالا پرتاب می‌شود هم در موقع بالا رفتن وهم درموقع پائین‌آمدن برابراست .

۱۷ ـ یك فضانورد در سفینهٔ فضایی خود به‌گرد زمین می‌گردد . شتاب جاذبهٔ زمین در ارتفاعی که این سفینه حرکت می‌کند نصف شتاب جاذبه درسطح زمین‌است ازمطالب زیر کدامها دربارهٔ این فضانورد درست است ؟

الف ـ وزن او صفر است . ب ـ جرم او صفر است .

پ ـ وزن اونصف وزنش‌درسطح زمین‌است . ت ـ جرم اونصف جرمش درسطح‌زمین‌است.

ج ـ وزن اوبرابروزنش درسطح زمین‌است. چ ـ جرم او برابر جرمش درسطح زمین‌است.

۱۸ ـ جسمی از روی یك میز پائین می‌افتد . وقتی که به‌نیمه راه مسیر خود می‌رسد از مطالب پرسش ۱۷ کدامها درموردآن صدق می‌کنند .

۱۹ ـ بایك ترازوی آزمایشگاه ، آیا جرم یك جسم اندازه گرفته می‌شود یا وزن آن؟ با یك نیروسنج فنری کدام یك ؟ توضیح دهید اگر این اندازه‌گیریها در سطح‌کره ماه انجام شود چه‌تغییری درنتایج اندازه‌گیری‌که درزمین بدست آمده است حاصل می‌شود ؟

۲۰ ـ چرا اغلب گفته می‌شود فضانوردان در سفینه‌های فضایی که به‌گرد زمین می‌گردند درحالت بی‌وزنی هستند ؟

این مساله‌ها را حل کنید

توجه به‌نکات زیر شمارا درحل مسائل دینامیك راهنمایی وکمك می‌کند :

۱) شکل ساده‌ای از موضوع مساله رسم‌کنید .

۲) هرشیئی راکه موردنظرشما است جداگانه درنظربگیرید و نیروهائی راکه برآن وارد می‌شوند با بردارهائی‌که طولشان متناسب با نیروهاست نمایش دهید .

بدیهی است اگر بریك نقطه ازشیئی چند نیرو اثرکند ، نیروی مؤثری که به‌آن شتاب می‌دهد برآیند این‌نیروهاست . براساس ترکیب نیروها(که درکتاب فیزیك سال اول آموخته‌اید) نیروی برآیند را معین‌کنید .

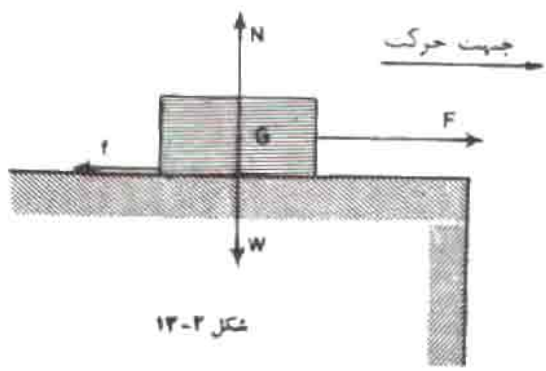
۳) با استفاده ازقانون دوم نیوتن ، برآیند نیروها را برابر ma بگیرید .

۴) معادلهٔ حاصل را حل‌کنید وکمیت مجهول را به‌دست آورید .

۵) مقادیر عددی داده شده را با قید واحدهای آنها به‌جای کمیتهای معلوم بگذارید و جواب مساله را به‌دست‌آورید .

نمونه‌کاربرد این‌نکات را درمثالهایی‌که در این بخش‌آورده‌ایم دیدید . دراین‌جا نیزبه‌حل دومثال دیگر می‌پردازیم وحل بقیه را به‌عهدهٔ خود شما می‌گذاریم .

مثال ۱ ــ نیروسنجی را به‌قطعه چوبی به جرم ۲٫۰kg متصل کرده و آن را در راستای افقی برسطح میزی می‌کشیم وقتی‌که قطعه چوب با هرتندی ثابتی‌کشیده می‌شود نیروسنج نیروی ثابت ۰٫۴۰ نیوتن را نشان می‌دهد . در آزمایش دیگر قطعه چوب را با شتاب ثابت می‌کشیم بطوری‌که نیروسنج ۲٫۱ نیوتن را نشان دهد . شتاب حرکت را دراین حالت حساب‌کنید (جرم نیروسنج دربرابر جرم قطعه چوب ناچیز است).



شکل ۲-۱۳

حل ــ وقتی‌که قطعه چوب روی سطح میز با تندی ثابت‌کشیده می‌شود ونیروسنج‌نیروی ثابتی را نشان می‌دهد معنایش این است‌که سطح میزدارای اصطکاك است و اندازهٔ نیروی اصطکاك‌که همواره در خلاف جهت حرکت است برابر نیروی‌کشش است . این نیرو را درشکل (۲-۱۳) به f نشان داده‌ایم . نیروهای دیگری‌که برجسم وارد می‌شوند عبارتند از : وزن‌جسم (w) وعکس‌العمل سطح‌میز (N) ونیروی کشش (F) که روی نیروسنج خوانده می‌شود . این نیروها را به طوری‌که درشکل دیده می‌شود باپردارهائی به‌طول مناسب نمایش داده‌ایم . w ، وزن جسم ، نقشی در حرکت‌آن ندارد زیرا برراستای حرکت عمود است وبا N ، عکس‌العمل سطح ، خنثی می‌شود . بنابراین نیروهای مؤثر در حرکت جسم عبارتند از F (نیروی کشش) و f (نیروی اصطکاك) که در خلاف جهت یکدیگر برجسم اثر می‌کنند و برآیند آنها F — f است وطبق قانون دوم نیوتن خواهیم داشت :

$$F - f = ma$$

به‌طوری‌که ملاحظه می‌شود :

- ابتدا شکل ساده‌ای ازموضوع مورد بحث مساله را رسم کردیم .
- نیروهای وارد برشیئی موردنظر را با بردارهائی به‌طول مناسب نشان دادیم .
- طبق قانون دوم نیوتن برآیند نیروها را برابر ma قراردادیم .
- اینك شرایط مساله را به‌کار می‌بریم وجواب را معین می‌کنیم :

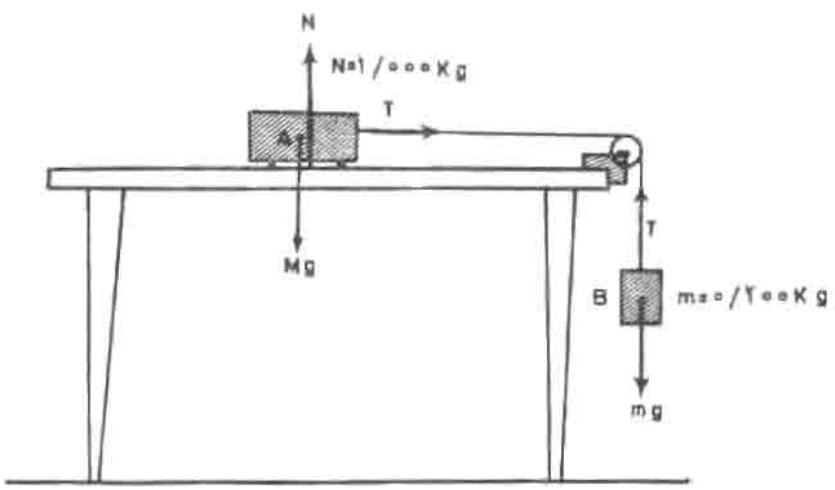
وقتی‌که بندی ثابت است شتاب صفراست ، پس $F-f=0$ بنابراین

$$f=F=0/20N$$

و هنگامی‌که نیروی کشش $F=2/10N$ است شتاب حرکت برابراست با :

$$a=\frac{F-f}{m}=\frac{2/10N-0/20N}{2/0kg}=\frac{1/7N}{2/0kg}=0/85\frac{N}{kg}\left(\frac{m}{s^2}\right)$$

مثال۲ـ وزنهٔ A به‌جرم $M=1/000kg$ روی سطح افقی میزی‌که اصطکاك آن ناچیز است قرار گرفته و نخی‌که از شیار قرقره‌ای می‌گذرد آن را به وزنهٔ آویزان B به جرم $m=0/200\ kg$ وصل می‌کند (شکل۲ـ۱۴) .راستای نخ با سطح میز موازی است وجرم نخ و قرقره و اصطکاك آن ناچیز است . شتاب حرکت دستگاه وکشش نخ را حساب کنید .



شکل ۲ـ۱۴ـ نیروهای وارد بر هرجسم را با بردارهایی به‌طول مناسب نمایش می‌دهیم .

حل ـ وزنهٔ آویزان B دراثر نیروی وزن خود یعنی mg ، به‌طرف پائین کشیده می‌شود و نیروی کشش نخ که آن را به T نمایش داده‌ایم ، مانع سقوط آزاد آن می‌گردد. بنابراین نیروی مؤثری‌که به‌آن شتاب می‌دهد $mg-T$ است واگرشتاب حرکت دستگاه‌را به a نشان

دهیم برای وزنهٔ B داریم :

$$mg - T = ma$$

$$T = mg - ma \qquad (۲-۱۱)$$

نیروی مؤثر بر وزنهٔ A که روی میز افقی کشیده می‌شود فقط T (کشش نخ) است ، زیرا وزن آن (Mg) با نیروی عکس‌العمل سطح (که آن را به N نمایش داده‌ایم و برسطح عمود است) خنثی می‌شود واصطکاك هم که ناچیز است ، بنابراین :

$$T = Ma \qquad (۲-۱۲)$$

ازترکیب دومعادلهٔ (۲-۱۷) و (۲-۱۸) نتیجه می‌شود :

$$\begin{cases} a = \dfrac{m}{M+m}\, g \\ T = \dfrac{Mm}{M+m}\, g \end{cases} \qquad (۲-۱۳)$$

به ازای $M = ۱/۰۰۰ kg$ و $m = ۰/۲۰۰ kg$ و $g = ۹/۸۰ \frac{m}{s^۲}$:

$$a = \frac{۰/۲۰۰ kg}{۱/۰۰۰ kg + ۰/۲۰۰ kg} \times ۹/۸۰ \frac{m}{s^۲} = \frac{۰/۲۰۰}{۱/۲۰۰} \times ۹/۸۰ \frac{m}{s^۲} \simeq ۱/۶۳ \frac{m}{s^۲}$$

$$T = \frac{۱/۰۰۰ kg \times ۰/۲۰۰ kg}{۱/۰۰۰ kg + ۰/۲۰۰ kg} \times ۹/۸۰ \frac{m}{s^۲} = \frac{۰/۲۰۰}{۱/۲۰۰} kg \times ۹/۸۰ \frac{m}{s^۲} \simeq ۱/۶۳ N$$

۱) – می‌خواهیم به‌جسمی که جرمش $۷۰/۰ kg$ است شتابی برابر $۴/۵۰ \frac{m}{s^۲}$ بدهیم ، نیروی لازم را در دوحالت زیر حساب کنید :

الف) جسم درسطح افقی که اصطکاك آن ناچیز است حرکت می‌کند .

ب) جسم در راستای قائم ازپائین به‌بالا حرکت می‌کند .

جواب : الف) $۳۱۵ N$ ب) $۱۰۰۱ N$

۲) – یك توپ بازی گلف که جرمش ۲۵ گرم است با سرعت ثابت $۴۰/۰ \frac{m}{s}$ به توده‌ای گل برخورد کرده و $۸/۰ cm$ درآن فرو می‌رود. اگرحرکت این‌توپ درون تودهٔ گل‌درامتداد خط راست وباشتاب ثابت صورت گرفته باشد و سنگینی توپ دراین حرکت نقشی نداشته باشد مطلوبست :

الف) مدت حرکت توپ در تودهٔ گل .

ب) نیروی متوسط وارد برتوپ درون تودهٔ گل .

پ) میزان تغییر اندازه حرکت توپ .

جواب : الف) $۲\times۱۰^{-۳}s$ ب) $۲۵۰N$ پ) $۱kg\,.\,\frac{m}{s}$

۳) ـ اتومبیلی که با راننده‌اش $۲۰۰۰kg$ جرم دارد ازحال سکون به‌حرکت درمی‌آید و پس از ۱۲/۰ ثانیه سرعتش به $۹۰/۰\,\frac{km}{h}$ می‌رسد . اگرشتاب حرکت .این‌اتومبیل ثابت فرض شود مطلوبست :

الف) اندازهٔ این شتاب .

ب) نیروی متوسط مؤثر وارد بر اتومبیل دراین مدت .

جواب : الف) $۲/۱\frac{m}{s^۲}\simeq$ ب) $۴۱۶۶N$

۴) ـ دوبارکش یکی خالی‌به‌جرم m و دیگری پراز بار به‌جرم m' تحت تأثیرنیروهای کشش مساوی روی یك جاده افقی با هم شروع به‌حرکت می‌کنند . اگـر پس‌ازگذشت زمان t سرعت آن‌ها به‌ترتیب v' و v باشد نسبت$\frac{v}{v'}$ برابر خواهد بود با :

۱- $\frac{m'}{m}$ ۲- $\frac{m}{m'}$ ۳- $\sqrt{\frac{m'}{m}}$ ۴- $\sqrt{\frac{m}{m'}}$

جواب درست را با محاسبه پیداکنید .

۵) ـ جرم یك هـواپیمای مسافربر جت بـا مسافرانش $۱/۲۵۰\times۱۰^{۵}kg$ است . این هواپیما از ابتدای باند پرواز شروع به‌حرکت می‌کند وپس‌از پیمودن ۲۰۰۰/۰ متر روی باند با سرعت $۶۰/۰\frac{m}{s}$ از زمین بلند می‌شود. اگرشتاب حرکت هواپیما روی باند پروازثابت‌باشد:

الف) این شتاب را حساب‌کنید .

ب) ازلحظهٔ شروع حرکت ، چه مدت طول می‌کشد تا هواپیما باند پرواز را ترك‌کند ؟

پ) نیروی مؤثر متوسط وارد برهواپیما دراین مدت چند نیوتن است ؟

ت) تغییر اندازه حرکت هواپیما دراین مدت چه اندازه است ؟

جواب: الف) $۰/۹۰\frac{m}{s^۲}$ ب) $۶۶/۷s$ پ) $۱/۱۲۵\times۱۰^{۵}N$ ت) $۷/۵۰\times۱۰^{۶}kg\,\frac{m}{s}$

۶) ـ کامیونی به جرم $۱۰\times۱۰^{۳}\,kg$ (۱۰ تن) که ایستاده است به‌حرکت درمی‌آید و پس‌از ۱۵ ثـانیه در جادهٔ راست و افقی با شتاب ثابت سرعتش به $۲۰\frac{m}{s}$ می‌رسد ، مطلوبست :

الف) شتاب حرکت ونیروی مؤثر متوسط وارد برکامیون دراین مدت .

ب) تغییر اندازهٔ حرکت کامیون در این مدت .

۷) ـ اتومبیلی که با مسافرانش $۲۰۰۰kg$ جرم دارد ازحال سکون به‌حرکت درمی‌آید و در خیابان افقی مدت ۱۶ ثانیه باشتاب$۲/۲۰\frac{m}{s^۲}$ حرکت می‌کند .

الف) سرعت اتومبیل را درپایان ثانیه شانزدهم حساب کنید .

ب) چه نیروئی به‌اتومبیل این شتاب را می‌دهد . نیروئی که اتومبیل را به‌جلو می‌راند به‌کجا اثر می‌کند ؟

۸) ـ برای کوبیدن میخهای بزرگ به تخته‌های زیر ریل راه‌آهن (جهت اتصال ریل به تخته‌ها) ازچکشی که جرم وزنه آن $۳/۰\text{kg}$ است استفاده می‌شود . هرگاه چکش با سرعت $۵/۰\frac{\text{m}}{\text{s}}$ به‌میخ برخورد کند و دراثرضربهٔ برخورد ، میخ $۱/۰\text{cm}$ درتخته فرورود مطلوبست:

الف) شتاب کند شدن حرکت چکش (یا شتاب فرورفتن میخ در تخته) .

ب) زمان برخورد .

پ) اندازهٔ ضربهٔ وارد برمیخ .

جواب : الف) $۱/۲۵\times۱۰^{۲}\frac{\text{m}}{\text{s}^{۲}}$ ب) $۲/۰\times۱۰^{-۲}\text{s}$ پ) $۱۵\text{kg}\frac{\text{m}}{\text{s}}$

۹) ـ اتومبیلی به‌جرم کل ۱۵۰۰kg ازحال سکون به‌حرکت درمی‌آید وابتدا درمدت $۸/۰$ ثانیه باشتاب ثابت $۲/۵\frac{\text{m}}{\text{s}^{۲}}$ وبعددرمدت $۱۰/۰$ ثانیه باشتاب ثابت $۱/۵\frac{\text{m}}{\text{s}^{۲}}$ حرکت‌می‌کند.

الف) نیروهای مؤثر براتومبیل‌را درهریك ازاین دومرحله حساب کنید .

ب) اتومبیل چه‌مسافتی دراین‌مدت ۱۸ ثانیه می‌پیماید .

جواب : الف) $۳/۷۵\times۱۰^{۳}\text{N}$ و $۲/۲۵\times۱۰^{۳}\text{N}$ ب) ۳۵۵m

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۴

۲ـ۱) زیرا به‌هنگام توقف ناگهانی اتومبیل دراثر ترمز باضربه ،کمربند مانع پرت‌شدن سرنشین به‌جلو می‌شود .

۲ـ۲) نیروئی که اتومبیل‌را مجبور به تبعیت ازپیچ جاده می‌کنداصطکاك بین لاستیك‌های چرخ اتومبیل وسطح جاده است . وقتی که سطح جاده یخبندان باشد اصطکاك خیلی کم است و اتومبیل نمی‌تواند ازپیچ جاده تبعیت کند وطبق قانون ماند به‌راستای حرکت خود ادامه‌می‌دهد و ازجاده خارج می‌شود .

۲ـ۳) نه ، زیرا نیروئی وجود نداردکه مانع حرکت شود .

۲ـ۴) مستقیماً نه ، زیرا نیروی وزن برراستای حرکت عموداست و با عکس‌العمل‌سطح خنثی می‌شود . بدیهی است به‌طور غیرمستقیم در نیروی اصطکاك مؤثر است .

۲-۵) اندازهٔ این نیرو برحسب نیوتن برابر است با :

$$۱۰^{-۳}\text{kg} \times ۱۰^{-۲}\frac{\text{m}}{\text{s}^۲} = ۱۰^{-۵}\text{N}$$

نیروئی که به جرم یك گرم شتاب یك سانتیمتر برمجذور ثانیه می‌دهد معادل $۱۰^{-۵}$ نیوتن است که دردستگاه واحدهای قدیمی بنام دستگاه سانتیمتر ـ گرم ـ ثانیه (یا به‌اختصار C.G.S.) دین (dyne) نامیده شده است .

بنابراین :

$$۱\ \text{dyne} = ۱۰^{-۵}\text{N}$$

۲-۶) $\text{MLT}^{-۲}$

۲-۷) در اثر ضربه : یعنی وقتی به‌آنها ضربه‌ای وارد شود شتاب می‌گیرند .

۲-۸) $\text{P} = \text{mv} = ۱۲/۰ \times ۱۰^{-۳}\text{kg} \times ۴۰۰/۰\frac{\text{m}}{\text{s}^۲} = ۴/۸۰\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$

۲-۹) با واردکردن نیرو توسط یك ماشین منگنه یا در صورت امکان باقرار دادن وزنه روی میخ به طوری که میخ درتخته شروع به‌فرورفتن کند .

۲-۱۰) عمل‌یعنی نیروئی که جسم اول برجسم‌دوم واردمی کند وعکس‌العمل یعنی‌نیروئی که جسم دوم برجسم اول وارد می‌سازد .

۲-۱۱) مرکزکرهٔ زمین . درمحاسبهٔ این نیرو ، نیوتن زمین را درحکم کرهٔ همگنی گرفته است که تمام جرم آن درمرکزش متمرکزباشد (یعنی درحکم یك ذره ونظر نیوتن را دراین‌باره در بخشهای بعد خواهیم دید) .

۳

حرکت برمسیر دایره‌ای
میدانهای جاذبه

یکی از حرکتهای مهم ، حرکت یك جسم باسرعت ثابت بر روی محیط دایره است . نمونه‌های بسیاری از این حرکت را هر روز مشاهده می‌کنیم . می‌توان گفت که حرکت ماه وبعضی ازماهواره‌ها به دور زمین نیز تقریباً از این نوع حرکت هستند . باید درنظرداشت که حرکت برمسیر دایره‌ای یادوران یك جسم به دوریك محورتفاوت دارد . مثلا وقتی که یك صفحه گرامافون می‌چرخد یك نقطه ازمحیط آن مسیر دایره‌ای نسبتاً بزرگی را به‌دور محور صفحه مـی‌پیماید ، درصورتی‌که خود صفحه بدون‌آن‌که ازجائی به‌جای دیگرمنتقل‌شود درجای خود می‌چرخد . درپاره‌ای ازموارد هردوی این‌حرکات باهم انجام می‌شوند مانند چرخش زمین به‌دور محور خود وگردش آن برمسیر تقریباً دایره‌ای بـه دور خورشید. در این بخش ما نخست این حرکت را مورد بحث قـرار می‌دهیم و در پایان بخش نیروی جاذبه عمومی و اثر آن را بر حرکت سیارات به دور خورشید و ماهواره‌ها به‌گرد زمین بررسی می‌نمائیم.

حرکت یکنواخت برمسیر دایره‌ای ـ وقتی که یك جسم کوچك ، یا به‌عبارت دیگر یك ذره بر مسیری به‌شکل دایره به‌دور یك‌نقطه ثابت حرکت مـی‌کند جهت تندی آن دائماً تغییرمی‌نماید ولی ممکن است اندازه تندی (یاسرعت)آن ثابت بماند .

اگر درحرکت برمسیردایره‌ای ، سرعت (یااندازه تندی) متحرك ثابت بماند چنین حرکتی را « حرکت یکنواخت برمسیر دایره‌ای » نامند.

حرکت یکنواخت برمسیردایره‌ای رامی‌توانیم به‌وسیله شعاع دایره مسیر وسرعت متحرك برروی

این دایره مجسم کنیم ، ولی اگر حرکت به‌طورمنظم تکرار شود می‌توانیم به‌جای این سرعت ، تعداد دورهای متحرك درواحد زمان ویا زمان لازم برای پیمودن یك دور کامل راکه اندازه‌گیری آنها آسانتر است درنظر بگیریم .

تعداد دورهای کاملی راکه متحرك درواحد زمان می‌زند تواتر یافرکانس حرکت می‌نامند و آن را به n نمایش می‌دهند .

تعداد دورهای کامل در واحد زمان = n

زمانی راکه طول می‌کشد تا متحرك یك دور کامل‌مسیرحرکت خود را به‌نماید پرید دوره حرکت می‌نامند وآن‌را به T نمایش می‌دهند .

زمانی که متحرك یك دور کامل می‌زند = T

به‌آسانی می‌توان پی برد که بین T و n رابطه‌های زیر برقرار است .

$$n=\frac{1}{T} \quad , \quad T=\frac{1}{n} \qquad (۱-۳)$$

پرید حرکت را می‌توان برحسب ثانیه ، دقیقه ، روز یا سال یا هر واحد زمان دیگر بیان کرد. درنتیجه فرکانس نیزبرحسب دوربرثانیه ، بردقیقه، بر روز ویا برسال و... بیان می‌شود .

درجدول۳-۱حدود پرید وفرکانس چندمتحرك برای مقایسه داده شده است .

اگر در حرکت یکنواخت بر مسیر دایره‌ای ، R شعاع دایره مسیر و T پرید حرکت ، یا n عده دورها درواحد زمان‌معلوم باشند ، v سرعت متحرك درهرنقطه ازمسیر به‌آسانی حساب می‌شود ، زیرا مسافتی‌که متحرك در زمان T می‌پماید برابرمحیط دایره مسیر یعنی $2\pi R$ است وچون :

جدول ۳-۱

مقایسه حدود پرید و فرکانس چند حرکت دایره‌ای

(به‌اختلاف بین واحدها توجه کنید)

متحرك	پرید T	فرکانس n
الکترون دراتم هیدروژن طبق‌فرضیه بور	10^{-17} ثانیه	$10^{17}\ \frac{\text{دور}}{\text{ثانیه}}$
سانتریفوژ بسیار سریع (اولترا سانتریفوژ)	$3/3\times10^{-4}$ ثانیه	$3000\ \frac{\text{دور}}{\text{ثانیه}}$
توربین‌آبی برای تولید برق	۰/۳۳ ثانیه	$3\ \frac{\text{دور}}{\text{ثانیه}}$
زمین به دور خود	۲۴ ساعت	$7\times10^{-4}\ \frac{\text{دور}}{\text{دقیقه}}$
ماه به‌دورزمین	۲۷/۳ روز	$1/5\times10^{-3}\ \frac{\text{دور}}{\text{ساعت}}$
زمین به دورخورشید	۳۶۵/۲۵ روز	$2/1\times10^{-3}\ \frac{\text{دور}}{\text{روز}}$

$$\text{سرعت} = \frac{\text{مسافت طی شده}}{\text{زمان حرکت}}$$

بنابراین :

$$V=\frac{2\pi R}{T}=2\pi R \cdot n \qquad (۲-۳)$$

مثلا سرعت یك‌نقطه ازنوك ملخ یك‌هلیکوپتر به‌قطر ۷/۵۰متر به‌دور محورخودکه درشرایط‌عادی ۴۸۰ دور در دقیقه می‌زند برابراست با :

$$v=2\pi Rn=2\times(3/14)\times(3/75)\times(8/0)\frac{m}{s}$$

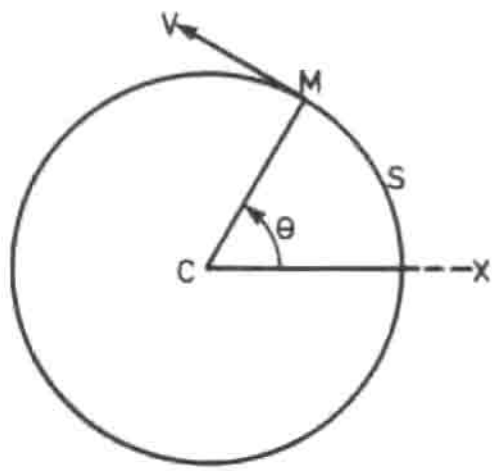
یا

$$v=189\frac{m}{s}$$

بدیهی است اگر حرکت یکنواخت باشد v که از رابطهٔ (۳ـ۲) حساب می‌شود ، هم معرف سرعت لحظه‌ای[1] وهم معرف سرعت متوسط است .

پرسش ۳ـ۱ ـ اگر حرکت یکنواخت نباشد v معرف چه سرعتی است ؟

سرعت زاویه‌ای ـ درنظر بگیریم که متحرك M روی دایره‌ای به‌مرکز C وبه‌شعاع OM با سرعت ثابت حرکت می‌کند (شکل ۳ ـ ۱) سرعت زاویه‌ای این متحرك بنابه‌تعریف عبارت است از زاویه‌ای که در واحدزمان توسط شعاع CM پیموده‌می‌شود، به‌عبارت



شکل ۳ـ۱ـ حرکت برمسیردایره‌ای

دیگر سرعت زاویه‌ای برابر زاویه مرکزی مقابل به قوسی از دایره است که متحرك آن را در واحدزمان می‌پیماید :

$$\text{سرعت زاویه‌ای} = \frac{\text{زاویه پیموده شده}}{\text{زمان حرکت}}$$

اگرحرکت برمسیر دایره‌ای یکنواخت باشد سرعت زاویه‌ای نیز ثابت است .

سرعت زاویه‌ای را به ω (حروف لاتین باتلفظ امگا) نمایش می‌دهند . اگر θ زاویه پیموده شده در زمان t باشد داریم[2]

$$\omega = \frac{\theta}{t} \qquad (۳ـ۳)$$

زاویه θ معمولا برحسب واحد « رادیان » با علامت اختصاری **rad** سنجیده می‌شود بنابراین سرعت زاویه‌ای برحسب واحد $\left(\frac{\text{رادیان}}{\text{ثانیه}}\right)$ $\left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)$ بیان می‌گردد .

رادیان چنان‌که می‌دانید اندازه زاویه‌مرکزی مقابل به‌قوسی از دایره است که طول آن برابر R شعاع دایره باشد. چون طول محیط دایره 2π برابر شعاع آن است پس زاویه مقابل به‌تمام‌محیط دایره 2π رادیان است و داریم .

$$2\pi\,\text{rad} = 360^\circ$$

چون $\pi = 3/14159$ است‌اندازه یك‌رادیان برحسب درجه برابر است با :

$$\text{rad} = \frac{360^\circ}{2 \times 3/14159} = 57^\circ/296 \simeq 57^\circ/3$$

بنابراین برای به‌دست‌آوردن اندازه یك‌زاویه برحسب رادیان کافی است طول قوس مقابل آن را برشعاع دایره تقسیم کنیم . یعنی :

$$\text{زاویه برحسب‌رادیان} = \frac{\text{طول قوس مقابل به‌زاویه}}{\text{طول شعاع دایره}}$$

۱ـ سرعت لحظه‌ای بردایره مسیر درهرلحظه مماس است وسرعت خطی‌نیز نامیده می‌شود .

۲ـ رابطه ۳ـ۳ شباهت زیادی به رابطه $v = \frac{x}{t}$ درحرکت خطی دارد .

و یا

$$\theta_{(rad)}=\frac{S}{R} \qquad (۴-۳)$$

ازاین رابطه طول قوس پیموده شده در زمان t حساب می‌شود :

$$\boxed{S=R\theta} \qquad (۵-۳)$$

پرسش ۳-۲ ـ باتوجه به‌این‌که زاویه θ بدون دیمانسیون‌است‌دیمانسیون سرعت‌زاویه‌ایω چیست؟

با استفاده از دورابطه $\omega=\frac{\theta}{t}$ و $S=R\theta$ می‌توان سرعت متحرك درهرنقطه از مسیرحرکت یا به‌عبارت دیگر « سرعت خطی » متحرك رابرحسب سرعت زاویه‌ای ω حساب‌کرد :

$$V=\frac{S}{t}=\frac{R\theta}{t}=R\frac{\theta}{t}$$

و یا

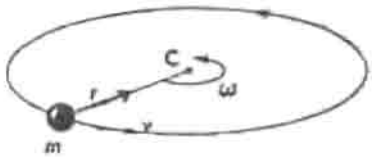
$$\boxed{V=R\omega} \qquad (۶-۳)$$

پرسش ۳-۳ ـ اگر در نظر بگیریم‌که سرعت لحظه‌ای مشتق مسافت طی شده نسبت به‌زمان‌است چگونه می‌توانیم باعمل مشتق‌گیری‌رابطه $V=R\omega$ را به‌دست‌آوریم ؟

ازمقایسه دو رابطه (۳-۲) و (۳-۶) نتیجه می‌شود:

$$\boxed{\omega=2\pi n=\frac{2\pi}{T}} \qquad (۷-۳)$$

شتاب و نیروی جانب مرکز ـ شکل ۳-۲ وزنه کوچکی را نشان می‌دهد که به‌انتهای ریسمانی بسته



شکل۳-۲- وقتی که جرم m با سرعت ثابت روی یك دایره حرکت می‌کند شتابی پیدا می‌کندکه متوجه مرکز دایره است.

شده و درسطح افقی باسرعت ثابت برمسیر دایره‌ای حرکت می‌کند .

دراین حرکت سرعت (یا اندازه‌تندی) ثابت است ولی‌جهت‌آن دائماً تغییر می‌کند . درحرکتهای برخط راست باشتابهائی سروکار داشتیم که تنها از تغییر اندازه تندی حاصل می‌شدند ، ولی درحرکت یکنواخت برمسیردایره‌ای ، اندازه تندی ثابت‌است ولی جهت‌آن دائماً تغییرمی‌کند . زیرا تندی یك کمیت برداری است‌که دارای جهت و اندازه است وهریك ازاین دوکه تغییرکند شتاب حاصل‌می‌شود. از طرف دیگر می‌دانیم برای ایجاد شتاب همواره نیروئی‌لازم است. دراین مثال‌نیروئی ازطرف‌ریسمان بروزنه وارد می‌شودکه اگر ازسنگینی وزنه و اثر مقاومت هوا برآن صرفنظرکنیم تنها نیروئی‌است‌که سبب تغییرجهت تندی وزنه می‌گردد و به‌آن شتاب می‌دهد . زیرا اگرریسمان ناگهان پاره شود وزنه در راستای مماس بر دایره مسیر باتندی‌که درلحظهٔ پاره شدن ریسمان دارد به خارج پرتاب می‌گردد . ولی تا وقتی‌که ریسمان وجود دارد نیروی‌کشش‌آن وزنه را مجبور می‌کند که برمسیر دایره‌ای بگردد . بردار نمایش این نیرو همواره در راستای ریسمان، قرار دارد بنابراین سوی آن درهرلحظه متوجه‌مرکز دایره مسیر است و به‌این جهت نیروی جانب مرکز نامیده می‌شود . چون طبق قانون دوم نیوتن نیرو

و شتاب حاصل‌ازآن همواره هم‌جهت هستند،
نمایش شتاب حرکت نیز متوجه مرکز دایره مسیر است و بدین سبب « شتاب جانب مرکز » نامیده می‌شود .

پرسش ۳-۴ ـ با این که در حرکت برمسیر دایره‌ای نیرو و شتاب هردو متوجه مرکز دایره‌اند چرا جسم به‌طرف مرکزدایره کشیده نمی‌شود وروی محیط دایره به حرکت یکنواخت ادامه می‌دهد ؟

اندازه شتاب جانب مرکز برحسب سرعت زاویه‌ای ω :

$$a = R\omega^2 \qquad (۸-۳)$$

و برحسب سرعت خطی v :

$$a = \frac{v^2}{R} \qquad (۹-۳)$$

پرسش ۳-۵ ـ اگرسرعت‌حرکت برروی‌دایره مسیر ثابت نباشد آیا علاوه برشتاب جانب مرکز شتاب دیگری هم وجود خواهد داشت؟

نیروی جانب مرکز را با توجه به‌آنچه گفته شد می‌توان چنین تعریف کرد :

نیروی جانب مرکز عبارتست ازنیروی ثابتی که به‌طور مداوم عمود برمسیر حرکت یک جسم برآن اثر می‌کند و سبب می‌شود که جسم با سرعت ثابت روی یک دایره حرکت نماید.

اندازه این‌نیرو طبق قانون دوم نیوتن‌ازرابطهٔ $F = ma$ حساب می‌شود یعنی :

$$F = m\frac{v^2}{R} \qquad (۱۰-۳)$$

$$F = mR\omega^2 \qquad (۱۱-۳)$$

چندمثال :

۱- فرض کنید جرم وزنه m درشکل(۳-۲)برابر ۰/۵۰۰ کیلوگرم وشعاع دایره‌مسیر ۱/۰۰ متراست واین وزنه روی سطح افقی بدون اصطکاکی درهر ثانیه دو دورکامل می‌زند ، شتاب حرکت وزنه و نیروی جانب مرکز وارد برآن را حساب کنید .

ـ شتاب جانب مرکز برابر است با :

$$a = R\omega^2 = R(2\pi n)^2 =$$

$$1/00\,m\left(2\pi \times 2\frac{rad}{s}\right)^2 = 157/75\frac{m}{s^2}$$

(رادیان بدون دیمانسیون است وبهمین‌جهت در واحد شتاب وارد نشده است)

ـ نیروی جانب مرکز(یا کشش ریسمان)برابر است با :

$$F = mR\omega^2 = 0/500 \times 157/75 \simeq 78/9\,N$$

۲- پاندول‌مخروطی ـ درشکل(۳-۲-الف)، یک‌گلوله‌کوچک فلزی به‌وسیلهٔ نخ محکم وسبکی که جرم آن درمقابل جرم گلوله ناچیز است مانند یک پاندول در نقطه A به‌انتهای‌میلهٔ قائمی‌آویزان است ومیله روی موتور کوچکی نصب شده‌است . وقتی که موتور می‌چرخد میله‌راهم‌می‌چرخاند وبه زاویه سرعت زاویه معین ω ، پاندول در راستای‌ثابتی‌منحرف شده و همراه‌میله می‌چرخد. درنتیجه هر گرفتل گلوله روی یک‌مسیر دایره‌ای حرکت می‌کند و نخ‌یک‌سطح مخروطی دوار به‌دورمحور AZ ایجاد می‌نماید. به‌همین‌جهت این

دستگاه را «پاندول مخروطی» می‌نامند . هرچه سرعت زاویه ω بیشتر شود انحراف پاندول از وضع قائم نیز بیشتر می‌شود و اگر سرعت زاویه‌ای ω ثابت بماند، θ زاویهٔ انحراف پاندول از وضع قائم نیز ثابت می‌ماند . شعاع دایره مسیر گلوله در این حالت مطابق شکل (۳-۴ - ب) برابر است با $R = l\sin\theta$. (l طول پاندول یعنی فاصله نقطه A از مرکز ثقل گلوله است) . اگر از مقاومت هوا صرفنظر کنیم نیروهای وارد بر گلوله عبارتند از: وزن گلوله ($w = mg$) و نیروی کشش نخ (F) .

اندازه همه‌های نیروی F در دو راستای افقی و قائم به‌ترتیب $F\sin\theta$ و $F\cos\theta$ است . همه افقی $F\sin\theta$ نیروی جانب مرکز است که سبب می‌شود گلوله با سرعت ثابت برروی مسیر دایره‌ای حرکت کند و داریم :

$$F\sin\theta = mR\omega^2 \quad (۱۲-۳)$$

همه قائم $F\cos\theta$ برابر وزن گلوله است، زیرا وقتی که θ ثابت است برآیند نیروها در راستای قائم صفر است و داریم :

$$F\cos\theta = mg \quad (۱۳-۳)$$

اگر دو رابطه (۳-۱۲) و (۳-۱۳) را برهم تقسیم کنیم خواهیم داشت :

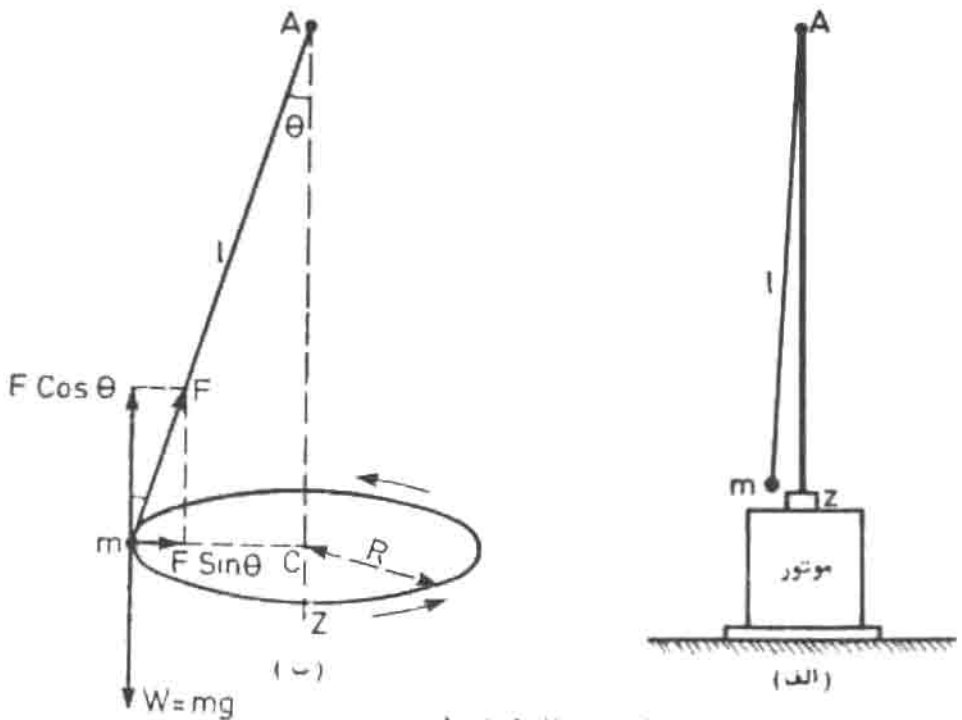
$$tg\theta = \frac{R\omega^2}{g} \quad (۱۴-۳)$$

و با به کاربردن رابطهٔ $R = l\sin\theta$ نتیجه می‌شود :

$$\frac{1}{\cos\theta} = \frac{l\omega^2}{g} \quad (۱۵-۳)$$

رابطهٔ (۳-۱۴) با (۳-۱۵) بستگی بین زاویه θ و سرعت زاویه‌ای ω را نشان می‌دهد .

پرسش ۳-۶ - چگونه می‌توانید پرید این



شکل ۳-۴- پاندول مخروطی

حرکت ، یعنی زمان یك دور گردش آونگ‌راحساب کنید ؟

در مثالهای بالا ، چون جسم با سرعت ثابت برمسیر دایره‌ای حرکت می‌کند ممکن است تصور شودکه نیروی جانب مرکز توسط نیروی دیگری مساوی با آن ولی درخلاف جهت آن به‌نام نیروی گریز از مرکز خنثی می‌شود وهمین نیرو است‌که جسم را ازمرکزدوران دورمی‌کند. ولی درواقع‌نیروئی با این کیفیت وجود نداردوتصورآن‌بسته به دید ناظری است‌که حرکت را مشاهده می‌کند . برای پی‌بردن به‌این مطلب فرض‌می‌کنیم ناظری در راستای محور AZ (شکل ۳-۳ـ ب) ایستاده‌است وهمراه این‌محور با سرعت زاویه‌ای ω می‌چرخد . این ناظر وزنه m را همواره ساکن می‌بیند . چون نیروی کشش نخ و همنه افقی آن ($mR\omega^2$)که متوجه مرکزاست برای این ناظرنیز وجود دارند واو می‌تواند آنهارا اندازه بگیرد ، برای توجیه حالت سکون ، نیروئی مساوی $mR\omega^2$ و در خلاف جهت آن به‌صورت « نیروی گریز ازمرکز» درنظرمی‌گیرد . اگرنخ قطع شود ، ازدید این ناظر، جسم در راستای شعاع دایره مسیر به‌خارج پرتاب می‌گردد .

ولی از دید ناظری‌که روی زمین ساکن است و این حرکت را مشاهده می‌کند نیروی گریز ازمرکز مفهومی ندارد زیرا جسم ، در اثرضربه‌ای‌که برآن وارد می‌شود و تندی‌که دراثر ضربه پیدا می‌کند می‌خواهد بنابه‌قانون ماند (اینرسی) درامتداد خط راست حرکت‌کند ولی‌نیروی جانب مرکزآنرا مجبور می‌کندکه برروی محیط دایره حرکت نماید . اگرنخ قطع شود جسم درراستای مماس بر مسیر به خارج پرتاب می‌شود .

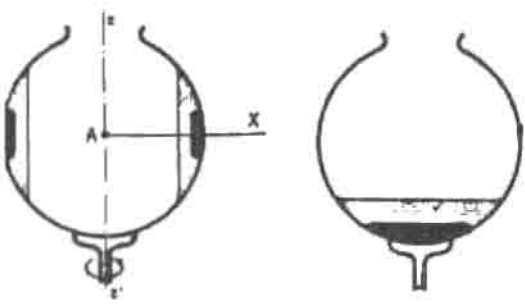
نمونه‌های زیادی از حرکت برمسیر دایره‌ای وحرکت دورانی یافت می‌شودکه درآنها نیرو به صورت گریز ازمرکزظاهر می‌شود ، به‌ویژه هنگامی که نیروی جانب مرکز لازم وجود ندارد ازجمله :

ـ گرفتن آب لباسها در ماشین لباسشوئی (پس ازشستن لباس) دراثر دوران سریع مخزن شست‌وشوی لباس . (درجدار استوانه‌ای شکل این مخزن سوراخهای ریزی است‌که در موقع چرخیدن مخزن ، آب لباسها ازاین سوراخها خارج می‌شود.

ـ انحراف مسافر درون یك اتومبیل به‌طرف خارج پیچ جاده وقتی‌که اتومبیل در یك‌پیچ جاده حرکت می‌کند .

ـ برآمدگی زمین در استوا وپهن شدن‌آن در قطبین به‌سبب دوران زمین به‌دور محورفرضی‌که از قطبین آن می‌گذرد . اندازه‌گیریهای دقیق نشان می‌دهدکه قطر زمین دراستوا درحدود ۴۵ کیلومتر بزرگتر ازقطری است‌که از دوقطب زمین می‌گذرد.

ـ درشکل (۳-۴ ـ ب) ظرف محتوی آب و جیوه با سرعت زیاد به دورمحور قائم می‌چرخد .



ب الف

شکل ۳-۴- دوران سریع مایعات

الف ـ تعادل مایعات درحال‌سکون .

ب ـ تعادل درحال حرکت دورانی .

چون جرم حجمی جیوه ۱۳/۶ برابر جرم حجمی آب است نیروی اینرسی وارد بر جرم واحد حجم جیوه نیز ۱۳/۶ برابر نیروی اینرسی وارد بر جرم واحد حجم آب است. درنتیجه جیوه نسبت به آب از محور دوران بیشتر دور می‌شود. به‌عبارت دیگر، نیروی جانب مرکز که ازطرف جدار ظرف برجرم واحدحجم جیوه وارد می‌شود بزرگتر ازنیروی جانب مرکزاست که برجرم حجمی آب وارد می‌گردد.

این پدیده اساس کار دستگاههای سانتریفوژ و اولتراسانتریفوژ (سانتریفوژهای بسیار سریع) را تشکیل می‌دهدکه توسط آنها می‌توان مواد مختلف باجرمهای حجمی متفاوت راکه درحلالی حل‌شده‌اند ازیکدیگرجداکرد.

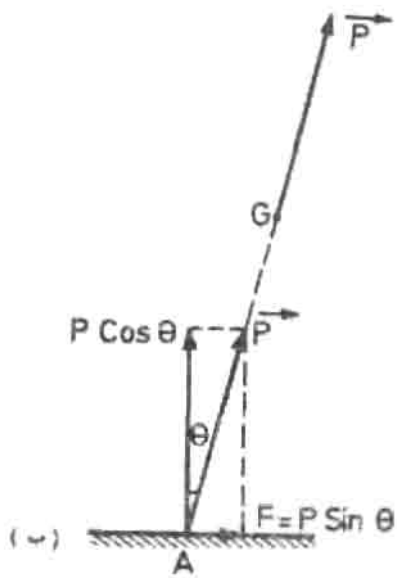
۳- حرکت درپیچ جاده - وقتی که یك دوچرخه‌سوار یا یك موتور سوار درپیچ یك‌جاده با سرعت ثابت حرکت می‌کند، در صورتی‌که سطح جاده افقی باشد نیروی جانب‌مرکزی‌که اورا برروی مسیر دایره‌ای نگاه می‌دارد اصطکاك جانبی بین لاستیك چرخها وسطح جاده است. برای ایجاد این اصطکاك، دوچرخه‌سوار (یا موتورسوار) به‌طرف داخل پیچ کج می‌شود (شکل ۳-۵).

درنظربگیریم که دوچرخه سواری دریك پیچ جاده مسیر دایره‌ای به‌شعاع R را باسرعت ثابت v می‌پیماید و راستای دوچرخه‌سوار با امتداد قائم زاویه θ می‌سازد (شکل ۳-۵ - الف). نیروی عکس‌العمل زمین برلاستیك چرخهاکه آنرا به $\vec{P}$ نمایش‌داده‌ایم با راستای قائم نیز زاویه θ می‌سازد. همنه‌های این‌نیرو در دوراستای افقی‌وقائم به‌ترتیب عبارتند از $P\sin\theta$ و $P\cos\theta$ (شکل ۳-۵ - ب).

همنه‌افقی $F = P\sin\theta$ همان‌نیروی جانب‌مرکز است که سبب نگهداشتن دوچرخه سوار بر مسیر دایره‌ای می‌شود وطبق قانون دوم نیوتن‌داریم:

$$P\sin\theta = m\frac{v^2}{R}$$

همنه‌قائم $P\cos\theta$ در واقع عکس‌العمل نیروی وزن مجموعه دوچرخه و دوچرخه‌سواراست‌وداریم:



شکل ۳-۵- دوچرخه‌سوار در پیچ جاده به‌طرف داخل پیچ کج می‌شود.

$$P\cos\theta = w = mg$$

ازتقسیم این دو رابطه برهم نتیجه می‌شود :

$$tg\theta = \frac{v^2}{Rg} \qquad (۱۶-۳)$$

(این حرکت شبیه به‌حرکت پاندول‌مخروطی است وبرای این‌که وجه تشابه این دوحرکت‌آشکار شود نیروهای وارد برمتحرك را به وسیله بردار ، ازمرکزثقل G نمایش داده‌ایم)

رابطه(۳-۱۶) نشان می‌دهدکه میزان کج‌شدن دوچرخه سوار از راستای قائم ، بستگی به سرعت حرکت وشعاع دایره‌مسیر دارد . هرچه‌سرعت بیشتر و شعاع دایره مسیر کوچکتر باشد زاویه θ بزرگتر است . مثلا اگر :

$$v = ۱۸\frac{km}{h} = ۵\frac{m}{s} \quad \text{و} \quad R = ۱۰m \quad \text{باشد}$$

$$tg\theta = \frac{۵^2}{۱۰ \times ۹/۸۰} \simeq ۰/۲۶$$

$$\theta \simeq ۱۴/۵^\circ \quad \text{و}$$

باید درنظرداشت‌که زاویه انحراف θ محدود است ، زیرا نیروی اصطکاك جانبی که بستگی به وضعیت سطح جاده و لاستیکها دارد نمی‌تواند ازحد معینی تجاوزکند . درصورتی‌که اصطکاك سطح‌جاده به‌علت یخبندان یا عوامل‌دیگرخیلی‌کم شود، اندازه نیروی جانب مرکزی نیز خیلی کم می‌گردد و دوچرخه‌سوار نمی‌تواند باسرعت درپیچ جاده بپیچد و در راستای مماس برمسیر سر می‌خورد وبه‌خارج جاده پرتاب می‌شود .

مطالبی‌که در بالا گفته شد درباره حرکت یك اتومبیل یا بك‌ترن درپیچ جاده نیز صادق است . و برای این‌که تعادل این وسائط نقلیه در پیچهای تند جاده حفظ شود سطح جاده را به داخل پیچ شیب می‌دهند . زاویه شیب طبق‌رابطه۳-۱۶ برای‌سرعت معینی درنظرگرفته می‌شود .

شکل۳-۶ شیب عرضی جاده‌ای‌راکه دریکی ازمیدانهای مخصوص مسابقات اتومبیل‌رانی درست شده است نشان می‌دهد .

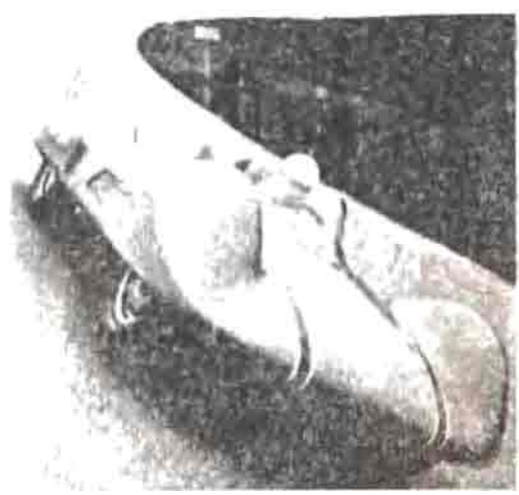
قانون جاذبهٔ عمومی نیوتن

مشهوراست‌که‌نیوتن ازافتادن سیب از درخت الهام‌گرفت و قانون جاذبهٔ عمومی را پایه‌گذاری کرد . نیوتن نخست پی‌برد که نیرویی که براشیاء مجاور زمین وارد می‌شود وسبب سقوط آنها می‌گردد از نوع همان نیروئی است‌که درمنظومه شمسی بین خورشید و سیاره‌ها وجود دارد ، سپس نظر خود را تعمیم داد و قانون جاذبهٔ عمومی را به صورت زیر بیان کرد :

هردو جسم یکدیگر را با نیروئی جذب می‌کنند که با حاصل ضرب جرمهای آنها نسبت مستقیم و با مجذور فاصلهٔ آنها از هم نسبت معکوس دارد.

مثلا اگر دو جسم به‌جرمهای m_1 و m_2 به

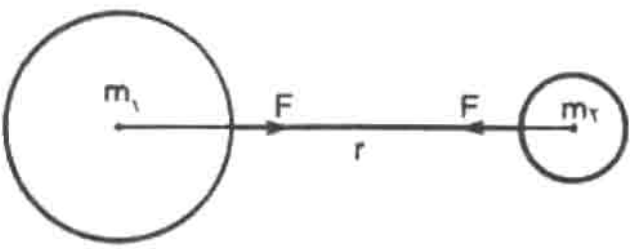
شکل ۳-۶- شیب عرضی جاده در یك میدان مخصوص مسابقات اتومبیل‌رانی .



فاصله r از یکدیگر قرارگرفته باشند (شکل ۳-۷) قانون جاذبهٔ عمومی دربارهٔ آنها به‌صورت زیرنوشته می‌شود.

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad (۱۷-۳)$$

ضریب ثابت G که « ثابت جهانی جاذبه » نامیده می‌شود بستگی به واحدهای انتخاب شده دارد: اگر F برحسب نیوتن و m_1 و m_2 برحسب



شکل ۳-۷- نیروی جاذبه‌ای که دوجسم برهم وارد می‌سازند باجرمهای آنها نسبت مستقیم و بامجذور فاصله آنها ازهم نسبت معکوس‌دارد.

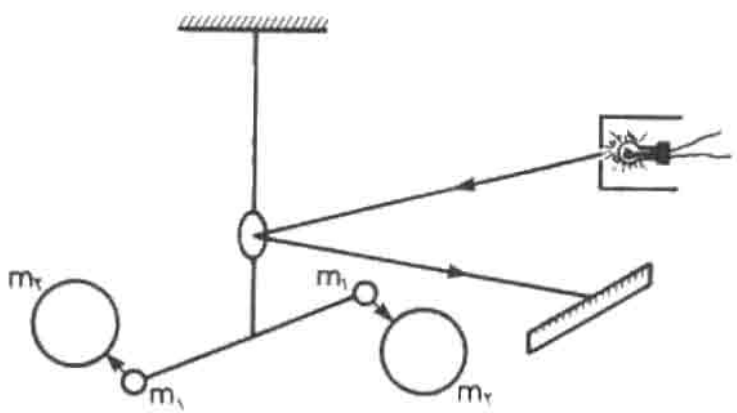
کیلوگرم و r برحسب متر باشد اندازه G تا چ
رقم معنی دار برابر است با :

$$G = ۶/۶۷۳ \times ۱۰^{-۱۱}\ \frac{N.m^2}{kg^2}$$

پرسش ۳-۷- به‌نظر شما آیا رابطهٔ (۳-۷
درمورد هردوجسم به‌هرشکل که باشند صادق اس

پس از آن که نیوتن قانون جاذبه عمومی
کشف کرد دانشمند دیگری به نام هنری‌کاوندیش
با آزمایشی دقیق و مشکل موفق شد G را معین ک

آزمایش کاوندیش - شکل (۳-۸) طرح ساد
از اسبابی را که کاوندیش برای تعیین G به‌کار
نشان می‌دهد . این اسباب تشکیل شده است از
میلهٔ دراز و سبک که دوگلوله کوچك یکسان هر
به جرم m_1 به دو سر آن متصل است و میله
وسط توسط یك نوار باریك ونرم (ازجنس‌کوارتز
به‌طور افقی آویزان است. دو وزنه بزرگ وکرو
شکل یکسان، هریك به‌جرم m_2 را می‌توان مطا



شکل ۳-۸- طرح ساده دستگاه‌کاوندیش برای تحقیق درقانون جاذبهٔ عمومی نیوتن

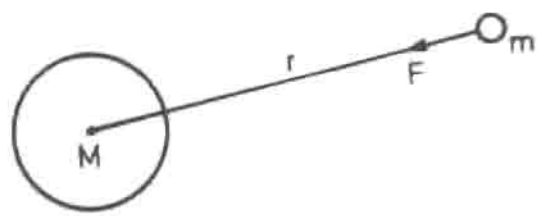
۱- Henry Cavendish (۱۸۱۰ - ۱۸۴۱ میلادی) فیزیکدان و شیمیدان انگلیسی. این آزمای
درسالهای ۱۷۹۷ و ۱۷۹۸ میلادی انجام شده است.

شکل به جرمهای m_1 نزدیک کرد. نیروهای جاذبه موجود بین جرمهای بزرگ و کوچک، یک‌جفت‌نیرو (دونیروی‌مساوی ومواژی ومختلف‌الجهت) تشکیل می‌دهند که سبب می‌شود دستگاه حول محور قائم کمی بچرخد. روی نوارآینه‌کوچکی نصب شده‌است و بازتابش پرتو نوری‌که به‌این‌آینه می‌تابد برروی درجات یک صفحهٔ مدرج اندکی جابجا می‌شود. این جابجائی توسط یک دوربین کوچک به‌دقت اندازه‌گیری و زاویه چرخش میله معین می‌شود. با تعیین زاویه چرخش و اندازه‌گیری تاب نوار، نیروی F معین می‌گردد و چون جرمهای m_1 و m_2 و فاصله آنها از یکدیگر معلوم است اندازه G حساب می‌شود.

موارد کاربرد قانون جاذبه عمومی

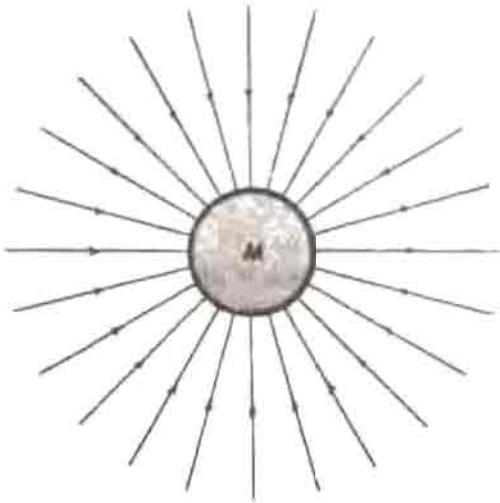
موارد‌کاربرد قانون جاذبهٔ عمومی بسیاراست و دراین جا ما فقط به‌چند مورد اشاره می‌کنیم.

۱ ـ قانون جاذبه ـ شدت میدان جاذبه ـ مفهوم میدان جاذبه را می‌توان از قانون جاذبه عمومی استنباط‌کرد: درشکل (۳ـ ۹) جسم بزرگی به‌جرم



شکل۳ـ۹ـ نیروی جاذبه بین دوجسم نیروی کششی است‌که از فاصله اعمال می‌شود

M نشان داده شده است‌که جسم‌کوچکی به‌جرم m را ازفاصله r بانیروی جاذبهٔ F جذب می‌کند. اندازه نیروی F طبق قانون جاذبه عمومی از این رابطه



شکل ۳ـ۱۰ـ خطوط میدان جاذبه در اطراف یک جسم‌کروی شعاعی ومتوجه مرکزکره‌اند

حساب می‌شود:

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

با وجود این‌که دو جسم باهم درتماس نیستند و بین آنها فاصله موجود است این نیرو اعمال می‌شود. برای توجیه علت اثر این نیرو در اطراف جسم میدان جاذبه درنظر گرفته می‌شود.

میدان جاذبه بنابه‌تعریف، عبارتست ازفضائی که در آن فضا اثرهای نیروی جاذبه وجود دارد. میدان‌جاذبه، مانند میدان‌الکتریکی، باخطوط میدان نمایش داده می‌شود. شکل (۳ـ۱۰) خطوط میدان جاذبه را دراطراف یک‌جسم‌کروی شکل همگن نشان می‌دهد و جهت میدان همواره متوجه مرکز جسم است.

شدت میدان جاذبه ـ شدت میدان‌درهرنقطه ازیک‌میدان‌جاذبه‌عبارتست‌ازنیروئی‌که برواحدجرم‌واقع درآن نقطه وارد می‌شود وبرحسب واحد $\frac{\text{نیوتن}}{\text{کیلوگرم}}$

بیان می‌گردد . مثلا شدت میدان جاذبه زمین در نقطه‌ای واقع برسطح زمین، به‌فرض این‌که‌تمام‌جرم زمین را درمرکز آن متمرکزفرض‌کنیم برابراست با:

$$g = \frac{F}{m} = G\frac{M_e}{R_e'} \qquad (۱۸-۳)$$

M_e جرم زمین و R_e شعاع آن است .

رابطهٔ (۱۸-۳) نشان می‌دهدکه شدت میدان جاذبهٔ زمین بستگی به‌جرم جسمی‌که درمیدان قرار می‌گیرد ندارد بلکه تابع جرم و شعاع زمین است . شدت میدان جاذبه زمین در تمام نقاطی‌که از مرکز زمین به‌یک‌فاصله هستند یکسان است و با تغییر این فاصله تغییر کند شدت میدان نیز تغییر می‌کند.

نیروئی‌که در این میدان بر جسمی به‌جرم m وارد می‌شود برابر mg یعنی وزن جسم است :

$$F = G\frac{M_e}{R_e'} \cdot m = mg \qquad (۱۹-۳)$$

بدیهی‌است‌جسم‌تحت اثر این نیرو، به‌طورآزاد در راستای خطوط میدان باشتاب g سقوط می‌کند ، بنابراین‌اندازه‌شتاب حاصل از نیروی جاذبه درهرنقطه ازمیدان برابر اندازه‌شدت میدان جاذبه درآن نقطه است .

پرسش ۳-۸ـ نشان دهیدکه دیمانسیون شدت میدان جاذبه و شتاب درمیدان جاذبه یکی است.

۲ـ محاسبهٔ جرم زمین. اگر رابطه (۳-۱۸) را به صورت :

$$M_e = \frac{g}{G}R_e'$$

بنویسیم با اندازه‌گیری g (شتاب جاذبه) و R_e (شعاع متوسط زمین) ، M_e جرم زمین حساب می‌شود. به‌ازای :

$$G = ۶/۶۷۳ \times ۱۰^{-۱۱}\frac{N.m^۲}{kg^۲} \text{ و } g = ۹/۸۰\frac{N}{kg}$$

و $R_e = ۶۳۷۰^{km} = ۶/۳۷۰ \times ۱۰^۶ m$ خواهیم داشت:

$$M_e = \frac{۹/۸۰\left(\frac{N}{kg}\right)}{۶/۶۷۳ \times ۱۰^{-۱۱}\left(\frac{N.m^۲}{kg^۲}\right)} \times (۶/۳۷ \times ۱۰^۶ m)^۲ \approx ۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴} kg$$

اگرحجم زمین را از رابطهٔ $V = \frac{۴}{۳}\pi R_e'^۳$ حساب کرده جرم زمین را برحجم آن تقسیم کنیم جرم حجمی متوسط زمین درحدود $۵۴۰۰\frac{kg}{m^۳}$ یا $۵/۴\frac{g}{cm^۳}$ به‌دست می‌آید.

جرم حجمی متوسط بیشترسنگهای موجود در سطح زمین درحدود $۲۷۰۰\frac{kg}{m^۳}$ یا $۲/۷\frac{g}{cm^۳}$ است با توجه به جرم حجمی متوسط زمین $\left(۵۴۰۰\frac{kg}{m^۳}\right)$ چنین‌استنباط می‌شودکه جرم‌حجمی متوسط مواد درون زمین باید بین ۸۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ $\frac{\text{کیلوگرم}}{\text{مترمکعب}}$ باشد. این مطلب دور از واقعیت نیست، زیرا جرم حجمی فلزات درون زمین در همین حدود است و درنتیجه جرم $۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴} kg$ برای زمین منطقی به نظر می‌رسد.

۳ـ حرکت ماهواره‌ها به‌دور زمین ـ ماهواره‌ها به‌گرد زمین مدارهای بیضی‌شکلی می‌پیمایندکه بعضی از آنها به دایره خیلی نزدیکند . در این جا از نظر

سادگی محاسبه مدارماهواره را دایره درنظرمی گیریم وسرعت حرکت ماهواره و زمان گردش یك دور کامل آن را حساب می کنیم.

نیروئی که‌ماهواره را درمدارخود نگاه می‌دارد نیروی جاذبه زمین است واین نیرو بنا به‌قانون دوم نیوتن به‌ماهواره شتاب جانب مرکزی می‌دهدکه در رابطه زیر صادق است :

$$F = G\frac{mM_e}{r^2} = m\frac{v^2}{r}$$

که در آن v سرعت حرکت ماهواره در روی مدار خود و r شعاع مدار و m جرم ماهواره است . از این رابطه سرعت حرکت ماهواره حساب می‌شود.

$$\boxed{v = \sqrt{\frac{GM_e}{r}}} \qquad (۲۰-۳)$$

از رابطه (۱۸-۳) نتیجه می‌شود

$$GM_e = gR_e^2$$

و از مقایسه این رابطه با رابطهٔ (۲۰-۳) نتیجه می‌شود :

$$v = \sqrt{\frac{gR_e^2}{r}}$$

و یا :

$$\boxed{v = R_e\sqrt{\frac{g}{r}}} \qquad (۲۱-۳)$$

برید حرکت ماهواره، یعنی زمان لازم برای یك دور کامل گردش به‌گرد زمین برابر است با :

$$\boxed{T = \frac{2\pi r}{v}} \qquad (۲۲-۳)$$

هرچه شعاع مدار ماهواره بزرگتر باشد سرعت آن کوچکتر و برید حرکت آن بزرگتر است .

مثال ـ یك ماهواره مخابراتی درفاصله ۹۰۰ کیلومتری سطح زمین روی‌یك مدار دایره‌ای شکل به‌گرد زمین می‌گردد. سرعت ماهواره وبرید حرکت آن را حساب کنید . شعاع متوسط زمین ۶۳۷۰ کیلومتر است.

ـ سرعت حرکت ماهواره برابر است با (۱) :

$$v = R_e\sqrt{\frac{g}{r}}$$

به ازاء $R_e = 6370^{km} = 6/37 \times 10^6 m$

و $g = 9/80\ \frac{m}{s^2}$

$r = 6370 + 900 = 7270^{km} = 7/27 \times 10^6 m$

داریم :

$$v = 6/37 \times 10^6 m\sqrt{\frac{9/80\left(\frac{m}{s^2}\right)}{7/27 \times 10^6 (m)}}$$

$$\approx 7/41 \times 10^3\frac{m}{s} = 7/41\ \frac{km}{s}$$

برید حرکت ماهواره برابر است با :

۱ـ چون جرم زمین (M_e) و ثابت جهانی جاذبه (G) معلوم است سرعت v را می‌توان مستقیماً از رابطه (۲۰-۳) نیز حساب کرد.

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2 \times 3/14 \times 7/27 \times 10^6 (m)}{7/41 \times 10^3 \left(\frac{m}{s}\right)}$$

$\approx$ ۶۱۶۱ ثانیه $\approx$ ۱۰۳ دقیقه

رابطه (۳ـ۲۱) نشان می‌دهد که سرعت حرکت ماهواره به‌جرم آن بستگی ندارد، در نتیجه هر جسم (جرم آن هرچه باشد) وقتی که باسرعت ۷ برروی مداری به‌شعاع r به‌گرد زمین می‌گردد شعاع مدار وسرعت آن همواره ثابت می‌ماند. به‌همین جهت اگر یك فضا نورد درسفینهٔ فضائی خود جسمی، مثلا یك لیوان آب را جلو دهان خود رها کند لیوان از نظر اوهمان جامی‌ماند ومی‌تواندآب را بیاشامد. هم‌چنین فضانورد درون کپسول خود در حال بی‌وزنی معلق می‌ماند.

خودتان آزمایش کنید

با انجام آزمایش زیر می‌توانید پی ببرید که چگونه نیروی جانب مرکز، بستگی به جرم و سرعت جسم و فاصله آن از مرکز دایره مسیر دارد:

لوله شیشه‌ای به طول تقریبی ۲۰ سانتیمتر را که هر دو سر آن باز است انتخاب کنید و اگر دو سر آن ناصاف و برنده است روی شعله بگیرید تا صاف شود. قطعه نخی به طول تقریباً یك متر را از آن بگذرانید وبه یك سر این نخ گلوله کوچکی مانند یك ساچمه را که جرم آن معلوم است (مثلا ۵ گرم) ببندید (در صورتی که گلوله جا برای بستن نخ ندارد می‌توانید آن را در یك قطعه کوچك نایلون بگذارید و اطراف نایلون را جمع کنید و نخ را به نایلون ببندید). به سر دیگر نخ وزنه بزرگتری بیاویزید (یا نیروسنجی به بندید). روی نخ، درفاصله معینی از مرکز گلوله (مثلا ۳۰ سانتیمتر) نشانه‌ای با جوهر بگذارید. لوله شیشه‌ای‌را درراستای قائم نگاهدارید وبه‌وسیله‌آن‌گلوله راباالای سرخود درسطح افقی بگردانید. تعداد دورها را طوری تنظیم کنید تا نشانه روی نخ درست برلبه بالائی لوله قرارگیرد (دراین حالت شعاع دایره مسیر معلوم ومثلا ۳۰ سانتیمتر است) ودرحالتی‌که شعاع دایره مسیرثابت است تعداد دورهای گلوله را طوری تنظیم کنید تا سنگینی وزنه آویخته شده با نیروی کشش نخ برابر شود و وزنه به حال تعادل قرارگیرد (یااگر از نیروسنج‌استفاده کرده‌اید نیروی ثابتی را نشان دهد). تعداد دورهای کامل گلوله را درمدت ۱۰ ثانیه بشمارید وبرید حرکت آن را معین کنید. چون سنگینی وزنه (یا نیروئی که نیروسنج نشان می‌دهد) برابر نیروی جانب مرکز است درستی رابطهٔ زیررا می‌توانید تحقیق کنید.

$$F = mr.\frac{4\pi^2}{T^2}$$

m جرم گلوله ، r شعاع

که به سر دیگر نخ آویخته شده است (ویا نیروی ثابتی است که نیروسنج نشان می‌دهد) . در صورتی‌که از نیروسنج استفاده می‌کنید مواظب باشید که در اثر باز شدن فنر نیروسنج، شعاع دایره‌مسیر تغییر نکند وبرای این منظورنیروسنج را پائین بیاورید.

جرم m و شعاع r و پرید T را جداگانه تغییر دهید و اثر هر یك را در میزان تغییر نیروی جانب مرکز بررسی کنید . سعی کنید لوله شیشه‌ای تا جائی که ممکن است حرکت کوچکی داشته باشد تا شعاع دایره مسیر تقریباً ثابت بماند . بهتر این است که این آزمایش را به صورت گروهی انجام دهید .

به این پرسشها پاسخ دهید :

۱) ـ در حرکت یکنواخت بر مسیر دایره‌ای چرا با آن که سرعت ثابت است شتاب وجود دارد ؟

۲) ـ اگر حرکت برمسیر دایره‌ای یکنواخت نباشد آیا شتاب جانب مرکز وجود دارد ؟ درصورتی‌که جواب مثبت است آیا شتاب دیگری هم وجود دارد ؟ توضیح دهید .

۳) ـ چرا نیروی جانب مرکز لازم است تا جسمی بر مسیر دایره‌ای حرکت کند ؟ نیروی گریز از مرکز چیست ؟ آیا ممکن است بدون نیروی جانب مرکز نیروی گریز ازمرکز وجود داشته باشد ؟ توضیح دهید .

۴) ـ چرا وقتی که اتومبیل در یك روز بارانی به سرعت در جاده حرکت می‌کند قطره‌های آب مماس برچرخها به خارج پرتاب می‌شوند؟

۵) ـ گلوله‌ای به انتهای نخی بسته شده ودر سطح افقی حول نقطه ثابتی می‌گردد . اگرطول نخ نصف وسرعت زاویه‌ای حرکت دوبرابر شود نیروی کشش نخ چند برابرخواهدشد؟

۶) ـ دوچرخه سواری مسیر دایره‌ای شکل را با سرعت ۷ دور می‌زند . اگر دوچرخه سوار همان مسیررا با سرعت ۲۷ دوربزند کدام یك ازکمیتهای زیر دوبرابر می‌شود ؟

۱ـ شتاب جانب مرکز ۲ـ زاویه انحراف دوچرخه سوار از راستای قائم

۳ـ سرعت زاویه‌ای ۴ـ پرید دور زدن

۷) ـ اتومبیلی با سرعت ثابت دوپیچ متوالی جاده‌ای را برمسیرهای دایره‌ای می‌پیماید . اگر شعاع مسیرآن درپیچ اول دوبرابر شعاع مسیرآن درپیچ دوم باشد نیروهای جانب مرکز مؤثر بر اتومبیل را دراین دوپیچ متوالی با هم مقایسه کنید .

۸) ـ وزنه سنگینی بـه انتهای ریسمانی به طول ثابت بسته شده و در سطح قائم باپرید ثابت حول نقطه ثابتی می‌گردد. کدام یك ازکمیتهای زیردرضمن حرکت این وزنه ثابت می‌ماند؟

۱ـ تعداد دورها درثانیه ۲ـ سرعت زاویه‌ای

۳ـ سرعت حرکت برروی مسیر ۴ـ نیروی کشش ریسمان

جواب خود را با استدلال بیان کنید .

۹) ـ چرا نیروی جاذبهٔ بین دوجسم معمولی، مثلا دوکتاب قابل توجه نیست ؟

۱۰) ـ نیروی جـانب مرکزی که یك مـاهواره را در مـدار خود بـه دور زمین نگاه می‌دارد چیست ؟

۱۱) ـ برای تعیین جرم زمین چه معلوماتی لازم است ؟

۱۲) ـ با استفاده از جرم و شعاع کـره ماه نشان دهید کـه شدت میدان جاذبه در سطح ماه در حدود $\frac{۱}{۶}$ شدت میدان جاذبه زمین است .

(جرم ماه $۷/۳۴\times۱۰^{۲۲}kg$ و شعاع ماه $۱/۷۴\times۱۰^{۶}m$ است)

۱۳) ـ از قانـون جاذبهٔ عمومی نیوتن چـه مطلبهائی نتیجه گـرفته می‌شود ؟ در بارهٔ هریك توضیح کوتاهی بدهید .

۱۴) ـ دوران زمین به‌دور خود چه تأثیری در وزن اجسام واقع در استوا و درقطبهای زمین دارد ؟

این مسئله‌ها را حل کنید

۱) ـ دور صفحه‌های بیشتر گرامافونهای تجارتی روی $۱۶\frac{۲}{۳}$ و $۳۳\frac{۱}{۳}$ و ۴۵ و ۷۸ دور در دقیقه تنظیم می‌شود . پرید مربوط به هریك ازاین دورها را حساب کنید .

۲) ـ سرعت زاویه‌ای‌حرکت دورانی‌زمین به‌دورمحور خود را دریك نقطه ازخط استوای زمین حساب کنید. شعاع استوائی زمین را ۶۴۰۰ کیلومتر بگیرید.

۳) ـ جعبه‌ای روی کف یك بارکش قـرار داد و ضریب اصطکاك لغزشی بین جعبه و کف بارکش ۰/۳۳ است معین‌کنید این بارکش دریك پیچ جاده به‌شعاع ۱۰۰ متر حداکثر باچه سرعتی می‌تواند حرکت‌کند تا جعبه برکف‌کامیون نلغزد .

جواب : $۱۸\ \frac{m}{s}$

۴) ـ وزنه‌ای به جرم ۲/۰kg به انتهای ریسمان سبکی به طول ۲/۰m بسته شده و مانند یك پاندول مخروطی برروی مسیر دایره‌ای شکلی درسطح افقی با سرعت ثابت می‌گردد. اگر امتداد ریسمان با راستای قائمی که از آویزگاه وزنه می‌گذرد زاویه ۳۰° بسازد مطلوبست

الف ـ شعاع مسیر وزنه

ب ـ سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی وزنه

پ ـ اندازه نیروی جانب مرکز و نیروی کشش ریسمان

جواب : الف) ۱ m ب) تقریباً ۲/۴ $\frac{rad}{s}$ و ۲/۴ $\frac{m}{s}$ پ) ۱۱/۵N و ۲۳N

۵) ـ شخصی یك سطل محتوی آب را در سطح قائم برمسیر دایره‌ای به شعاع یك متر می‌چرخاند. مطلوبست حداقل سرعت لازم برای این‌که آب درون سطل نریزد.

جواب : ۳/۱۳ $\frac{m}{s}$

۶) ـ اگر کره زمین فاقد هوا بود چه زمانی طول می‌کشید تا یك ماهواره در مجاورت سطح زمین (به فاصله مثلا ۶۴۰۰ کیلومتر از مرکز زمین) یك دورکامل به‌دور زمین بگردد وسرعت آن چه اندازه بود؟ توضیح دهید چرا غیرممکن است‌که پرید حرکت یك ماهواره به‌دور زمین کمتر از ۸۰ دقیقه باشد؟

۷) ـ می‌دانیم در مدل اتمی بور اتم هیدرژن تشکیل یافته است از یك الکترون با بار الکتریکی e− که به‌دور یك پروتون با بار الکتریکی e+ می‌گردد. با توجه به این‌که بار الکتریکی الکترون تقریباً $۱/۶\times۱۰^{-۱۹}$ کوان وجرم آن $۹/۱\times۱۰^{-۳۱}$ کیلوگرم است در حالتی‌که شعاع مدار الکترون ثابت است نسبت بین نیروی جاذبهٔ الکتریکی‌کولنی و نیروی جاذبهٔ عمومی نیوتنی بین الکترون و پروتون را در اتم هیدرژن حساب‌کنید. کدام یك از این دونیرو در نگاهداشتن الکترون برروی مدار حرکت خود مؤثر است؟ آیا نیروی جاذبهٔ نیوتنی درمقابل‌جاذبه‌الکتریکی‌کولنی قابل توجه‌است؟ جرم پروتون‌تقریباً ۲۰۰۰ برابرجرم‌الکترون‌است.

یادآوری : ثابت نیروی الکتریکی کولنی $k=۹/۰\times۱۰^{۹}\frac{N.m^{۲}}{c^{۲}}$ و ثابت جهانی جاذبه $G=۶/۶۷۳\times۱۰^{-۱۱}\frac{N.m^{۲}}{kg^{۲}}$ است.

جواب : $\frac{\text{نیروی الکتریکی}}{\text{نیروی جاذبه}}\simeq۲/۱\times۱۰^{۳۹}$

درجواب قسمتهای بعدی بحث لازم است .

۸)چه سرعتی باید یك ماهواره داشته باشد تا در مداری به شعاع ۶۷۰۰ کیلومتر (یعنی درفاصله ۶۷۰۰ کیلومتری مرکز زمین) به‌گرد زمین بگردد ؟

جواب : تقریباً $۷/۸ \frac{km}{s}$

۹)جرم زمین تقریباً ۸۰ برابر جرم ماه است. اگر فاصله بین مرکزهای زمین و ماه را به۲ نمایش دهیم معین کنید درچه نقطه‌ای ازاین فاصله نیروهای جاذبه ماه وزمین برروی یك سفینه فضائی‌که عازم‌کره ماه است باهم برابر می‌شود.

جواب : تقریباً در فاصله ۲ $\frac{۷۱}{۷۹}$ ازمرکز زمین

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۳

۳-۱) ـ فقط معرف سرعت متوسط . برای محاسبه سرعت لحظه‌ای کافی است از معادلهٔ مسیر مشتق بگیریم .

۳-۲) ـ $T^{-۱}$

۳-۳) ـ کافی است از رابطهٔ $S=R\theta=R\omega t$ که در واقع معادلهٔ مسیرحرکت است نسبت به زمان مشتق بگیریم.

$$v=\frac{ds}{dt}=R\omega$$

۳-۴) ـ علت این است‌که جسم در اثر تندی که کسب می‌کند و راستای آن همواره بردایره مسیر مماس است می‌خواهد طبق قانون ماند درامتداد مماس‌بردایره مسیربه‌حرکت خود ادامه دهد ولی نیروی جانب مرکز مانع ادامه این حرکت شده وجسم را مجبور می‌کند برمسیر دایره‌ای حرکت نماید .

۳-۵) ـ بلی ، این شتاب ناشی از تغییر مقدار سرعت $\left(\frac{\Delta v}{\Delta t}\right)$ است که در راستای بردار سرعت (یعنی مماس برمسیر حرکت) است و شتاب مماسی نامیده می‌شود .

۳-۶) ـ کافی است در رابطه (۳-۱۵) به جای ω مقدار $\frac{۲\pi}{T}$ را قرار دهیم و T را حساب کنیم :

$$\frac{1}{\cos\theta} = \frac{1 \cdot 4\pi^2}{gT^2}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l\cos\theta}{g}}$$ و

۳-۷) - این رابطهٔ اصولا برای جرمهای نقطه‌ای (یعنی جرمهائی که بنا به‌فرض در یك نقطه متمرکز شده‌اند) درنظر گرفته شده‌است. کاربرد این‌قانون درباره خورشید و سیاره‌های دیگر کاملا مجاز است، زیرا فاصله‌های سیاره‌ها از خورشید نسبت به‌ابعادشان آن قدر زیاد است که می‌توانیم ابعاد آنها را درمقابل فاصله‌شان ناچیز بگیریم. این رابطه درمورد اجسام جامد کروی شکل و همگن نیز به‌درستی صادق است به شرط آن‌که فرض‌کنیم تمام جرم آنها درمرکز کره متمرکز است. دراین صورت r فاصله بین مرکزهای دوکره خواهد بود.

۳-۸) - شدت میدان عبارتست از نیروی وارد برواحد جرم و برحسب $\frac{N}{kg}$ بیان می‌شود و دیمانسیون آن چنین است :

$$\frac{MLT^{-2}}{M} = LT^{-2}$$

و می‌دانیم‌که LT^{-2} دیمانسیون شتاب است.

۴

کار ـ انرژی

می‌دانیم انـرژی به‌صورتهای مختلف مانند گرمـا ، صوت ، نور ، انرژی مکانیکی ، انرژی شیمیائی ، انرژی الکتریکی ، انرژی هسته‌ای و . . . ظاهر می‌شود . هر یك از این انرژیها در زندگی ما دارای اهمیت بسیار است به طوری‌که می‌توان گفت انرژی در میان مظاهر دیگر طبیعت مهمترین نقش را به‌عهده دارد، زیرا معرف جوهر و ماهیت اشکال مختلف ماده است.

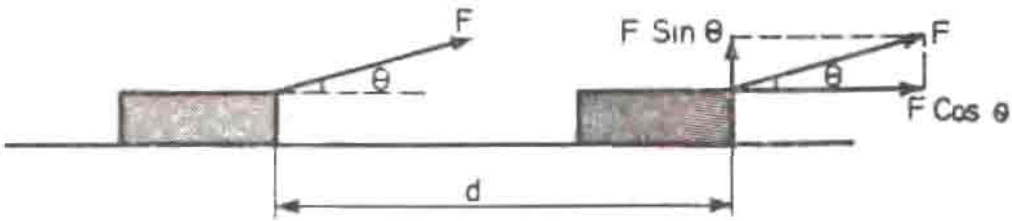
«کار» دارای مفهـوم فیزیکی دیگـری است کـه با انرژی ، به ویژه انرژی مکانیکی ارتباط نزدیك دارد . در فیزیك سال اول با مفاهیم کار و انرژی به‌خوبی آشنا شده‌اید؛ دراین جا نیز این مفاهیم فیزیکی را با تفصیل بیشتری‌دنبال خواهیدکرد . چون برای تعریف انرژی می‌توان از مفهوم کار استفاده‌کرد دراین بخش نخست مفهوم فیزیکی کار را دنبال خـواهیم کرد سپس به بیان رابطهٔ کار و انرژی خواهیم پرداخت.

کار

می‌دانیم کار ازنظرفیزیکی وقتی انجام می‌گیرد که نیروئی سبب جا به‌جا شدن نقطه اثرخود شود. بنابراین ساده‌ترین تعریف‌کـار در فیزیك ایـن است که بگوئیم کار برابراست باحاصل ضرب اندازه نیرو دراندازه جابه‌جایی نقطهٔ اثرنیرو در راستایی‌که نیرو اثر می‌کند . مثلا اگـر نقطه اثر نیروی ثابت $\vec{F}$ در راستای نیرو به‌اندازه d جا به‌جا شودکار انجام شده برابر است با :

$$W = F.d \qquad (۱-۴)$$

اگرنیروی $\vec{F}$ در راستای جا به جایی نباشد بدیهی است همه این‌نیروصرف تغییر مکان جسم‌نمی‌شود و برای محاسبهٔ کار باید « همه نیرو در راستای جا به جایی» را درنظربگیریم. مثلا اگرجسمی در راستای افقی جا به‌جا شود ونیروی $\vec{F}$ وارد برآن باراستای جا به جایی زاویه θ بسازد (شکل۴ـ۱) اندازه همه‌های این نیرو در دو راستای افقی وقائم‌به‌ترتیب $F\cos\theta$ و $F\sin\theta$ خـواهند بود. همه قائم $F\sin\theta$ کار انجام نمی‌دهد زیرا برراستای افقی تغییر مکان جسم عمود است وجسم هم در راستای قائم جابه‌جا



$$W = (F\cos\theta)d = F(d\cos\theta)$$

شکل ۴-۱- برای محاسبه کار باید نیرو و جا به جایی هردو دریك راستا منظور شوند.

نمی‌شود ولی این همنه سبب می‌شود که جسم فشار کمتری برسطح افقی وارد سازد و در نتیجه نیروی اصطکاك کمتر شود.

پرسش ۴-۱ - آیاممکن‌است همنه قائم $F\sin\theta$ درمواردی سبب افزایش نیروی اصطکاك شود؟

همنه $F\cos\theta$ در راستای جا به جایی است و تنها این همنه‌است که کار انجام می‌دهد بنابراین اندازه کار همنه $F\cos\theta$ وقتی که جسم به اندازه d جا به جا می‌شود برابر است با :

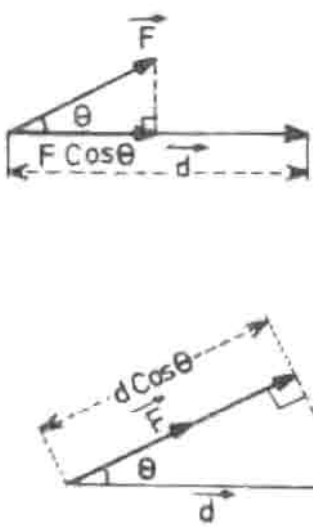
$$W = F\cos\theta . d = F . d\cos\theta \qquad (۴-۲)$$

رابطه (۴-۲) نشان می‌دهد که کار بستگی به‌سه عامل نیرو، جا به جایی و زاویه بین راستاهای نیرو و جابه‌جایی دارد. درحالتی که $\theta = ۰^\circ (\cos\theta = ۱)$ باشدنیرو در راستای جابه‌جایی است و $W = F \cdot d$ است. و درحالتی که $\theta = ۹۰^\circ (\cos\theta = ۰)$ باشد نیرو بر راستای جا به‌جایی عمود و $W = ۰$ است. به‌همین‌جهت وقتی که جسمی‌روی سطح افقی جابه‌جا می‌شود نیروی وزن‌آن‌کار انجام نمی‌دهد زیرا راستای آن برامتداد جابه‌جایی عمود است.

پرسش ۴-۲- اگر $\theta > ۹۰^\circ$ باشد کسینوس θ منفی و درنتیجه کارمنفی است. کارمنفی چه مفهومی دارد.

از طرف دیگر رابطه ۴-۲ نشان می‌دهد که علامت و مقدار کار بستگی به‌ترتیب عوامل ضرب (یعنی F و d و $\cos\theta$) ندارد (شکل ۴-۲).

بدیهی‌است $F\cos\theta$ تصویرنیروی F برراستای تغییر مکان و $d\cos\theta$ تصویر تغییر مکان بر راستای نیرواست. این‌خاصیت محاسبه کار را در مواردی‌که نیرو و امتداد آن ثابت ولی جا به‌جایی غیرمشخص است‌آسان می‌کند. مثلاً کار لازم‌برای انتقال جسمی



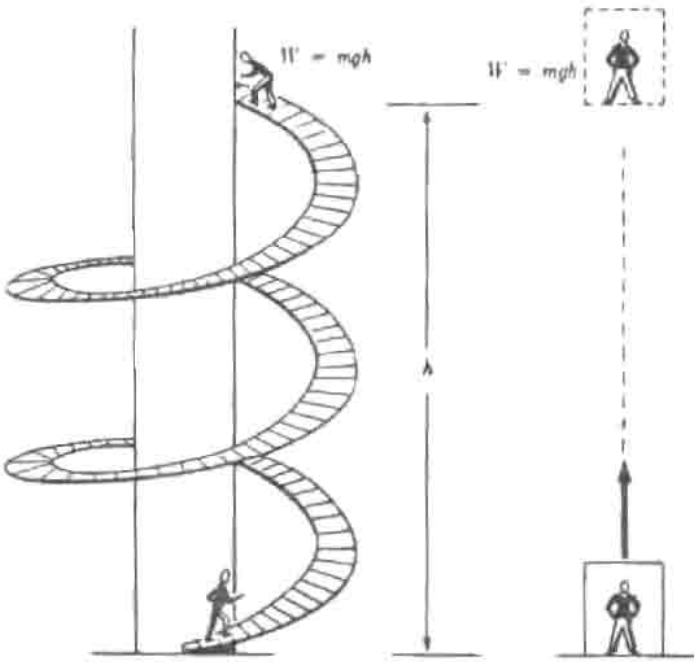
شکل ۴-۲

$$W = F\cos\theta \cdot d = F \cdot d\cos\theta$$

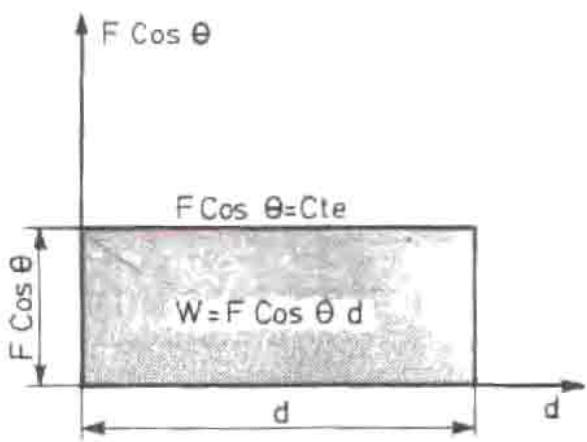
به جرم m و به وزن mg از سطح زمین به ارتفاع h، در صورتی که اصطکاک درکار نباشد برابر است با:

$$W = mg.h$$

که فقط بستگی به ارتفاع h دارد نه به مسیری که جسم در روی آن انتقال داده می‌شود (شکل ۴-۳)



شکل ۴-۳- اگر اصطکاک درکار نباشد کار لازم برای بالابردن جرم m به ارتفاع h برابر است با W = mgh



شکل ۴-۴- وقتی‌که نیروی $\vec{F}$ و راستای آن ثابت است اندازه کار برابر است با مساحت مستطیلی که ابعاد آن $F\cos\theta$ و d می‌باشند.

رابطهٔ (۴-۲) و نمودار شکل (۴-۲) نشان می‌دهند وقتی‌که نیروی $\vec{F}$ و راستای آن ثابت است اندازهٔ‌کار W برابر مساحت مستطیلی است‌که ابعاد آن d و $F\cos\theta$ هستند. نمایش‌کار به وسیله نمودار مهم است، زیرا درمواردی هم‌که نیرو ثابت نیست می‌توان از این روش برای محاسبه‌کار استفاده‌کرد.

واحد و دیمانسیون‌کار ـ در دستگاه بین المللی واحدهاکه نیرو برحسب نیوتن وجابه‌جایی‌برحسب متر است، کار برحسب واحد «ژول» (با علامت اختصاری J) بیان می‌شود و بنا به تعریف[۱] :

$$1(J)=1(N)\times 1(m)$$

بنابراین :

$$W_{(J)}=\vec{F}_{(N)}\cdot\vec{d}_{(m)} \qquad (۴-۶)$$

دیمانسیون‌کار ML^2T^{-2} است، زیرا دیمانسیون نیرو MLT^{-2} و دیمانسیون جابجایی L است و $\cos\theta$ بدون دیمانسیون می‌باشد.

کار برای غلبه براصطکاک ـ برای این‌که جسمی عملا با تندی ثابت برسطح افقی حرکت کند معمولا نیروئی لازم است. این نیرو برای غلبه برنیروی اصطکاک واردمی‌شود. اگرضریب اصطکاک بین‌جسم وسطح μ باشد نیروی اصطکاک برابر است با :

$$f=\mu N$$

کاری کـه ضمن جا به جا شدن جسم، برای غلبه براصطکاک انجام می‌شود برابر است با:

$$W_f=f\,.\,d=\mu N\,.\,d \qquad (۴-۷)$$

وقتی‌که‌جسم‌روی‌سطح افقی‌حرکت‌می‌کند $N=mg$ است بنابراین :

$$W_f=\mu mg\,.\,d \qquad (۴-۸)$$

مثلا اگرجسمی به جرم ۵/۰kg روی سطح افقی‌که ضریب اصطکاک آن۰/۲۵ است با تندی ثابت به اندازه ۲/۰ متر کشیده شودکاری که برای غلبه بر اصطکاک انجام می‌شود برابر است با:

$$W_f=0/25\times 5/0\times 9/80\times 2/0=24/5\ J$$

این کاربه‌مراتب کمتر ازکاری‌است که لازم‌است تاهمین جسم در راستای قائم به‌اندازه ۲ متر بالا برده‌شود، زیرا در این حالت کار، برای غلبه برجاذبه انجام می‌شود و برابر است با :

$$W_g=mgh=5/0\times 9/80\times 2/0=98\ J$$

دراین مثال به طوری‌که ملاحظه می‌شودکار نیروی اصطکاک $\frac{1}{4}$ کار نیروی وزن است.

چون‌کارنیروی اصطکاک بازدهی ندارد وتلف می‌شود تمام کوششها براین است که اصطکاک در مقابل حرکت تا جائی‌که ممکن است‌کم شود

پرسش ۴-۳ ـ کار نیروی اصطکاک به چه صورت ظاهر می‌شود؟

۱ـ به‌طوری که دربخش ۲ دیدیم اگر در دستگاه CGS نیرو برحسب دین (10^{-5}N) و جا به جایی برحسب سانتیمتر (10^{-2}m) بیان شودکار برحسب واحدی بنام ارگ (erg) بیان می‌گردد :

$$1(erg)=1(dyne)\times 1(cm)=10^{-7}J$$

انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی

می‌دانیم انرژی مکانیکی به دوصورت انرژی پتانسیل (E_p) وانرژی جنبشی (E_c) ظاهرمی‌شود.

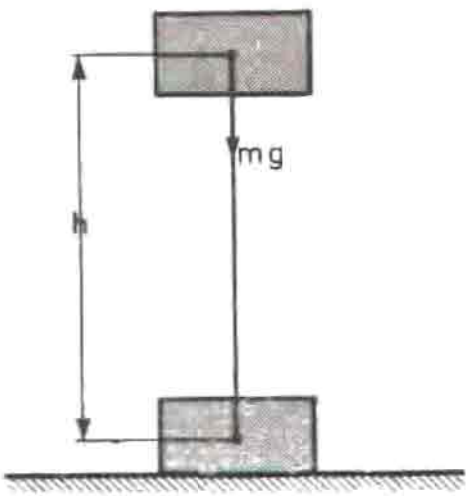
۱- انرژی پتانسیل - انرژی پتانسیل، قابلیت انجام کار نهفته در یك جسم است که آن جسم به‌سبب وضع یا حالت ویژه خود دارا می‌باشد. اتومبیلی که در سراشیبی تپه‌ای قرار دارد، یا فنر ساعتی که کوك شده است، یا آبی که پشت یك سد موجود است مثالهایی از اجسامی هستند که دارای انرژی پتانسیل می‌باشند: اتومبیل بالای تپه اگر آزاد شود می‌تواند مسافت زیادی را با موتور خاموش بپیماید، فنر جمع شده ساعت می‌تواند مدت درازی چرخهای ساعت را به کار اندازد و آب پشت سد می‌تواند در پائین سد توربینهای دستگاه مولد برق را به‌حرکت در آورد.

پرسش ۴-۴ - وقتی که دو تیغه مس و روی در الکترولیت محلول اسید سولفوریك رقیق قرار داده می‌شود چه نوع انرژی بین این دو تیغه ایجاد می‌شود؟

انرژی پتانسیل یك جسم را به وسیله مقدار کاری که می‌تواند انجام دهد اندازه می‌گیرند بنابراین برحسب واحد کار (یعنی ژول) بیان می‌شود. انرژیهای زیاد را برحسب کیلو ژول ($kJ = 10^3 J$) و یا مگاژول ($MJ = 10^6 J$) و یا کیلو وات ساعت ($kwh = 3600 kJ$) بیان می‌کنند.

انرژی پتانسیل جاذبه‌ای - وقتی که جسمی به جرم m را مطابق شکل (۴-۵) از سطح زمین تا ارتفاع h بالا می‌بریم، جسم درارتفاع h به سبب وضعیت ویژه‌ای که نسبت به‌حالت نخستین خود پیدا می‌کند دارای انرژی پتانسیل خواهد شد. چون برای بردن جرم m به ارتفاع h، حداقل بایدکار mgh را انجام‌دهیم این کار به‌صورت «انرژی پتانسیل جاذبه‌ای» درجسم ذخیره می‌شود:

$$E_p = mgh \quad \text{انرژی پتانسیل جاذبه‌ای} \qquad (۴-۹)$$



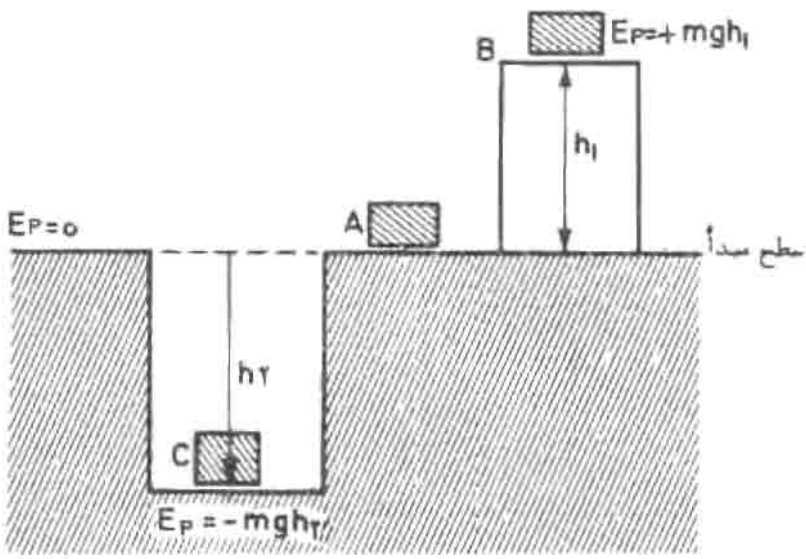
شکل ۴-۵- یك جسم به‌سبب وضع یا حالت ویژه خود می‌تواند دارای انرژی پتانسیل شود.

اگر جسم دوباره به سطح زمین برگردد این انرژی پس داده می‌شود[1].

۱- رابطه ۴-۹- درصورتی درست است که اندازه g درطول مسیر h ثابت باشد. اگرجرم m ازسطح زمین خیلی دور شود مقدار g و درنتیجه نیروی mg ثابت نمی‌ماند و چنان‌که دیدیم به نسبت عکس مجذور فاصله تغییرمی‌کند. برای محاسبهٔ کار باید این تغییرات منظور شود. این محاسبه ازبرنامه‌کار این کلاس خارج است.

انرژی پتانسیل جاذبه‌ای را معمولاً نسبت به یک سطح مقایسه یا سطح مبدأ (مثلاً سطح دریا) که انرژی پتانسیل درآن صفردرنظر گرفته می‌شود، می‌سنجند. اجسامی که بالای این سطح مبدأ قرار می‌گیرند تا به قرار داد دارای انرژی پتانسیل جاذبه‌ای مثبت واجسامی‌که درپائین این سطح واقع می‌شوند دارای انرژی پتانسیل جاذبه‌ای منفی هستند (شکل ۴-۶)

وقتی که می‌خواهیم جرم m را مطابق شکل از A به B ببریم باید کار انجام دهیم. این کار به صورت $+mgh_1$ درجسم ذخیره می‌شود. موقعی که جرم m از B به A برمی‌گردد کار mgh_1 را به جسم دیگر پس می‌دهد و انرژی پتانسیل آن کم می‌شود. به همین ترتیب هنگامی‌که جرم m از A به C منتقل می‌گردد به اندازه mgh_2 انرژی پتانسیل ازدست می‌دهد به‌طوری‌که انرژی پتانسیل آن درنقطه C کمتر از انرژی پتانسیل آن درنقطه A است.



شکل ۴-۶- انرژی پتانسیل جاذبه‌ای نسبت به یک سطح مقایسه ممکن است مثبت یا منفی باشد.

پرسش ۴-۵- اگر با اعمال نیرو، جسمی با تندی ثابت روی یک سطح افقی از یک نقطه به‌نقطه دیگر منتقل شود به طوری که انرژی پتانسیل آن تغییر نکند کاری که انجام می‌گیرد چگونه مصرف می‌شود ؟

پرسش ۴-۶- اگر جسمی‌روی‌سطح‌شیب‌داری که دارای اصطکاک است باتندی ثابت بالا کشیده شودکاری‌که انجام می‌گیرد به چه تبدیل می‌شود ؟

۲-انرژی‌جنبشی - انرژی‌جنبشی (یاانرژی‌سینتیک) قابلیت انجام‌کار دریک‌جسم متحرک است که‌آن‌جسم به‌سبب حرکت خود دارا می‌باشد. مثلا یک‌اتومبیل که درجاده‌ای حرکت می‌کند دارای انرژی جنبشی انتقالی است وچرخ طیار یک ماشین‌که به‌دورمحور ثابت خود می‌چرخد دارای انرژی جنبشی دورانی است.

انرژی‌جنبشی یک‌جسم به‌جرم m که باسرعت ثابت v حرکت می‌کند از رابطهٔ زیر حساب می‌شود:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \qquad (۱۰-۴)$$

مثلا انرژی جنبشی یك اتومبیل به جرم $1000kg$ که با سرعت $\left(72\frac{km}{h}\right) 20\frac{m}{s}$ در جاده‌ای حرکت می‌کند برابر است با :

$$E_c = \frac{1}{2} \times (10^3 kg) \times \left(20\frac{m}{s}\right)^2 =$$

$$2 \times 10^5 kg \frac{m^2}{s^2} = 2 \times 10^5 J = 200 kJ$$

پرسش ۴-۷- نشان دهید که دیمانسیون انرژی جنبشی با دیمانسیون کار یکی است.

جسم متحرك دارای انرژی است و می‌تواند کارانجام دهد. زیرا اگر بخواهند آن را متوقف کنند باید بر آن یك نیروی مقاوم $\vec{F}$ وارد سازند و این نیرو درمسافت x که جسم می‌پیماید تامتوقف شود کار $\vec{F} \cdot \vec{x}$ را انجام می‌دهد . همین نیرو را جسم متحرك می‌تواند به جسم دیگر وارد سازد و آن را جابجاکند. برعکس اگر جسم ساکنی به‌جرم m روی یك سطح افقی بدون اصطکاك تحت اثرنیروی ثابت $\vec{F}$ قرارگیرد و پس ازپیمودن مسافت x سرعتش به v برسد کار $\vec{F} \cdot \vec{x}$ به‌صورت انرژی‌جنبشی $\frac{1}{2}mv^2$ درجسم ذخیره می‌شود. یعنی :

$$\vec{F} \cdot \vec{x} = \frac{1}{2} m v^2 \qquad (۱۱-۴)$$

این کیفیت را به‌صورت کلی‌توی تحت عنوان قضیهٔ انرژی جنبشی بیان می‌کنیم.

قضیه انرژی جنبشی - تغییر انرژی جنبشی یك جسم جامد درمدت معین برابر است با کار نیروی (یا نیروهای) وارد برجسم درهمان مدت.

درنظربگیریم که برجسمی به جرم m نیروی ثابت و افقی F وارد می‌شود وجسم دراثر این نیرو با شتاب ثابت a روی خط راست حرکت می‌کند . اگر جسم درمبدأ زمان دارای‌سرعت اولیه v_0 باشد وپس از گذشت زمان t سرعتش به v برسد مسافت پیموده شده طبق رابطه ۱-۱۳ (بخش ۱) برابر است با :

$$x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

چون بنا به‌قانون دوم نیوتن $F = ma$ است کاری که این نیرو ضمن جابجایی x انجام می‌دهد برابر است با :

$$W = F \cdot x = ma \cdot \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

$$= m \frac{v^2 - v_0^2}{2}$$

یا :

$$W = F \cdot x = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} m v_0^2 \qquad (۱۲-۴)$$

ویا :

$$W = F.x = \Delta E_c \qquad (۱۳-۴)$$

ΔE_c نمایش تغییر انرژی جنبشی جسم در مدت اثر نیرو است.

بدیهی است اگرجسم ازحال سکون شروع‌به حرکت‌کند ($V_0 = 0$) کارنیروی وارد برجسم‌مطابق رابطه (۴-۱۱) برابر $\frac{1}{2}mV^2$ است. درصورتی که

برجسمی چند نیرو اثر کند ΔE_c برابر مجموع جبری کار این نیروها خواهد بود.

روابط بالا برای حالتی است که اصطکاک ناچیز است درعمل مقداری از کار نیروی محرك $\vec{F}$ به وسیلهٔ اصطکاك جذب و به گرما تبدیل می‌شود، در نتیجه ΔE_c کوچکتر ازکار نیروی محرك است.

توان ـ توان یك دستگاه که کار انجام می‌دهد بنا به‌تعریف عبارتست ازخارج قسمت کار انجام‌شده برزمان انجام کار یعنی

$$\text{توان} = \frac{\text{کار}}{\text{زمان انجام کار}}$$

یا :

$$P = \frac{W}{t} \qquad (۱۴-۴)$$

رابطه ۴-۱۴ در واقع معرف توان متوسط دستگاهی است که کار انجام می‌دهد و نشان می‌دهد که هرچه کار سریعتر انجام گیرد یعنی در مدت کوتاهتری کار بیشتری انجام شود توان دستگاه بیشتر است.

دیمانسیون توان ML^2T^{-3} و واحدآن در دستگاه بین‌المللی واحدهاوات (باعلامت اختصاری W) است. یك وات ، چنان‌که می‌دانیم ، برابر یك ژول کار درمدت یك ثانیه است:

$$1W = \frac{1J}{1s}$$

بنابراین :

$$P_{(W)} = \frac{w(J)}{t(s)} \qquad (۱۵-۴)$$

توانهای بزرگ‌را برحسب کیلووات($kW=10^3W$) و مگاوات ($MW=10^6W$) بیان می‌کنند.

قانون بقای انرژی

قانون بقای انرژی یکی ازمهمترین قانونهای طبیعت است. دربارهٔ بقای انرژی زیاد بحث شده و قانون بقای انرژی به‌صورتهای مختلف بیان گردیده است. دراین‌جا سه بیان متفاوت را که مفهوم همهٔ آنها یکی است برای نمونه یادآور می‌شویم :

۱ـ هنگامی که انرژی ازیك صورت به‌صورت دیگر تبدیل می‌شود مقدارآن همواره ثابت می‌ماند.

۲ـ انرژی از هیچ به‌وجود نمی‌آید و از بین هم نمی‌رود.

۳ـ انرژی کل موجوددرجهان همواره ثابت است.

می‌دانیم انرژی به‌صورتهای گوناگون ظاهر می‌گردد که مهمترین آنها عبارتنداز انرژیهای مکانیکی، الکتریکی، شیمیائی، گرمائی، نوراتی، اتمی، ملکولی و هسته‌ای. درباره تبدیل این انرژیها به یکدیگر تاکنون مطالبی به‌اختصار آموخته‌اید. دراین‌جا ما قانون بقای انرژی مکانیکی وامورد بررسی دقیقتری قرار خواهیم داد ودربارهٔ قانون بقای اقسام دیگر انرژی هرجا که لازم شد به‌بحث خواهیم پرداخت.

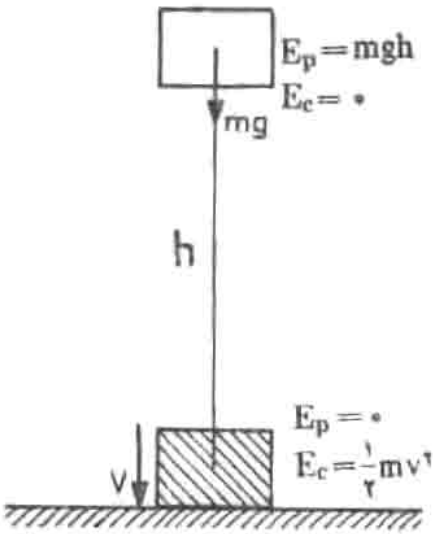
بقای انرژی مکانیکی در یك دستگاه منفرد[1]ـ گفتیم مجموع انرژیهای پتانسیل و جنبشی موجود در یك جسم (یا یك دستگاه) را انرژی مکانیکی کل آن جسم (یا آن دستگاه) گویند.

$$E = E_p + E_c \quad \text{انرژی مکانیکی کل} \qquad (۱۶-۴)$$

۱ـ یك دستگاه را ازلحاظ مکانیکی درصورتی منفرد گویند که برآن هیچ نیروئی ازخارج وارد نشود.

انرژیهای پتانسیل و جنبشی قابل تبدیل به یکدیگر هستند. درصورتی که دستگاه منفرد باشد یا به‌عبارت دیگر، نیرویی از خارج بر آن وارد نشود، کاهش یکی از این دونوع انرژی درست برابر افزایش نوع دیگر است، درنتیجه مجموع این دو انرژی همواره ثابت می‌ماند. برای روشن شدن مطلب به بیان چند مثال می‌پردازیم:

مثال ۱- سقوط آزاد یك جسم - در نظر بگیریم که سنگی به‌جرم m از ارتفاع h بالای سطح زمین (سطح مبدأ) بدون تندی اولیه سقوط می‌کند واصطکاك هوا درمقابل حرکت آن ناچیز است. در این مثال مجموعه سنگ و زمین را می‌توانیم درحکم یك دستگاه منفرد بگیریم که نیرویی از خارج (مانند نیروی اصطکاك) برآن وارد نمی‌شود. (شکل ۴-۷).



شکل ۴-۷- در سقوط آزاد یك جسم

در لحظهٔ شروع حرکت، انرژی جنبشی سنگ صفر وانرژی پتانسیل آن mgh است و داریم:

$E_1 = mgh + 0 = mgh$ انرژی مکانیکی کل اولیه

به تدریج که سنگ به سطح زمین نزدیك می‌شود انرژی پتانسیل آن کاهش می‌یابد ولی در عوض انرژی جنبشی آن زیاد می‌گردد ولی چون انرژی به‌صورت دیگری تلف نمی‌شود، میزان کاهش انرژی پتانسیل ($-\Delta E_p$) در هر لحظه برابر میزان افزایش انرژی جنبشی ($+\Delta E_c$) است. موقعی که جسم به سطح زمین می‌رسد انرژی پتانسیل آن صفر می‌شود ولی انرژی جنبشی آن $\frac{1}{2}mv^2$ می‌گردد وچون $v^2 = 2gh$ است (به‌بخش دوم سقوط آزاد اجسام مراجعه شود) داریم:

$E_2 = 0 + \frac{1}{2}mv^2 = mgh$ انرژی مکانیکی کل در سطح زمین

اگر سنگ در راستای قائم به‌طرف بالا پرتاب شود انرژی جنبشی اولیه آن به انرژی پتانسیل تبدیل می‌گردد و در هرنقطه از مسیر، میزان کاهش انرژی جنبشی برابر میزان افزایش انرژی پتانسیل است. بنابراین برای سنگی که به‌طور آزاد سقوط می‌کند ویا به‌طرف بالا پرتاب می‌شود (در صورتی که نیروی خارجی مانند اصطکاك هوا برآن اثر نکند) قانون بقای انرژی مکانیکی صادق است و داریم :

$$\Delta(E_p) = -\Delta(E_c)$$

یا $$\Delta(E_p) + \Delta(E_c) = 0$$

این رابطه را به‌صورت زیر نیز می‌توان نوشت :

$$\Delta(E_p + E_c) = 0$$

و یا :

$$\boxed{E_p + E_c = cte} \qquad (۱۷-۴)$$

پرسش ۴-۸- اگر جسمی که سقوط می‌کند یك گلوله از جنس فولاد با عتیق باشد و در روی

زمین به‌یك صفحه سخت وصیقلی و تغییر شکل‌ناپذیر برخوردکند به‌طوری‌که دراین برخورد اتلاف‌انرژی خیلی‌کم باشد، انرژی جنبشی گلوله پس ازبرخورد به‌چه‌صورت ظاهر می‌شود ؟

مثال ۴- سطح شیب دار - دو نظر بگیریم که یك‌اتومبیل کوچك (ازنوع اسباب بازی) به‌جرم m مطابق شکل (۴ - ۸) روی سطح شیب داری‌که اصطکاك آن ناچیز است تا ارتفاع h بالا کشیده می‌شود. کاری که‌صرف بالابردن این اتومبیل‌می‌شود چنان که گفتیم به صورت انرژی پتانسیل جاذبه‌ای mgh درآن ذخیره می‌گردد . اگر این اتومبیل را بدون سرعت اولیه از بالای سطح شیب‌دار رهاکنیم درامتداد سطح پائین می‌آید و چون اصطکاك در کار نیست کاهش انرژی پتانسیل آن در هرلحظه برابر افزایش انرژی جنبشی آن است.

اگر سرعت اتومبیل در پائین سطح v باشد انرژی جنبشی آن $\frac{۱}{۲}mv^۲$ است و بانوجه به‌قانون بقای انرژی داریم:

انرژی مکانیکی کل دربالین سطح = انرژی مکانیکی کل دربالای سطح

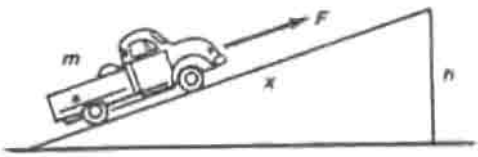
یا : $$mgh+۰=۰+\frac{۱}{۲}mv^۲$$

ویا: $$mgh=\frac{۱}{۲}mv^۲$$

و ازآن جا : $$v^۲=۲gh$$

یا : $$v=\sqrt{۲gh}$$

رابطهٔ $v=\sqrt{۲gh}$ چنان که می‌دانیم معرف سرعت جسمی‌است‌که ازارتفاع h بدون سرعت اولیه به‌طور



شکل ۴ - ۸ - بقای انرژی مکانیکی

آزادسقوط می‌کند. بنابراین اگر اصطکاك ناچیز باشد سرعت نهائی جسمی‌که از بالای یك سطح شیب‌دار از ارتفاع h به راه می‌افتد وبه پائین سطح می‌رسد برابر سرعت جسمی است‌که به طور آزاد از ارتفاع h بدون سرعت اولیه در راستای قائم سقوط می‌کند و این سرعت بستگی به زاویه شیب سطح ندارد . اگر این اتومبیل پس از رسیدن به پائین سطح در امتداد سطح شیب دار دیگری‌که اصطکاك آن هم ناچیز باشد بالا برود انرژی جنبشی آن دوباره به انرژی پتانسیل جاذبه‌ای‌تبدیل می‌شود وروی‌سطح دوم با ارتفاع h بالا می‌رود.

بقای انرژی مکانیکی دردستگاه غیرمنفرد- رابطهٔ (۴-۱۷) قانون بقای انرژی‌مکانیکی‌را برای‌دستگاه مکانیکی منفرد بیان می‌کند . اگر دستگاه از لحاظ مکانیکی منفرد نباشد یا به‌عبارت دیگر ، از خارج بر آن‌نیرو وارد‌شود، انرژی مکانیکی‌آن‌ثابت نمی‌ماند. مثلاً اگر در مثالهای بالا اصطکاك در کار باشد قسمی‌ازانرژی دستگاه‌صرف غلبه براصطکاك‌می‌شود در نتیجه انرژی مکانیکی ابتدائی دستگاه با انرژی مکانیکی انتهائی آن یکی نیست وتغییر این انرژی برابر کار نیروی اصطکاك است یعنی :

$$\Delta E=E_۲-E_۱=W_f \qquad (۴-۱۸)$$

دراین‌رابطه چون $E_۲$ معمولاً کمتر از $E_۱$است

W_f منفی بوده و ما
گرما ظاهر می‌شود.

مثال ـ یك قطعه فلز به جرم ۵/۰ کیلوگرم ازبالای سطح شیب داری‌که زاویه شیب آن نسبت به‌سطح‌افق ۳۰° است بدون سرعت اولیه‌رهامی‌شود وپس ازپیمودن مسافت ۲/۰ متر باسرعت ۳/۰ متر بر ثانیه به‌پایین سطح می‌رسد .

الف ـ نیروی اصطکاك و ضریب اصطکاك لغزشی سطح را حساب‌کنید .

ب ـ مقدارگرمائی‌که در اثر اصطکاك تولید می‌شود برحسب ژول وکالری چه اندازه است؟

ـ الف) ـ اگر E_1 و E_2 به ترتیب انرژی مکانیکی این‌قطعه فلز در بالا وپائین سطح شیب دار و f نیروی اصطکاك و d مسافت پیموده شده روی سطح شیب دار باشد طبق رابطه (۴ـ۱۸) خواهیم داشت :

$$E_2 - E_1 = f.d$$

ولی

$E_1 = E_{P_1} + E_{C_1} = mgh + 0$ دربالای‌سطح

$= mgh = mgd\sin\theta$

$E_2 = E_{P_2} + E_{C_2} = 0$ دربایین سطح

$$+\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv^2$$

بنابراین : $\frac{1}{2}mv^2 - mgd\sin\theta = f.d$

به ازای $m = 5kg$

$d = 2m$

$v = 3m/s$

$\theta = 30°$ ($\sin 30° = \frac{1}{2}$ و $\cos 30° = \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0/865$)

$$\frac{1}{2}\times 5\times 3^2 - 5\times 9/80\times 2\times \frac{1}{2} = f\times 2$$

یا : $22/5 - 49 = f\times 2$

ویا : $f = \frac{22/5 - 49}{2} = -13/25N$

علامت (ـ) معرف نیروی مقاوم است . ضریب اصطکاك چنان‌که می‌دانیم برابر است با :

$$\mu = \frac{|f|}{N} = \frac{|f|}{mg\cos\theta} =$$

$$\frac{13/25}{5\times 9/80\times 0/865} \approx 0/31$$

ـ ب) ـ کار نیروی اصطکاك به‌گرما تبدیل می‌شود. بنابراین گرمای حاصل برحسب ژول برابر است با :

$$Q = W_f = f\ .\ d = 13/25N.\ 2m = 26/5$$

چون هر کالری معادل ۴/۱۸۵ ژول (تقریباً ۴/۲ ژول) است مقدار Q برحسب کالری برابراست با:

$$Q = \frac{26/5}{4/185} \approx 6/3\ cal.$$

تبدیل انرژیهای گرمایی ومکانیکی به‌یکدیگر

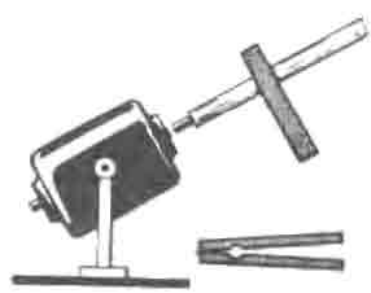
در مثالهای پیش دیدیم که قسمتی از انرژی جنبشی یك‌جسم بایك دستگاه متحرك دراثراصطکاك به‌گرما تبدیل می‌شود. پدیده‌های گرمایی ومکانیکی در اغلب موارد سخت به هم مرتبط بوده و قابل تفکیك نیستند. مثلا ازمالش دوقطعه چوب به‌یکدیگر گرماتولیدمی‌شود به‌طوری‌که‌می‌توان‌آتش‌افروخت.

یك‌گلوله سربی‌که با سرعت زیاد به مانع سختی برخوردکرده ومتوقف می‌شود انرژی جنبشی آن‌به‌گرما تبدیل می گردد وگرمای‌حاصل‌ممکن‌است

آن را ذوب کند . همه می‌دانیم هنگامی که قطعات فلزی یاچوبی را باآره می‌برند یاسوهان می‌زنند گرما تولید می‌شود و مثالهای بیشمار دیگر ...

تبدیل گرما به‌انرژی مکانیکی قدری مشکلتر است و این تبدیل چنان که می‌دانید در ماشینهای گرمایی برون سوز و درون سوز مانند ماشینهای بخار، توربینهای بخار، موتورهای انفجاری و دیزل و ... صورت می‌گیرد. بایك آزمایش ساده‌می‌توان در آزمایشگاه تبدیل انرژیهای مکانیکی و گرمائی را به یکدیگر نشان داد :

لوله برنجی در شکل (۴-۹) که محتوی مقداری اتر است با چوب پنبه‌ای بسته شده و روی محور یك موتور الکریکی سوار است ومی‌چرخد. هرگاه به وسیله گیرهٔ چوبی که در شکل نشان داده شده است بدنهٔ لوله را محکم بگیریم گرمای حاصل از کارنیروی اصطکاك بین گیره و لوله، اتر را بخار می کند وفشار بخار اترچوب پنبه‌را بشدت به‌طرف بالا پرتاب می‌نماید.



شکل ۴-۹ - گرمای حاصل از اصطکاك، اتر را بخار می‌کند و فشار بخار اتر چوب پنبه را پرتاب می‌نماید.

هم ارزی کار وگرما - مقادیر کار و گرمائی راکه باهم مبادله می‌شوند می‌توان جداگانه اندازه گرفت و رابطهٔ بین آنها را معین کرد . تحقیق تجربی رابطه بین کار و گرما نخستین بار توسط ژول (که با نام او آشنا هستید) صورت گرفته است. آزمایش نشان‌می‌دهد که اگر کار W کاملا صرف تولید گرمای Q شود نسبت $\frac{W}{Q}$ همواره مقدارثابتی است که‌فقط بستگی به واحدهای W و Q دارد . این مقدار ثابت را به j نمایش می‌دهند وآن را «معادل مکانیکی واحدگرما» می‌نامند، بنابراین:

$$\frac{W}{Q} = J \qquad (۴-۱۹)$$

اگر W و Q هردو برحسب ژول بیان شوند $j = ۱$ است. به عبارت دیگر یك ژول‌کار معادل یك ژول گرما است ، ولی اگر W برحسب ژول و Q برحسب کالری بیان شود $J = ۴/۱۸۵ \frac{\text{ژول}}{\text{کالری}}$ است ، یعنی برای تولید یك کالری گرما ۴/۱۸۵ ژول‌کار لازم است، یا به‌عبارت دیگر یك کالری گرما معادل ۴/۱۸۵ ژول و یا یك کیلو کالری گرما معادل ۴۱۸۵ ژول‌کار است.

اصل هم‌ارزی کار وگرما - نتایج بالا را با استفاده از قانون بقای انرژی می‌توان تحت عنوان اصل هم‌ارزی کار وگرما به‌صورت زیر بیان کرد :

« هرگاه در دستگاهی فقط مبادلهٔ کار و گرما صورت گیرد و دستگاه پس از مبادله کار و گرما انرژی اولیه خود را باز یابد (به‌عبارت دیگر به‌حالت اولیه خودبرگردد) اگر این دستگاه‌کار بگیردگرما پس‌می‌دهد و اگر گرما بگیرد کار پس‌می‌دهد و درهردوحال‌میان کار

W و گرمای Q مبادله شده نسبت ثابتی برقرار است . »

اگر بنا به قرارداد، کار یا گرمایی را که به دستگاه داده می‌شود با علامت مثبت و گرما یا کاری را که از دستگاه گرفته می‌شود با علامت منفی درنظر بگیریم اصل هم‌ارزی کار و گرما به‌صورت زیر نوشته می‌شود :

$$W+Q=0 \qquad (۲۰-۴)$$

دراین رابطه W و Q هردوبرحسب ژول هستند.

در صورتی که دستگاه منفرد نباشد ، یعنی با محیط خارج مبادله انرژی کند انرژی کل آن ثابت نمی‌ماند ولی میزان تغییر انرژی کل دستگاه برابر مجموع جبری کار و گرمایی است که دستگاه با محیط خارج مبادله می‌کند یعنی:

$$\Delta E=W+Q \qquad (۲۱-۴)$$

تغییر انرژی کل دستگاه

اگر دستگاه از محیط خارج کار و گرما بگیرد انرژی کل داخلی آن افزایش می‌یابد و اگر به‌محیط خارج هم کار و هم گرما بدهد انرژی کل درونی آن کاهش می‌یابد. بدیهی است اگردستگاه با محیط خارج مبادله انرژی نکند $\Delta E=0$ است و رابطه (۲۰-۴) به دست می‌آید .

رابطهٔ (۲۱-۴) در واقع صورت کلی‌تری از بیان قانون بقای انرژی است و به‌نام اصل اول ترمودینامیک نیز نامیده می‌شود .

خودتان آزمایش کنید

معادل مکانیکی واحد گرما را با یك آزمایش ساده به‌دست آورید:

وسائل لازم : یك لوله شیشه‌ای نسبتاً ضخیم ومحکم تقریباً به‌قطر ۵ سانتیمتر وبه طول ۱ متر که هردو سرآن باز است،

مقداری ساچمه سربی (مثلا ۱۰۰ گرم)،

دوقطعه چوب پنبه(معمولی یا لاستیکی برای بستن دوسرلوله)،

یك دماسنج جیوه‌ای معمولی،

یك بشر یا یك استکان کوچك،

دماسنج را دروسط بشر کوچك (یا استکان) نگاه دارید وساچمه‌ها را به‌آرامی اطراف‌آن بریزید تا مخزن دماسنج وسط آنها قرار گیرد (مواظب باشید ساچمه‌ها به مخزن دماسنج ضربه وارد نسازند کـه سبب شکستن آن بشوند) و دمـای اولیه ساچمه ها را اندازه بگیرید و یادداشت کنید (θ_1) .

یك سرلوله را باچوب پنبه محکم ببندید و ساچمه‌ها را درآن بریزید سپس سردیگر لوله را با چوب‌پنبه دیگر محکم ببندید به طوری‌که چوب پنبه‌ها در اثر ضربه ساچمه‌ها باز نشوند .

لوله را با دست در راستای قائم نگاه دارید (**شکل ۴ـ۱۰**) و به‌سرعت آن را واژگون کنید تا ساچمه‌ها ازیك سرلوله به‌سردیگرآن سقوط‌کنند. بدیهی است ارتفاع سقوط ساچمه‌ها برابرطول لوله (فاصله دو چوب‌پنبه) است. عمل واژگون‌کردن لوله را از۵۰تا۲۰۰بار به‌سرعت وپشت سرهم تکرارکنید سپس‌بلافاصله‌یکی ازچوب‌پنبه‌ها را برداریدومانند حالت اول دمای ساچمه‌ها را اندازه بگیرید ویادداشت کنید (θ_2). این دما بیشتر ازدمای اولیه θ_1 است .

شکل ۴ـ۱۰

اگر m جرم ساچمه‌ها و h ارتفاع سقوط آنها درلوله (فاصله بین دو چوب‌پنبه) باشدکار انجام شده در اثر سقوط ساچمه‌ها در n بار سقوط پیاپی برابر است با :

$$W = mg \cdot nh$$

این‌کار به‌گرما تبدیل شده ودمای ساچمه‌ها را بالا می‌برد . اگر c ظرفیت‌گرمایی ویژه سرب باشد مقدارگرمایی‌که سبب بالا رفتن دمای m گرم سرب از θ_1 به θ_2 می‌شود برابر است با :

$$J = \frac{W}{Q} = \frac{mg.nh}{mc(\theta_2 - \theta_1)}$$

یا

$$J = \frac{g.nh}{c(\theta_2 - \theta_1)}$$

باتوجه به‌این‌که ظرفیت‌گرمایی ویژه سرب۱۳۰ $\frac{\text{ژول}}{\text{کیلو گرم . درجه}}$ (یا ۰/۰۳۱ $\frac{\text{کالری}}{\text{گرم . درجه}}$)

به این پرسشها پاسخ دهید

۱) ـ با صرف یك ژول انرژی کتابی به‌جرم یك‌کیلوگرم را تاچه ارتفاعی ازسطح یك‌میز می‌توان در راستای قائم بالا برد ؟

۲) ـ چند ژول انرژی لازم است تایك هواپیمای جت که وزن آن با بار ۷×۱۰^۵ نیوتن است (وثابت فرض می‌شود) تاارتفاع ده‌کیلومتری سطح زمین بالا برود؟

۳) با محاسبه نشان دهید کـه انرژی مکانیکی کل یك جسم کـه به‌طور آزاد سقوط می‌کند در هرنقطه از مسیرش مقدار ثابتی است.

۴) ـ با توجه به‌این‌که اندازه حرکت یك جسم به جرم m که با تندی $\vec{v}$ حرکت می‌کند برابر $\vec{p} = m\vec{v}$ است نشان دهیدکه بین اندازه حرکت $\vec{p}$ و انرژی جنبشی E_c جسم‌رابطهٔ زیر برقرار است .

$$E_c = \frac{۱}{۲}\frac{p^۲}{m}$$

۵) ـ دو جسم که دارای بار الکتریکی هستند یکدیگر را می‌رانند برای این کـه انرژی پتانسیل الکتریکی این دوجسم را افزایش دهیم باید :

۱ـ دوجسم را به موازات هم با یك سرعت حرکت دهیم.

۲ـ یکی ازدوجسم را روی محیط یك دایره به‌دور جسم دیگر بچرخانیم.

۳ـ دوجسم را از یك‌دیگر دورکنیم.

۴ـ دوجسم را به یك‌دیگر نزدیك‌کنیم .

درجواب درست بحث‌کنید .

۶) ـ وقتی‌که سنگی‌درهواسقوط می‌کند قانون‌بقای‌انرژی دربارهٔآن چگونه بیان می‌شود؟

۷) ـ درمدتی‌که یك ماهواره به جرم m با سرعت v یك دور روی مدار دایره‌ای شکلی به شعاع r به‌دور زمین می‌گردد چه‌کاری نیروی جاذبه زمین روی آن انجام می‌دهد؟

۸) ـ باتوجه به‌این‌که انرژی پتانسیل جاذبه‌ای معمولا نسبت به یك سطح مقایسه (سطح انرژی پتانسیل صفر) سنجیده مـی‌شود بگوئید سطح مقایسه مناسب در مثالهای زیر کجا باید انتخاب شود؟

الف- باندولی که درحال نوسان است.

ب- وزنه‌ای که به فنر مارپیچی آویخته شده ودر راستای قائم پائین و بالا می‌رود.

پ- سیاره‌ای که به‌دور خورشید می‌چرخد.

۹) - نشان دهید که اگر اتومبیلی تحت اثر نیروی ثابت $\vec{F}$ که صرف غلبه بر اصطکاك می‌شود با تندی ثابت $\vec{v}$ در حرکت باشد توان لازم برای ثابت نگاهداشتن این تندی برابر $P=Fv$ است.

۱۰) - درصنعت توان موتورها را برحسب واحدی به نام اسب بخار می‌سنجند . اسب بخار تقریباً معادل توان دستگاهی است که جرم ۷۵ کیلوگرم را درمدت یك ثانیه به‌اندازه یك متر بالا ببرد. این توان چند وات و چند کیلووات است؟

۱۱) - بازده یك مولد (یاهروسیله دیگری که انرژی‌را ازیك صورت به‌صورت دیگرتبدیل می‌کند) بنا به‌تعریف عبارت است از مقدار درصد انرژی کل مصرفی که به صورت انرژی قابل استفاده پس می‌دهد. بازده موتورهای دوزسوز درحدود ده درصد است یعنی مثلاً ۱۰ ٪ از انرژی شیمیائی نهفته درسوخت یك اتومبیل صرف حرکت آن می‌گردد. پس ۹۰ ٪ بقیه چه می‌شود ؟

۱۲) - مولد A نسبت به مولد B دارای توان بیشتر ولی بازده کمتر است . این بدان معنی است که مولد A نسبت به مولد B با مقدار سوخت مساوی

۱- کار بیشتر ولی کندتر انجام می‌دهد.

۲- کار کمتر ولی تندتر انجام می‌دهد.

۳- کار بیشتر وتندتر انجام می‌دهد.

۴- کار کمتر وکندتر انجام می‌دهد.

این مسئله ها را حل کنید

۱) - یك قایق‌بادی به‌جرم ۲۰۰/۰kg که برای حرکت روی یخ ساخته شده است برسطح یخ بسته درباچه‌ای حرکت می‌کند وباد دریك مسیر ۹۰۰/۰ متری نیروی ثابت ۱۰۰/۰ نیوتن برقایق وارد می‌سازد. اگر قایق ازحال سکون شروع به‌حرکت کند واصطکاك سطح ناچیزفرض شود سرعت حرکت قایق را در پایان مسیر ۹۰۰/۰ با دو روش زیر حساب کنید :

الف- با استفاده از قانون دوم نیوتن.

ب- با استفاده از قضیهٔ انرژی جنبشی.

جواب : $۳۰\frac{m}{s}$

$۲۰/۰\frac{m}{s}$ در حرکت

است در اثر نیروی ثابت ترمز سرعتش به $۱۰/۰\frac{m}{s}$ می‌رسد. کار نیروی ترمز را درمدت این تغییر سرعت برحسب کیلو ژول حساب‌کنید.

جواب : ۱۵۰ kJ

۳) ـ گلوله‌تفنگی به‌جرم ۲/۰ گرم باسرعت ۳۰۰/۰ متر برثانیه به تنه درختی برخورد می‌کند و ۵/۰ سانتیمتر در امتداد خط راست درآن فرو رفته ومتوقف می‌شود.

الف ـ تغییر انرژی جنبشی گلوله چه اندازه است؟

ب ـ کاری‌که درخت روی گلوله انجام می‌دهد چند ژول است وچه اندازه‌گرما برحسب ژول وکالری تولید می‌شود؟

پ ـ نیروی متوسط وارد برگلوله درمدت حرکت آن درتنه درخت چند نیوتن است؟

جواب : الف ـ ۹۰ J ب ـ ۹۰ J و ۹۰ J و ۲۱/۶ cal پ ـ ۱۸۰۰ N

۴) ـ تعداد ۵ آجر یکسان که جرم هریك ۲/۰ کیلوگرم و ضخامت هریك ۰/۰۶ متر است ازطرف رویه بزرگترشان روی‌یك سطح افقی قرارگرفته‌اند. برای این‌که آجرهارا ازهمان رویهٔ بزرگترشان روی هم بچینیم چند ژول‌کار باید انجام دهیم؟

جواب : ۱۱/۷۶J

۵) ـ وزنه‌ای به‌جرم ۴/۵ کیلوگرم به‌وسیله یك رشته سیم باریك و سبك به‌طول ۵/۰ متر به‌سقف آزمایشگاه آویزان و درحکم یك پاندول ساده است. وزنه را به یك طرف می‌کشیم تا راستای سیم باامتداد قائم زاویه °۶۰ بسازد.

الف ـ انرژی پتانسیل ذخیره شده در وزنه را حساب‌کنید.

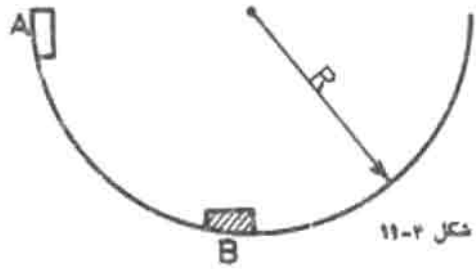
ب ـ هرگاه وزنه را رها کنیم و اثر مقاومت هوا برآن ناچیزباشد با چه سرعتی از وضع تعادل اولیه خود می‌گذرد و بیشترین مقدار انرژی جنبشی آن چه اندازه است ؟

جواب : الف) ۱۱۰/۲۵J ب) $۷\frac{m}{s}$ و ۱۱۰/۲۵J

۶) ـ وزنه‌ای به جرم m درون نیم‌کره‌ای به‌شعاع R ازنقطه A به‌نقطه B می‌لغزد و مسیر ربع دایره عظیمه AB را می‌پیماید (شکل ۴ـ۱۱) . کاری که نیروی وزن این وزنه در تغییر مکان AB انجام می‌دهد برابر است با

۱ـ صفر ۲ـ mgR ۳ـ $mg.\frac{\pi R}{۲}$ ۴ـ $mg.\pi R$

درجواب صحیح بحث‌کنید .



شکل ۴-۱۱

۷) ـ کامیونی به جرم ۵×۱۰^{۳} کیلوگرم دریك جاده شیب‌دار که شیب آن دو درصد است ($\sin\alpha = ۰/۰۲$) با تندی ثابت $۱۰\ \frac{m}{s}$ بالا می‌رود و نیروی مقاوم در مقابل حرکت کامیون برابر $\frac{۴}{۱۰۰}$ وزن آن است.

الف ـ توان کامیون دراین حرکت چه اندازه است ؟

ب ـ کامیون با همین توان ، حداکثر با چه تندی دراین جاده می‌تواند بالا بیاید ؟ فرض کنید نیروی مقاوم درموقع بالا آمدن کامیون تغییر نمی‌کند.

جواب : الف ـ $۲۹/۴kw$ ب ـ $۳۰\frac{m}{s}$

۸) ـ توان مصرفی یك موتور الکتریکی ۲۰۰ وات وبازده آن ۶۰ درصد است، مقدار گرمائی که درهرثانیه در این موتور تولید می‌شود چه اندازه است ؟

جواب : ۸۰ ژول معادل تقریباً ۱۹/۲ کالری

۹) ـ ازآبشاری به‌ارتفاع ۴۲ متر درهردقیقه به‌طور متوسط ۱۶۰ مترمکعب آب فرو می‌ریزد. توان متوسط این آبشار را برحسب کیلووات حساب کنید .

جواب : تقریباً $۱۱۰۰\ kw$

۱۰) ـ ماهواره‌ای به جرم m روی مدار دایره‌ای شکلی به شعاع $۲R$ به‌گرد زمین می‌گردد (R شعاع کره زمین است) انرژی جنبشی این ماهواره را حساب کنید .

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۴

۴ـ۱) ـ بلی، وقتی که جهت نیروی $\vec{F}$ رو به‌پائین باشد وجسم را برسطح تکیه‌گاه خود بفشارد.

۴ـ۲) ـ کار منفی معرف کار نیروی مقاوم است ونشان می‌دهدکه یك همنه نیرو درخلاف جهت حرکت جسم وجود دارد و در مقابل حرکت آن مقاومت می‌کند مانند نیروی اصطکاك

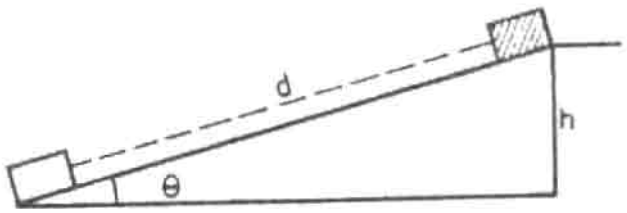
که با جهت حرکت جسم زاویه 180° می‌سازد.

۴-۳) - به صورت گرما.

۴-۴) - انرژی پتانسیل الکتریکی.

۴-۵) - این کار صرف غلبه براصطکاک می‌شود وبه‌گرما تبدیل می‌گردد.

۴-۶) - قسمتی ازکارانجام شده صرف غلبه براصطکاک می‌شود وبه‌گرما تبدیل می‌گردد



شکل ۴-۱۲

وقسمت دیگر به‌صورت انرژی پتانسیل درجسم ذخیره می‌شود: (شکل ۴-۱۲):

$$W = fd + mgh$$

۴-۷) - دیمانسیون انرژی جنبشی همان دیمانسیون کار است، زیرا

$$\frac{1}{2}M(LT^{-1})^2 = \frac{1}{2}ML^2T^{-2}$$

۴-۸) - گلوله پس از برخورد به‌سطح صیقلی و سخت دوباره به‌طرف بالا برمی‌گردد و اگراتلاف انرژی درکار نباشد تمام انرژی جنبشی آن دوباره به‌انرژی پتانسیل تبدیل می‌شود وبه‌همان ارتفاع سقوط اولیه خود می‌رسد. درعمل به‌علت وجود اصطکاک وتغییر شکل جزئی که درسطح برخورد به‌وجود می‌آید مقداری ازانرژی تلف‌می‌شود وگلوله نمی‌تواند به‌ارتفاع اولیهٔ خود برسد.

۵

حرکات ارتعاشی و امواج

ارتعاش و موج در بسیاری از پدیده‌های جهان نقش مهم و اساسی دارند. موج چنان که می‌دانیم، یکی از وسیله‌های انتقال انرژی از جایی به‌جای دیگر است. انتقال انرژی به دوراه صورت می‌گیرد: یکی به وسیله انتقال ماده، به این معنی‌که ماده به‌هنگام انتقال، انرژی جنبشی و انرژی درونی خودرا نیزباخود می‌برد، دیگری به‌وسیله موج ودراین‌گونه انتقال انرژی، ماده منتقل نمی‌شود.

موج انواع مختلف دارد ولی طرز انتقال انرژی توسط همه انواع‌آن یکسان است: موج دراثرحرکت ارتعاشی ماده تولیدمی‌شود وبه‌وسیله محیط مادی منتقل می‌گردد وانرژی حاصل ازمنبع‌ارتعاش را باخود انتقال می‌دهد. امواج الکترومانیتیك در خلاء نیز منتشر می‌شوند. علاوه براین ارتعاش وموج هردو درتوجیه ودرك بسیاری ازمباحث فیزیك، مانند صوت، پاره‌ای ازمظاهر نور، گرما، میکروویو و دنیای وراء اتمها وهسته‌ها نقش مهم واساسی دارند.

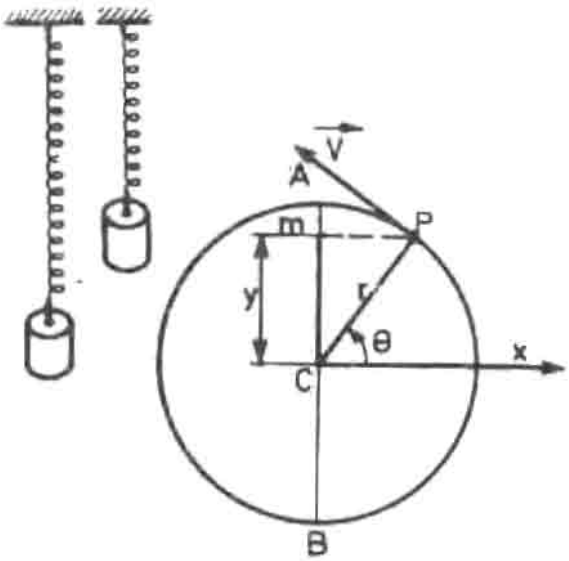
هر حرکتی چه ساده وچه مرکب، اگر در زمانهای مساوی و متوالی به نام «زمان تناوب» عیناً تکرار شود «حرکت تناوبی» نامیده می‌شود. حرکات تناوبی سریع را معمولا «حرکت ارتعاشی» می‌نامند. ما، درزندگی روزمرهٔ خود معمولا باحرکات تناوبی ساده‌ای سروکار داریم: حرکت آونگ یك ساعت دیواری یا حرکت چرخ رقاصك یك‌ساعت مچی ویا حرکت ارتعاشی‌یك‌شاخه دیاپازن مثالهای خوبی از این نوع حرکات هستند.

درکتاب فیزیك سال دوم، شما تا اندازه‌ای با حرکات موجی آشنا شده‌اید. دراین بخش حرکات تناوبی ساده را با شرح بیشتری دنبال خواهید کرد ودر بخشهای بعد پدیده‌های تناوبی صوت و نور و الکتریسیته را خواهید آموخت.

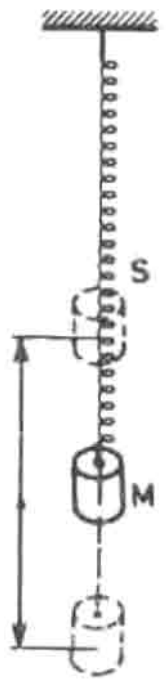
حرکت نوسانی ساده

حرکت نوسانی ساده به حرکتی گفته می‌شود که روی‌یک‌خط راست در دوطرف یک نقطه واقع در وسط مسیر حرکت باشتابی متناسب بافاصله‌متحرک ازاین نقطه صورت‌گیرد وجهت شتاب همواره‌متوجه این‌نقطه باشد.حرکت نوسانی‌ساده‌یکی ازنمونه‌های مهم حرکت تناوبی است‌که برروی خطراست انجام می‌گیرد، مانند حرکت‌نوسانی وزنه‌ای‌که به‌انتهای فنر سبکی آویخته شده و در راستای قائم با دامنه کم نوسان می‌کند (شکل ۵-۱) ویاحرکت‌باندول ساده‌ای‌که با زاویه خیلی کوچك نوسان می‌نماید و یا حرکت ارتعاشی شاخه یك دیاپازن و مانند اینها.

برای بررسی این حرکت درنظر بگیریم که



شکل ۵-۲- نمودار حرکت نوسانی ساده بر روی یك خط راست.



شکل ۵-۱- وزنه‌ای‌که به انتهای یك فنر سبك آویخته شده است در راستای قائم با دامنه‌کم حرکت نوسانی ساده انجام می‌دهد.

یك ذره P برروی‌دایره‌ای‌که شعاع آن برابر دامنه حرکت‌نوسانی است (وآن را دایره مرجع می‌تامیم) باسرعت ثابت v حرکت کند به طوری‌که مدت یك دور حرکت آن روی این دایره برابر زمان تناوب (یعنی زمان یك‌نوسان کامل) حرکت نوسانی باشد. حرکت تصویر این ذره (یعنی نقطه m) برروی یك خط راست واقع درصفحه این‌دایره (مثلا قطرAB) نشان دهنده حرکت‌نوسانی‌ساده است. (شکل ۵-۲)

این کیفیت را می‌توان با انداختن سایه یك چوب پنبه کوچك‌که روی لبهٔ یك قرص مقوائی یا چوبی نصب شده است توسط یك لامپ روشن بر روی دیوار عملا نمایش داد. وقتی‌که قرص به دور محور خود می‌چرخد سایه چوب پنبه روی دیوار حرکت نوسانی ساده در امتداد یك خط راست انجام می‌دهد.

سرعت لحظه‌ای حرکت تصویر m روی قطر AB ، از Aبه‌B یا برعکس از Bبه‌A ثابت نیست و این سرعت درنقطه C بیشترین مقدارخودرا دارد ودر نقاط AوB صفر است، زیرا دراین نقاط‌تصویر m دریك لحظه‌متوقف شده وجهت حرکت‌آن تغییر می‌کند.

فاصله تصویر m درهرلحظه ازمرکزC یعنی Cm=y را «بعد حرکت» گویند اندازه y بین صفر (درمرکز C) و r± (در نقاط A و B) تغییر می‌کند.

بیشترین مقدار y یعنی r را « دامنه‌حرکت » می‌نامند.

بعد متحرك m در حرکت نوسانی بر روی خط راست AB بستگی به‌جای نقطه P روی‌دایره مرجع دارد و با زاویه θ مشخص می‌شود (شکل ۵-۲) . زاویه θ ، که مشخص‌کننده موقعیت نقطه P روی دایره مرجع ونقطه m روی قطراین دایره است « فاز حرکت » نامیده می‌شود.

زمان یك نوسان کامل را « زمان تناوب » یا « پریـد » حرکت می‌نامند و به T نمایش می‌دهند. اگر حرکت نـوسانی از نقطه A شروع شود، یك نوسان کامل وقتی انجام می‌گیردکه متحرك از A به B برود و دوباره به A برگردد. اگر حرکت‌از C شروع شود و متحرك به B برود و دوباره به C برگردد فقط نیم‌نوسان انجام داده‌است ونوسان وقتی‌کامل می‌شود کـه این حرکت ازCبه‌A ادامه یابد ومتحرك دوباره به C برگردد .

تعداد نوسانهای کامل یا تعداد ارتعاشها در واحد زمان را « تواتر» یا « فرکانس » ویا«بسامد»[1] حرکت می‌نامند وآن را به f نمایش می‌دهند . بین پریـد T وفرکانس f چنان‌که می‌دانیم رابطه‌های زیر برقرار است:

$$T=\frac{1}{f} \quad و \quad f=\frac{1}{T} \qquad (۵-۱)$$

پرسش ۵-۱- وقتی‌که حرکت نوسانی‌ساده برپایه حرکت دایره‌ای تعریف می‌شود چه‌رابطه‌ای بین تواتر حرکت نوسانی و تعداد دورهای متحرك در ثانیه برمسیر دایره‌ای برقرار است؟

واحد تواتر چنان کـه می‌دانیم « هرتز » با علامت اختصاری Hz است ویك هرتز بنابه‌تعریف معادل یك نوسان کامل یا یك ارتعاش‌کامل درمدت یك ثانیه است.

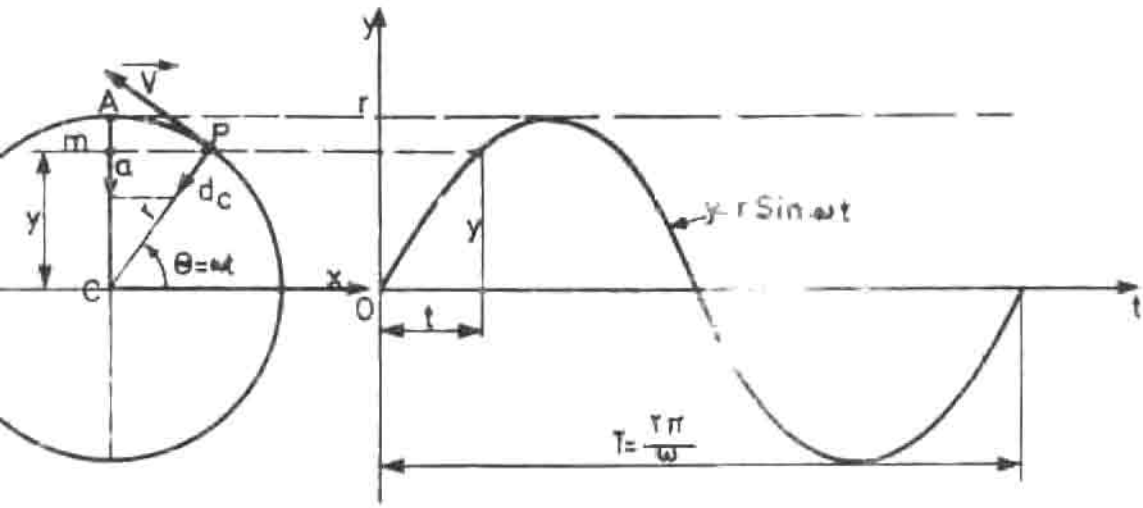
معادله‌های حـرکت و سرعت و شتاب در حرکت نوسانی ساده

الفـ معادله حرکت- مبدأزمان(یعنی لحظهٔ $(t_0=0)$ را لحظه‌ای‌بگیریم‌که متحرك m درنقطه C است بعد حرکت نوسانی یعنی فاصله Cm=y درلحظه t با توجه به شکل (۵-۳) از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$y=r\sin\theta$$

چون‌نقطه P روی دایره‌مرجع باسرعت ثابت‌حرکت می‌کند شعاع حامل این نقطه (یعنی CP) باسرعت

۱- فرهنگستان زبان ایران بجای‌کلمه‌های تواتر و فرکانس، که اولی عربی و دومی لاتینی است، کلمه فارسی « بسامد » را انتخاب‌کرده است.



شکل ۵-۳ دایره مرجع برای نشان دادن حرکت نوسانی ساده در راستای محور yها

زاویه‌ای ثابت ω می‌چرخد بنابراین $\theta=\omega t$ است و داریم:

$$y=r\sin\omega t \qquad (۲-۵)$$ معادله حرکت نوسانی ساده

چون $\omega=\frac{2\pi}{T}=2\pi f$ است پس:

$$y=r\sin\frac{2\pi}{T}t=r\sin 2\pi f t \qquad (۳-۵)$$

پرسش ۵-۲- اگر حرکت تصویر نقطه P را بر قطر افقی دایره مرجع در نظر بگیریم معادله حرکت آن به چه صورت خواهد بود؟

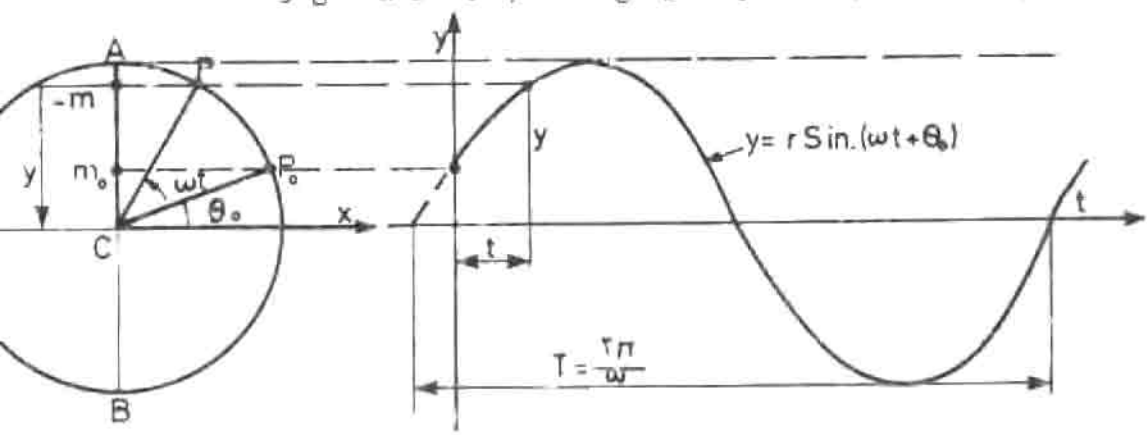
اگر درمبدأ زمان متحرك از نقطه m_0 حرکت کند (شکل ۵ - ۴) معادله حرکت نوسانی ساده به‌صورت زیر نوشته می‌شود :

$$y=r\sin(\omega t+\theta_0) \qquad (۴-۵)$$

در این صورت فاز حرکت $\omega t+\theta_0$ است و θ_0 « فاز اولیه » نامیده می‌شود.

وقتی‌که نقطه P روی دایره مرجع حرکت می‌کند، زاویه ωt به طور یکنواخت افزایش می‌یابد و مبدأ سنجش آن همواره θ_0 است، ولی مبدأ سنجش فاز کل $\omega t+\theta_0$ محور x است.

پرسش ۵-۳- زاویه‌های ωt و θ_0 برحسب چه واحدی بیان می‌شوند؟



شکل ۵-۴ نمایش فاز اولیه درحرکت نوسانی ساده

دو نمودار سینوسی نمایش داده شده است که تغییرات بعد y را برحسب زمان t دریک پریود نشان می‌دهند. در این دو نمودار زمان t روی محور افقی وبعد y روی محور عمود برآن نمایش داده شده است. نمونه این نمودارها را می‌توان عملاً رسم کرد: به وزنه M آویخته شده به انتهای فنر می‌توان یك قلم متصل کرد که نوك آن روی نوار کاغذی که به‌طور یکنواخت حرکت می‌کند خط بکشد. وقتی که وزنه نوسان کند روی نوار کاغذ متحرك منحنی سینوسی رسم می‌شود (شکل ۵-۵) این منحنی نمایش تغییرات بعد y برحسب زمان است.

ب- معادله سرعت- میدانیم سرعت لحظه‌ای مشتق معادله حرکت است . بنابراین برای به دست آوردن معادله سرعت لحظه‌ای متحرك در حرکت نوسانی ساده ، کافی است مثلاً از معادلهٔ (۵ -۲) مشتق بگیریم.[۱]

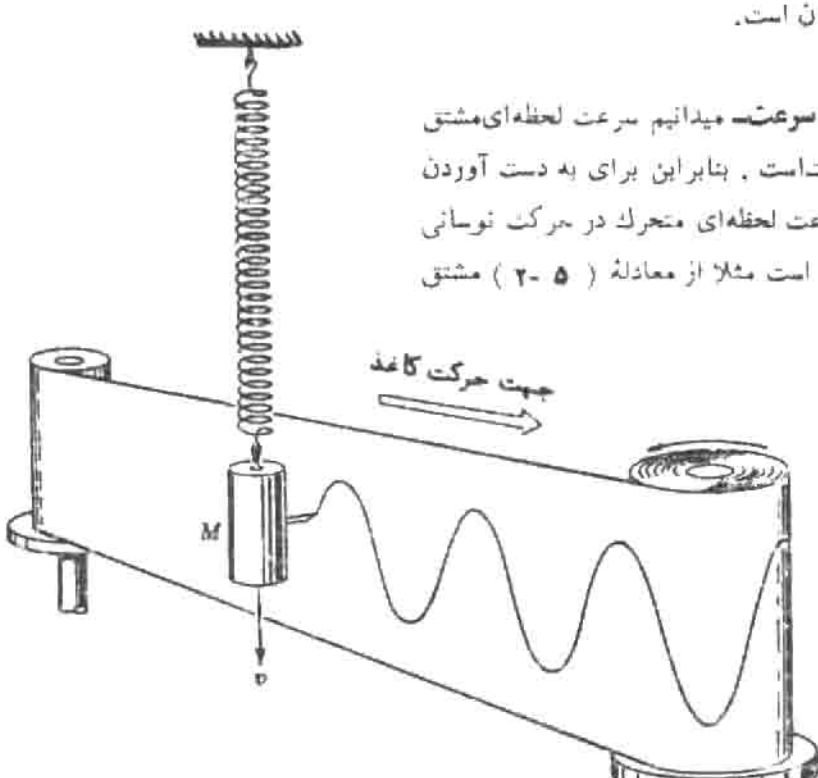
$$v = \frac{dy}{dt} = r\omega\cos\omega t \qquad (۵-۵)$$

بیشترین مقدار سرعت برابر است با :

$$v_{max} = r\omega \qquad (۵-۶)$$

وآن مربوط به لحظهٔ $t = 0$ و یا $t = KT$ است (K یك عدد درست است) یعنی موقعی که متحرك از نقطه C می‌گذرد.

پرسش ۵-۴ - درچه لحظاتی از یك پریود T سرعت متحرك صفر می‌شود؟



شکل ۵-۵ قلمی که به وزنه M متصل است به هنگام نوسان وزنه روی نوار کاغذ متحرك، منحنی سینوسی رسم می‌کند.

۱- زیرا بطوری‌که در درس ریاضی خوانده‌اید مشتق $\sin\omega t$ برابر $\omega\cos\omega t$ است.

پ ـ معادلهٔ شتاب ـ شتاب لحظه‌ای مشتق معادله سرعت است و داریم[1]

$$a = \frac{dv}{dt} = -r\omega^2 \sin\omega t \qquad (۵-۷)$$

یا :

$$a = -\omega^2 y \qquad (۵-۸)$$

تعبیر علامت منفی این است که جهت بردار شتاب a همواره متوجه مرکز C است، به‌عبارت دیگر جهت y و a مخالف یکدیگر است. بیشترین مقدار شتاب مربوط به‌حالتی است که $y = r$ باشد $\left(\omega t = \frac{\pi}{2}\right)$ یعنی :

$$a_{max} = \omega^2 r \qquad (۵-۹)$$

دراین حالت متحرك دریکی از دوانتهای مسیرخود یعنی در نقطه A یا B است. درهمین نقاط است که سرعت متحرك صفر می‌شود و جهت حرکت تغییر می‌کند.

محاسبه زمان تناوب

اگر در رابطهٔ (۵-۸) به‌جای ω معادل آن $\frac{2\pi}{T}$ را بگذاریم زمان تناوب T حساب می‌شود :

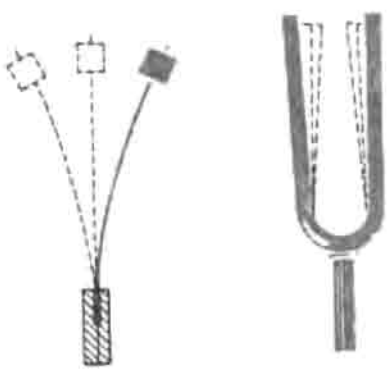
$$a = -\frac{4\pi^2}{T^2} y$$

و :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{-y}{a}} \qquad (۵-۱۰)$$

این رابطه کلی است و در مورد هر حرکت ارتعاشی یانوسانی ساده به‌کار رود زیرا زمان تناوب برحسب بعد حرکت و شتاب مربوط به آن حساب می‌شود[2].

برای تولید حرکات ارتعاشی یا نوسانی ساده می‌توان ازیك دیاپازن (شکل ۵ـ۶ الف) یایك تیغهٔ فنری که‌یك سرآن درجائی محکم‌شده و روی‌آن‌وزنه‌ای جابه‌جا می‌شود (شکل ۵ـ۶ ب) نیزاستفاده‌کرد. هرچه شاخه‌های دیاپازن نازکتر و طول آنها



الف ب

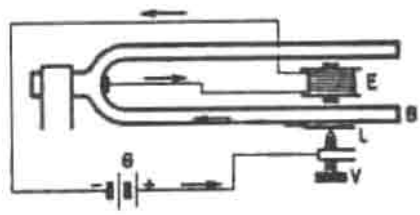
شکل ۵ـ۶ از دیاپازن و تیغه فنری وزنه‌دار می‌توان برای تولید ارتعاشات ساده استفاده کرد.

۱ـ مشتق $\cos\omega t$ برابر $-\omega\sin\omega t$ است.

۲ـ چون علامتهای y و a مخالف یکدیگر است باید هنگام عددگذاری رعایت علامت بشود تا زیر رادیکال مثبت گردد.

بزرگتر باشد زمان تناوب آن بـزرگتر و در نتیجه فرکانس آن کمتر است .

دیاپازن به عنوان یك چشمه استاندارد مولد اصوات موسیقی توسط موسیقی‌دانان به‌کار می‌رود. علاوه براین درپاره‌ای ازموارد از دیاپازن برای ثبت زمانهای کوتاه‌مساوی‌ومتوالی $\left(\text{مثلاً تا} \frac{1}{1000} \text{ ثانیه}\right)$ استفاده می‌شود. در این صورت برای جلوگیری از کاهش تدریجی دامنه ارتعاش شاخه‌های دیاپازن، از یك دیاپازن الکتریکی استفاده می‌شود (شکل ۵ ـ۷)



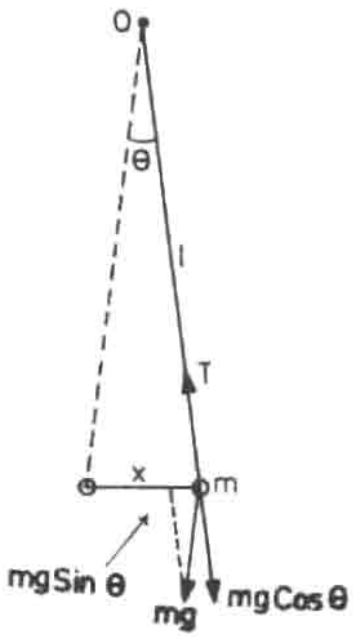
شکل ۵ـ۷ ـ دیاپازن الکتریکی وقتی‌که شاخه B دیاپازن ارتعاش می‌کند جریانی‌که ازآهن ربای الکتریکی E می‌گذرد در محل تماس تیغه فنری L و پیچ V مرتباً قطـع و وصل می‌گردد. هر بار که جریان وصل می‌شود آهن‌ربای الکتریکی شاخه‌های دیاپازن را جلب‌می‌کند و درنتیجه ضربه‌های متوالی که توالر آنها برابر توالر ارتعاشات دیاپازن است بشاخه‌ها وارد می‌شود و مانع میرائی دامنه می‌گردد .

پرسش ۵ـ۵ ـ دیاپازن را چگـونه بایـد بسازند تا فرکانس ارتعاشات آن زیاد شود ؟

پرسش ۵ـ۶ ـ در چه صورت فرکانس تیغه فنری شکل ۵ ـ۶ ب بیشتر می‌شود؟

پرسش ۵ـ۷ـ به نظر شما چگونه می‌توان فرکانس یك دیاپازن را معین کرد ؟

آونگ ساده ـ آونگ ساده چنان که می‌دانیم از یك گلوله کوچك به‌جرم m تشکیل یافته است که به انتهای نخی به جرم ناچیزآویزان است. اگر دامنه نوسان پاندول کوچك باشد (زاویه انحراف θ کمتر از ۶ درجه) می‌توان گفت که گرانیگاه گلوله روی یك خط تقریباً راست و افقی دارای حرکت نوسانی ساده‌است. اگر x اندازه انحراف گلوله از وضع‌تعادل باشد (شکل ۵ ـ۸) زمان تناوب آونگ از رابطه



شکل ۵ـ۸ حرکت یك آونگ ساده با دامنه‌کوچك درحکم یك حرکت نوسانی ساده است .

زیر حساب می‌شود :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{-x}{a}} \qquad (۱۱-۵)$$

اندازه نیروی مؤثری کـه آونگ را به وضع تعادل برمی‌گرداند $mg\sin\theta$ است، زیرا نیروی‌وزن‌گلوله (mg) را می‌تـوان به دو همنه تجزیه کرد : یکی $mg\cos\theta$ در راستای نخ‌که برابرکشش نخ است و با آن خنثی می‌شود .

دیگری همنه $mg\sin\theta$ در راستای مماس بر مسیر حرکت گلوله و عمود برنخ که‌به‌گلوله‌شتاب می‌دهد اگر θ کوچك باشد به‌طوری‌که بتوان $\sin\theta$ را باخود θ (برحسب رادیان) برابر گرفت اندازه این همنه برابر $F=mg\theta$ است . اگر طول آونگ را به l نمایش دهیم داریم:

$$F=mg\frac{x}{l} \quad و \quad \theta=\frac{x}{l}$$

شتابی‌که جرم m در اثر این نیرو می‌گیرد از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$ma=-mg\frac{x}{l}$$

(علامت منفی برای این است که شتاب $\vec{a}$ و تغییر مکان $\vec{x}$ در خلاف جهت یکدیگرند)

یا $$-\frac{x}{a}=\frac{l}{g}$$

برای محاسبه T زمان تناوب آونگ کافی است در رابطه (۵ - ۱۱) به جای $\frac{-x}{a}$ معادل آن $\frac{l}{g}$ را بگذاریم بنابراین :

$$T\simeq 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \qquad (۱۲-۵)$$

دراین رابطه T زمان تناوب آونگ ساده‌ای است‌که بادامنه‌کم (از °۴ کوچکتر) نوسان می‌کند .

این رابطه نشان می‌دهدکه زمان تناوب‌آونگ ساده با جذر طول آن نسبت مستقیم و با جذر شتاب جاذبه نسبت معکوس دارد.

مثال - مطلوب است طول آونگ ساده‌ای‌که زمان نوسان‌کامل آن $T=۱/۰^s$ است.

داریم :

$$l=\frac{gT^2}{4\pi^2}=\frac{\left(۹/۸۰\frac{m}{S^2}\right)\times(۱/۰s)^2}{۴\times(۳/۱۴)^2}$$

$$\simeq ۰/۲۵m$$

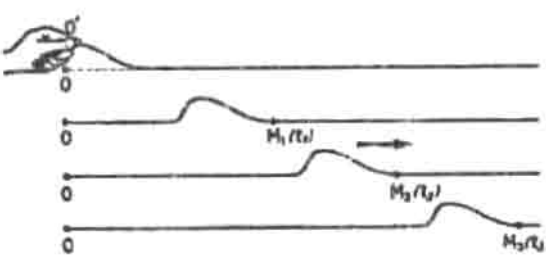
پرسش ۵-۸ - چرا رابطه (۵ - ۱۱) در مواقعی که دامنهٔ نوسان پاندول بزرگ باشد صدق نمی‌کند ؟

پرسش ۵-۹ - آزمایش نشان می‌دهدکه‌زمان تناوب آونگ ساده بستگی به جنس وجرم‌آن ندارد. آیا می‌توانید علت آن را بیان‌کنید؟

چگونگی ایجاد و انتشار حرکات موجی

حرکت ارتعاشی هرجسم را می‌توان منبع تولید امواج مکانیکی دانست. برای‌این‌که یك‌جسم بتواند مرتعش شود و منبع تولید موج گردد چنان که دیدیم باید دارای دوشرط زیر باشد :

اولا هنگامی که‌ازوضع‌تعادل‌اولیه‌خود منحرف می‌شود و باتغییرشکلی درآن به‌وجود می‌آیدنیروی برگرداننده‌ای تولید شودکه جسم را دوباره به‌وضع تعادل اولیه برگرداند.



شکل ۵-۹- انتشار یك آشفتگی بصورت تك موج (بالا) درطول طناب

ثانیاً قابلیت تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی وبرعکس را داشته باشد.

فنر ، تیغهٔ مرتعش ، دیاپازن ، سیم یک تار نمونه‌های خوبی برای تولید امواج مکانیکی هستند.

درنظر بگیریم که یک سرطناب یا فنر درازی را به‌جایی‌بسته وسردیگرش‌را در دست گرفته‌ایم وآن را در وضعی که بتواندموج را انتقال‌دهد نگاهداشته‌ایم. اگر دستمان را به‌سرعت بالا ببریم و به جای خود برگردانیم این حرکت دست در طناب یك آشفتگی تولید می‌کند که به صورت یك تك موج (به نام پالس [1]) مطابق شکلهای (۵-۹) و (۵-۱۰) در

شکل۵-۱۰- انتشار یك پالس درطول یك فنر که با عکاسی استروبوسکوپی تهیه شده است.

طول طناب یا فنر انتشار می‌یابد.

این آشفتگی به هر نقطه ازطناب که می‌رسدآن نقطه به‌طرف بالاحرکت می‌کند وپس ازعبورآشفتگی دوباره به‌جای خود برمی‌گردد.

دراین‌جا یادآور می‌شویم که آشفتگی پس از رسیدن به‌انتهای طناب وبرخورد به‌مانع برمی‌گردد ولی جهت آن معکوس می‌شود (دراین باره درجای خود بحث خواهیم کرد) .

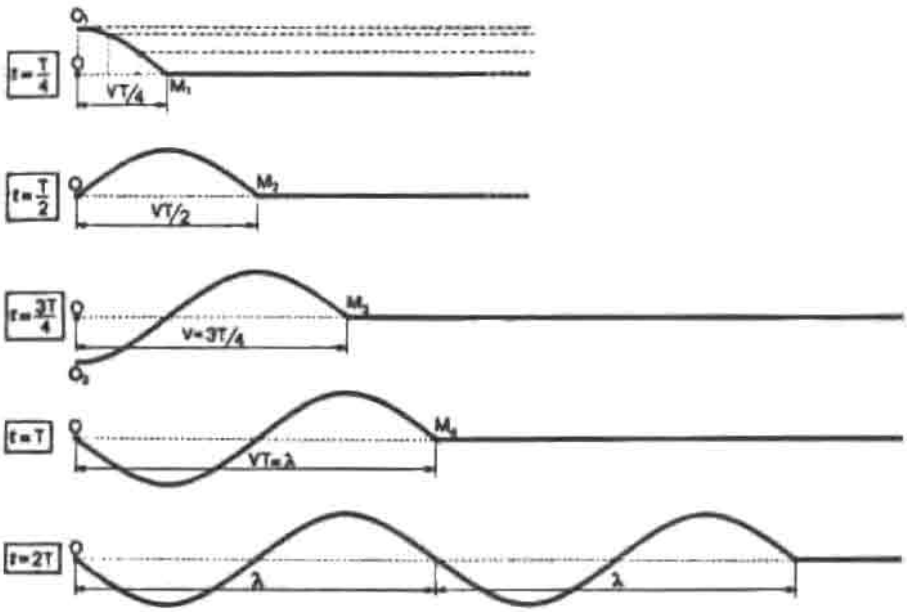
اگر به جای یك تکان سریع و ناگهانی ، به وسیله‌ای یك‌حرکت نوسانی‌ساده ومداوم در راستای عمود برطناب بابربد T به سرطناب داده شود به جای یك‌آشفتگی، امواج ساده سینوسی‌که شکل‌آنها شبیه به‌منحنی سینوسی است مرتباً تولید و در طول طناب منتشرمی‌گردند. هرنقطه ازطناب به‌نوبه‌خود پس از زمانی‌که لازم است تا موج به‌آن نقطه برسد در جای خود با حرکت ارتعاشی نظیر حرکت مبدأ شروع به ارتعاش می‌کند.

شکل ۵-۱۱ ، ایجاد این امواج وانتشار آنها را درلحظه‌های ۰ ، $\frac{T}{۴}$ ، $\frac{T}{۲}$ ، $\frac{۳T}{۴}$ ، T و ۲T به‌ترتیب نشان می‌دهد.

اقسام موجها

۱- موجهای عرضی - امواج عرضی به موجهایی گفته می‌شودکه راستای انتشار آنها در یك محیط برامتدادارتعاش ذرات‌آن محیط عمودباشد. امواجی که درطول‌طناب‌مثال‌بالامنتشرمی‌شوندازنوع امواج عرضی هستند زیرا امتداد ارتعاش هر نقطه از طناب برراستای انتشار موج عمود است . امواجی هم که به‌صورت برجستگیها وفرو رفتگیهای دایره‌ای‌شکل

۱- Pulse



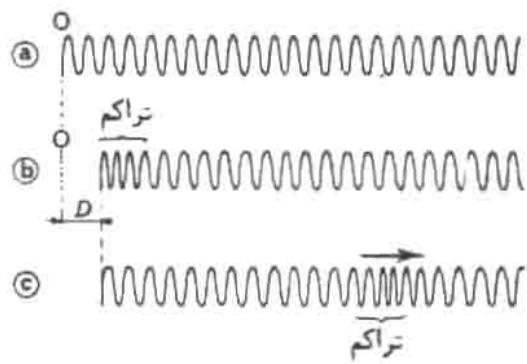
شکل ۵ -۱۱- انتشار ارتعاشات ساده (سینوسی) در طول یك طناب

برسطح آب منتشرمی‌شوند چنان‌که می‌دانیم ازنوع موجهای عرضی هستند.

۲- موجهای طولی - امواج‌طولی‌موجهایی‌هستند که راستای انتشارآنها دریك محیط باراستای‌ارتعاش ذرات محیط یکی است. مثلا اگرچند حلقه ازسیم نرنرم و دراز را که با نیروی‌کمی‌کشیده شده است به هم نزدیك کرده و رها سازیم این حلقه‌ها دوباره ازهم باز می‌شوند ولی حلقه‌های مجاور آنها به هم نزدیك‌می‌گردند و این تراکم وانبساط مرتباً درطول فنرمنتشرمی‌شودتابه‌انتهای‌آن‌برسد (شکل ۵-۱۲) وقتی‌هم یك دیاپازن درهوامرتعش می‌شودشاخه‌های آن مولکولهای هـوای مجاور خود را به ارتعاش درمی‌آورند. این ارتعاشها مولکول به‌مولکول به صورت یك رشته تراکم و انبساط متوالی به شکل امواج‌طولی‌وبه‌نام‌موجهای‌صوتی‌درتمام‌جهات‌درهوا انتشار می‌یابند (به‌بخش حرکات موجی‌کتاب فیزیك سال دوم مراجعه‌کنید).

۳- موجهای پیچشی- اگر سیم فنر را که در دست داریم در جهت موافق و مخالف حرکت عقربه‌های ساعت بایك حرکت نوسانی منظم بچرخانیم یك‌نوع حرکت نوسانی به‌صورت تغییرمکان زاویه‌ای درفنر ایجاد می‌شود و درطول آن انتشار می‌یابد. این‌نوع امواج را **موجهای پیچشی** نامیده‌اند در این نـوع امواج، حرکت نوسانی ذرات محیط ، دریك صفحه عمود برامتداد انتشار موج صورت می‌گیرد. هرسه نوع‌این‌موجها می‌توانند درجامدات منتشرشوندولی

درمایعات و گازها فقط امواج طولی انتشار می‌یابند، یعنی مولکولهای هوا یاآب فقط در راستای انتشار



شکل ۵-۱۲- انتشار یک آشفتگی طولی در یک فنر

موج می‌توانند نوسان کنند.

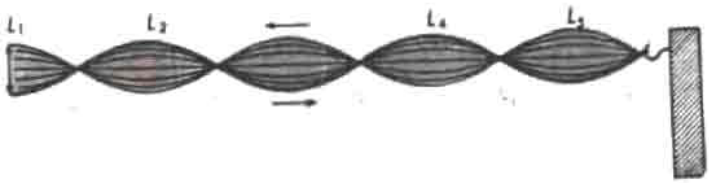
موج عرضی دارای ویژگی خاصی است که آن را از دونوع موج طولی وپیچشی متمایز می‌کند: درموج طولی، ارتعاش فقط در راستای انتشار موج صورت می‌گیرد، درموج پیچشی هم ارتعاش فقط به دور محور انتشار موج انجام می‌شود ولی در موج عرضی امتداد ارتعاش عمود برراستای انتشار موج است و تعداد راستاهای عمود برراستای انتشار نامحدود است . مثلا برای تولید امواج عرضی در طول یک طناب افقی می‌توان سرطناب را در راستای قائم یاهرراستای دیگری که عمود برامتداد طناب باشد حرکت نوسانی داد .

وقتی که راستای ارتعاش یک موج عرضی ثابت بماند به‌عبارت دیگر راستاهای انتشار و ارتعاش در یک صفحه قرار داشته‌باشند می‌گوئیم موج «پلاریزه» است .

پرسش ۵-۱۰- با چه وسیله‌ای می‌توان تشخیص داد که امواج عرضی در طول یک طناب پلاریزه هستند؟

۴- موجهای ایستاده - این موجها را به‌این جهت ایستاده می‌گویندکه برخلاف امواجی که شرح آنها گذشت درمحیط منتشر نمی‌شوند. تقریباً تمام صوتهای حاصل ازسازهای موسیقی، درنتیجهٔ تشکیل امواج ایستاده به وجود می‌آیند . موجهای ایستاده را می‌توان درهرنوع ماده اعم ازجامد یامایع وباگاز به‌وجود آورد وبرای تولید آنها کافی است دو دسته موج هم فرکانس را درخلاف جهت یکدیگردرمحیط مورد نظر انتشار داد. درشکل (۵-۱۳) چگونگی تشکیل موجهای ایستاده به‌وسیله امواج عرضی در یک طناب نشان داده شده است :

یک سرطناب به پایه‌ای بسته شده است و سر دیگر آن باحرکت نوسانی ساده‌ای به‌ارتعاش درمی‌آید. موجهای حاصل ازاین ارتعاش درطول طناب منتشر می‌شوند و پس از رسیدن به‌انتهای طناب وبرخورد



شکل ۵-۱۳- امواج ایستاده حاصل ازترکیب امواج عرضی و مارپایش آنها در طول یک طناب. خط پررنگ نمایش وضع طناب دریک لحظه موردنظر وحلقهای کم‌رنگتر نمایش وضع طناب در لحظه‌های دیگر است.

به‌مانع برمی‌گردند و یا امواجی که به‌طرف مانع پیش می‌روند برخورد می‌نمایند. اگر فرکانس منبع ارتعاش، یا طول طناب و کشش آن درست و مناسب انتخاب شود در طول طناب مطابق شکل ، امواج ایستاده به وجود می‌آید . یعنی در پاره‌ای از نقاط ، مانند L_1 ، L_2 و ... طناب به‌شدت مرتعش می‌شود. این نقاط که بیشترین دامنه حرکت را دارند شکم نامیده می‌شوند. نقاط دیگری مانند N_1 ، N_2 و ... که در فواصل بین شکمها قرار دارند بی‌حرکت می‌مانند، این نقاط گره نامیده می‌شوند . در شکل (۵ -۱۴) چگونگی تشکیل امواج ایستاده در یک فنر به وسیله امواج طولی نشان داده شده است . یک سر فنر به پایه‌ای بسته شده است و سر دیگر آن توسط شاخهٔ دیاپازنی که در حال ارتعاش است به‌جلو و عقب برده می‌شود برای اینکه امواج ایستاده به خوبی در فنر ایجاد شوند باید فرکانس دیاپازن یا طول و کشش فنر درست و مناسب اختیار شود. (علت تشکیل موجهای ایستاده را بعداً خواهیم دید).

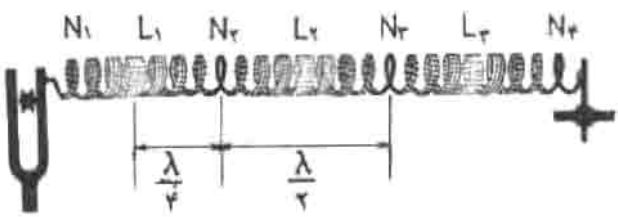
سرعت انتشار امواج در یک محیط همگن - در یک محیط همگن که شرایط فیزیکی تمام نقاط آن یکسان است[1]، امواج در تمام جهات با سرعت ثابت منتشر می‌شوند. به همین جهت مثلا امواج در سطح آب به شکل دایره پخش می‌گردند . آزمایش نشان می‌دهد که :

اولاً، سرعت انتشار موج در یک محیط بستگی به شکل موج و دامنه آن ندارد به‌شرط این که تغییر شکلی که در اثر انتشار موج در محیط حاصل می‌شود خیلی بزرگ نباشد.

ثانیاً، سرعت انتشار موج در یک محیط بستگی به جنس آن محیط و شرایط فیزیکی آن دارد . مثلا سرعت انتشار موجهای عرضی در طول یک طناب در حالت عادی از رابطهٔ زیر حساب می‌شود .

$$V = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \qquad (۱۳-۵)$$

که در آن F نیروی کشش طناب برحسب نیوتن و μ جرم واحد طول طناب برحسب کیلوگرم برمتر و V سرعت انتشار موج برحسب متر بر ثانیه است. مثلا سرعت انتشار یک ضربه (موج عرضی) در یک طناب لاستیکی به‌طول ۵ متر و به‌جرم ۰/۵ کیلوگرم (یعنی با جرم واحد طول $\mu = \frac{۰/۵}{۵} = ۰/۱ \frac{kg}{m}$) که با نیروی ۱۰ نیوتن کشیده شده باشد برابر است با:



شکل ۵-۱۴- چگونگی تشکیل امواج طولی ایستاده در یک فنر

۱- محیطی که شرایط فیزیکی در تمام نقاط آن یکسان است محیط ایزوتروپ نامیده میشود .

$$V = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{10}{0/1}} = \sqrt{100} = 10\frac{m}{s}$$

طول موج ـ طول موج بنا به تعریف، مسافتی است که موج درمدت یك پرید می‌پیماید، هرگاه منبع مولد موج دارای حرکت نوسانی ساده با تواتر f و پرید T باشد و امواج حاصل از آن با سرعت ثابت V دریك محیط منتشرشوند طول موج بر اساس تعریف بالا به صورت رابطه زیر نمایش داده می‌شود:

$$\boxed{\lambda = VT = \frac{V}{f}} \qquad (۱۴-۵)$$

شکل ۱۱-۵ نشان می‌دهدکه طول موج‌فاصله دو نقطه متوالی از محیط انتشار موج است که وضع ارتعاشی آنها یکسان می‌باشد.

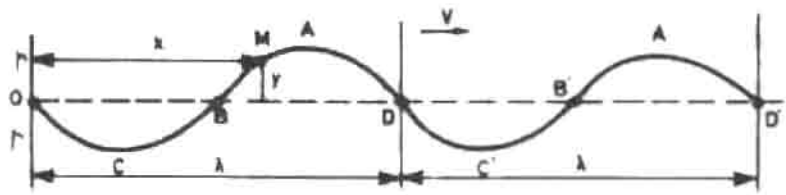
بایدتوجه داشت‌که T یا f فقط ازویژگیهای حرکت ارتعاشی منبع ارتعاش است و V فقط از ویژگیهای محیطی است‌که حرکت ارتعاشی در آن انتشار می‌یابد، بنابراین اهمیت رابطه ۱۴-۵ در این است‌که ارتباط این ویژگیها را نشان می‌دهد.

بررسی وضع ارتعاشی هر نقطه از محیط انتشارـ می‌خواهیم وضع ارتعاشی یك نقطه غیرمشخص از محیط انتشار موج را که به فاصله x ازمبدأ ارتعاش واقع شده است در یك لحظهٔ غیرمشخص t بررسی کنیم. شکل ۱۵-۵ وضعیت یك طناب را موقعی نشان می‌دهد که نقطه o (سر طناب) دو ارتعاش کامل درراستای عمود برطناب انجام داده وبه محل آغاز حرکت خود برگشته است و امواج حاصل از این حرکت در طول طناب منتشر شده‌اند.

(مبدأ زمان یعنی لحظهٔ $t_0 = 0$ را طوری انتخاب کرده‌ایم که بعد اولیه نقطه o صفر بوده است) اگر دامنه ارتعاش مبدأ O را به r نمایش دهیم بعد حرکت آن در لحظهٔ غیرمشخص t برابر خواهد بود با :

$$y_0 = r\sin\frac{2\pi}{T}t$$

در لحظه‌ای‌که مبدأ o پس ازانجام یك نوسان‌کامل می‌خواهد نوسان بعدی را شروع‌کند، نقطه D که به فاصله $\lambda = VT$ از مبدأ o واقع است نخستین نوسان خود را نسبت به‌نقطه o پس ازگذشت‌زمان $t_D = T = \frac{\lambda}{V}$ آغاز می‌کند . به همین ترتیب ، حرکت ارتعاشی یك نقطه غیرمشخص مانند M که به فاصله x ازمبدأ o واقع است پس ازگذشت‌زمان $t_M = \frac{x}{V}$ آغاز می‌شود . به عبارت دیگر حرکت



شکل ۱۵-۵- موجهای عرضی که از چپ به راست انتشار می‌یابند.

ارتعاشی نقطه M از o به‌اندازه زمان $t_M = \frac{x}{V}$ تأخیر دارد. بنابراین اگر کاهش دامنه نوسان (به سبب اصطکاک) ناچیز باشد می‌توان گفت که بعد حرکت ارتعاشی نقطه M درلحظهٔ t همان است که نقطه o درلحظه $t - t_M$ داشته است یعنی:

$$y_M = r \sin \frac{2\pi}{T}(t - t_M)$$

که اگر به جای t_M مقدار $\frac{x}{V}$ وبه‌جای VT معادل آن λ را بگذاریم خواهیم داشت:

$$y_M = r \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \qquad (۵-۱۵)$$

زاویه $2\pi\frac{x}{\lambda}$ را اختلاف فازبین حرکتهای ارتعاشی نقطه M و مبدأ o می‌نامند. اگر حرکت ارتعاشی مبدأ o ادامه‌یابد درطول‌طناب‌نقاطی مانند D'وD و . . . یافت می‌شوند که با مبدأ o در یك وضع ارتعاشی هستند.

فاصله‌این نقاط از مبدأ به‌ترتیب λوλ۲و... وkλ است(k عددی درست ومثبت است) می‌گوئیم این نقاط با مبدأ « هم فاز » هستند. فاصله این نقاط از یکدیگر نیز مضرب درستی از λ است بنابراین کلیه نقاطی که فاصله‌هایشان از مبدأ ارتعاش یا از یکدیگر مضرب درستی از λ است هم فاز هستند.

پرسش ۵-۱۱- چگونه بااستفاده ازاختلاف فاز $2\pi\frac{x}{\lambda}$ می‌توان‌این‌کیفیت‌را بامحاسبه نشان‌داد ؟

نقاط A'وA و... به‌وضع بیشترین تغییرمکان خود درجهت بالا رسیده‌اند. این نقاط نیز بایکدیگر تغییر مکان خود ولی در جهت پائین رسیده‌اند و با یکدیگر نیز هم فازند ولی جهت حرکت ارتعاشی نقاط CوA خلاف یکدیگر است: می‌گوئیم این‌نقاط نسبت به هم در « فازمتقابل » هستند.

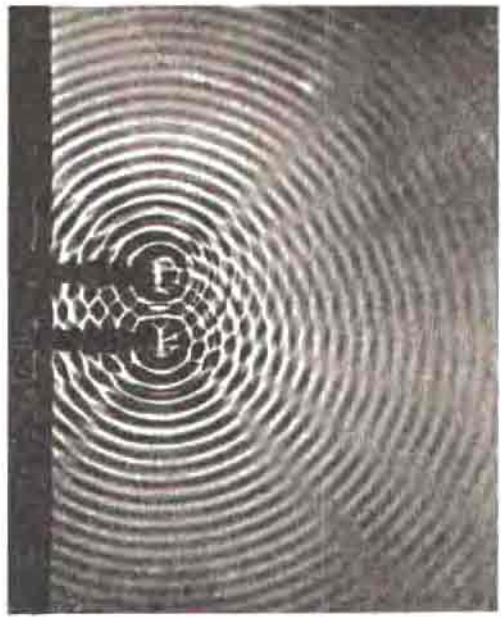
نقاطی مانندB'وBو... درطول طناب وجود دارندکه با مبدأ در فاز متقابلند یعنی جهت حرکت وسرعت آنها خلاف جهت‌حرکت وسرعت مبدأاست فاصله این نقاط ازمبدأ به ترتیب $\frac{\lambda}{2}$ ، $\frac{3\lambda}{2}$ ، ... و $(2k+1)\frac{\lambda}{2}$ است.

به طور کلی نقاطی که فاصله آنها از مبدأ ارتعاش یا از یکدیگر مضرب فردی از نصف طول موج‌باشد نسبت به‌مبدأیا نسبت به‌هم درفازمتقابلند.

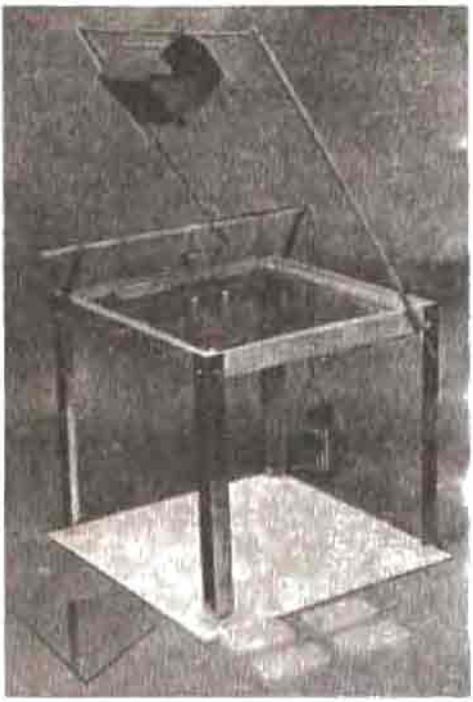
تداخل امواج

اگر دو منبع تولید ارتعاشات سینوسی هم‌پرید و هم دامنه، دریك محیط به‌طور منظم با هم به ارتعاش درآیند امواج حاصل از ارتعاش منظم آنها ضمن انتشار در محیط درهم داخل می‌شوند و در هرنقطه از محیط، بعدهای حرکت بنا به‌اصل ترکیب حرکات ارتعاشی کم دامنه با هم ترکیب شده موجهای ایستاده ویژه‌ای‌را به‌وجود می‌آورند در این حالت می‌گوئیم پدیدهٔ «تداخل» حاصل‌شده است.

شکل ۵-۱۶منظره تداخل امواج حاصل از دو منبع ارتعاش هم‌فاز و هم پرید را بر سطح آب آرام درون ظرف «موج‌نما» نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۶ منظره تداخل امواج عرضی حاصل از دو منبع ارتعاش هم‌پریه و هم‌دامنه برسطح آب‌آرام درون ظرف موج‌نما.



شکل ۵-۱۷ موج نما

موج‌نما یك وسیله‌آزمایشگاهی است که‌برای بررسی رفتار موجها به کار می‌رود و ظرف قاب‌مانندی است که کف آن بشیصفحه شیشه است‌وروی چهارپایه قرار داده می‌شود (شکل ۵ – ۱۷).

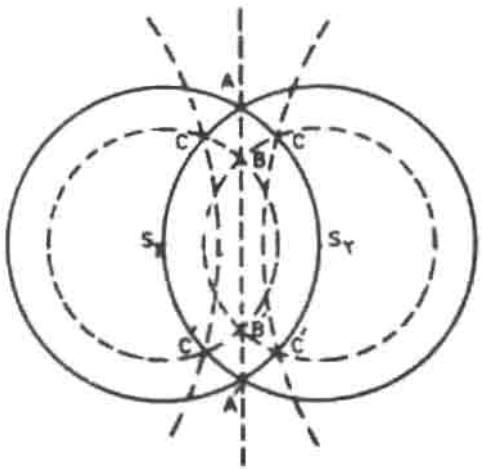
دراین ظرف تا ارتفاع یك یا دو سانتیمتر آب ریخته می‌شود. منبع ایجاد موج معمولاً در وسط یکی ازکناره‌های ظرف قرار دارد[1]. با یك چراغ روشن که بالای سطح آب نصب می‌شود می‌توان تصویر پدیده را روی پردهٔ سفیدی که زیر ظرف روی زمین گسترده می‌شود انداخت علاوه بر این می‌توان با روش استروبوسکپی منظره تداخل را روی پرده به‌ظاهر ساکن نمود و بهتر مشاهده‌کرد.

برای توجیه پدیدهٔ تداخل‌که درشکل ۵ – ۱۶ مشاهده می‌شود فرض می‌کنیم دو منبع باهم شروع به‌ارتعاش کنند. حرکت حاصل از یك ارتعاش‌کامل هریك از دو منبع به شکل یك موج کامل دایره‌ای

۱- منبع ایجاد موج معمولا یك تیغهٔ فلزی است که‌به‌وسیله یك دستگاه الکتریکی (مانند دیاپازن الکتریکی) به ارتعاش در می‌آید به سرآزاد این تیغه یك میله افقی عمود بر راستای تیغه و موازی با سطح آب درون موج‌نما متصل است و روی این میله دو میله دیگر مخروطی شکل و کوتاه در فاصله مناسب به طور قائم قرار دارد که با سطح آب تماس دارند و هنگامی که تیغه مرتعش می‌شود در سطح آب آشفتگی ایجاد می‌کنند و این آشفتگیها به صورت امواج دایره‌ای شکل برسطح آب منتشر می‌شوند.

شکل که شامل یك برجستگی ویك فرورفتگی‌است برسطح آب منتشر می‌شود.

در شکل ۵–۱۸ حالتی را نشان داده‌ایم که دو منبع ارتعاش S_1 و S_2 فقط یك نوسان کامل انجام داده‌اند و امواج حاصل از آنها در یك دیگر تداخل کرده‌اند. در این شکل برجستگی هر موج به‌صورت دایره توپر و فرورفتگی آن به صورت دایره خط‌چین نمایش داده شده است.



شکل ۵–۱۸– تداخل دو موج

در نقاط A و A' و همچنین در نقاط B و B' دامنه ارتعاش ماکزیمم است ولی در نقاط C و C' دامنه ارتعاش صفر است.

A و A' نقاطی هستند که برجستگیهای دو موج درآن جا با یکدیگر تلاقی کرده‌اند. در این نقاط دوموج هم‌فازند و دامنه‌های آنها به‌هم اضافه می‌شود یعنی در این نقاط دامنه ارتعاش ملکولهای آب بیشترین مقدار خود را دارد. در نقاط B و B' که دو فرورفتگی به هم رسیده‌اند عمق فرو رفتگی در سطح آب نیز بیشترین مقدار است. در این نقاط هم دو موج هم فاز هستند و دامنه ارتعاش آنها به‌هم اضافه می‌شود، ولی‌در نقاطی مانند C و C'، دو موج در فاز متقابل به هم می‌رسند، در نتیجه تغییرمکان ذرات محیط در این نقاط در جهت‌مخالف است بنابراین اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند و چون دامنه دو ارتعاش یکی است این نقاط بی‌حرکت می‌مانند.

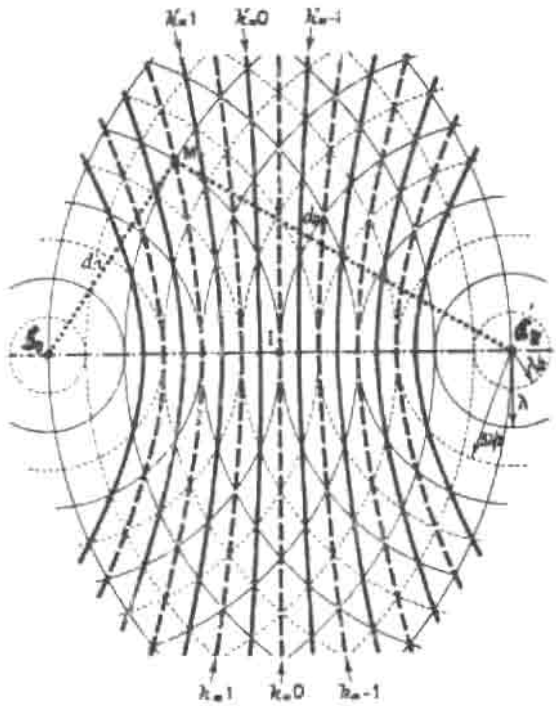
نقاط A و A' و B و B' که بیشترین دامنه حرکت را دارند روی عمود منصف S_1S_2 واقعند و فاصله‌های این نقاط از دو منبع S_1 و S_2 یکی است. نقاط ساکن C و C' روی منحنی‌هایی به‌شکل هذلولی قرار دارند وتفاضل فاصله‌های آنها ازمنبع S_1 و S_2 برابرنصف طول موج $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ است.

اینك درنظربگیریم که دو منبع ارتعاش S_1وS_2 همزمان شروع به ارتعاش کنند و ارتعاش آنها به طور منظم ادامه یابد. امواجی که در اثر ارتعاش این دو منبع بر سطح آب پخش می‌شوند در تمام نقاط سطح آب تداخل می‌کنند. اگر مانند حالت پیش مکانهایی را که دارای ماکزیمم ارتعاش و هم حالت هستند جداگانه به‌هم وصل کنیم و نقاطی را هم‌که ساکن می‌مانند نیزجداگانه به‌هم وصل‌نمائیم شکل ۵–۱۹ به‌دست‌می‌آیدکه به‌کمك‌آن می‌توان منظره واقعی تداخلی را که در شکل ۵–۱۶دیده می‌شود توجیه کرد. در شکل ۵–۱۹، هذلولیهای خط چین نمایش مکان هندسی نقاطی هستندکه دامنه ارتعاش آنها ماکزیمم است. امواجی‌که از دومنبع S_1 و S_2 به این نقاط می‌رسند هم فاز هستند و این درصورتی است‌که یافاصله‌های این نقاط از دو منبع ارتعاش مساوی باشند (نقاط واقع برعمود منصف S_1S_2)و یا این‌که تفاضل فاصله‌های آنها از دو منبع ارتعاش برابر مضرب درستی از طول موج λ باشد

یعنی :

$$d_2 - d_1 = k\lambda \qquad (۱۶-۵)$$

هذلولیهایی که باخط توپر نمایش‌داده شده‌اند



شکل ۵-۱۹ - طرح ساده‌ای ازمنظره تداخل امواج بر سطح مایع: هذلولیهای خط نمایش مکان نقاطی هستند که ماکزیمم ارتعاش را دارند و هذلولیهای توپر نمایش مکان نقاط ساکن هستند

مکان هندسی نقاطی هستند که دامنه ارتعاش آنها صفر است بنابراین امواجی که به‌این نقاط می‌رسند نسبت به‌هم در فاز متقابلند و این در صورتی است که اختلاف فاصله‌های این نقاط از دو منبع S_1 و S_2 برابر مضرب فردی از نصف طول موج باشد یعنی:

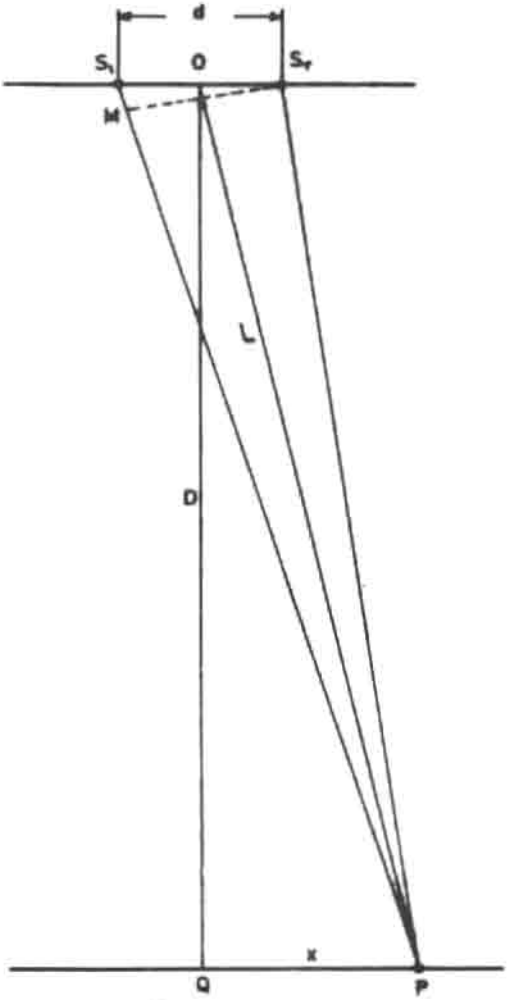
$$d_2 - d_1 = (k + \frac{1}{2})\lambda = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \qquad (۱۷-۵)$$

بنابراین در محیطی که تداخل امواج صورت می‌گیرد ارتعاش هرنقطه از آن محیط، با ارتعاشات دو منبع هم‌داسنا و هم‌پرید است ولی دامنه و فاز آن بستگی به‌وضعیت آن نقطه نسبت به‌دومنبع ارتعاش دارد و دامنه حرکت منتجه تابع $d_2 - d_1$ (یعنی اختلاف فاصله‌های آن نقطه از دو منبع ارتعاش) است. باید درنظرداشت امواج هذلولی شکل تداخلی ازنوع موجهای ایستاده‌هستند وحرکت انتقالی ندارند.

تداخل امواج یك پدیده عمومی است که در بسیاری ازموارد مشاهده می‌شود. به‌طورکلی‌هرجا که دو منبع ارتعاشی همزمان و هم‌پرید وجود داشته باشد پدیده تداخل صورت می‌گیرد.

در پاره‌ای از موارد، مانند تداخل امواج در سطح‌آب یا در طول‌یك طناب (تشکیل‌موجهای ایستاده که در بخش ۵ به آنها اشاره شد) این پدیده مستقیماً با چشم دیده می‌شود. تداخل‌امواج صوتی را می‌توان با قراردادن دو بلندگوی‌کوچك (که هردو وصل به‌یك منبع تولید صوت باشند) در فاصله‌مناسب ازیکدیگر، باگوش‌یا با یك میکروفن که وصل بدستگاه نوسان نگار است تشخیص داد: در نقاطی‌که دامنه‌های امواج صوتی حاصل از دو بلندگو به‌هم اضافه می‌شوند صدا کاملاً قوی‌است ولی در نقاطی‌که امواج صوتی حاصل از بلندگوها اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند دامنه ارتعاش صفر است و صدا شنیده نمی‌شود پدیده تداخل در نور و امواج الکترومانیتیك نیز صورت می‌گیرد و در جای خود بیان خواهد شد.

محاسبه طول موج - خاصیت تقارنی که در پدیده تداخل وجود دارد سبب می‌شود که با



شکل ۵-۲۰ محاسبه طول موج λ

اندازه‌گیری فاصله دو منبع ارتعاش S_1 و S_2 از یکدیگر و با تعیین مکان نقاطی که ماکزیمم‌ارتعاش را دارند و یا ساکن هستند، بتوانیم طول موج‌هر نوع از امواج را با استفاده ازپدیده تداخل‌حساب کنیم . (S_1 و S_2 ممکن است دو منبع ارتعاش مکانیکی یا صوتی هم‌فاز وهم پرید باشند و یا دو شکاف باشند که در مقابل یك منبع ارتعاش قرار داده شده‌اند). فرض می‌کنیم :

$d=S_1S_2$ فاصله میان دو منبع ارتعاش S_1وS_2،

$D=OQ$ فاصله یك خط یا یك صفحه نسبتاًدور و موازی با S_1S_2 از دو منبع ارتعاش

$x=QP$فاصلهٔیك‌نقطه P واقع درروی‌خط یاصفحه نام برده از محور مرکزی OQ

و $L=OP$ فاصله نقطه P تا O وسط S_1S_2 باشد (شکل ۵-۲۰).

موجهایی‌که از منبع S_1 به‌نقطه P می‌رسند نسبت به امواجی که از منبع S_2 به این نقطه می‌رسند راه بیشتری را می‌پیمایند. اگراین اختلاف راه برابر λ، 2λ و .... یا $k\lambda$ باشد این امواج در نقطه P هم‌فاز هستند ، در نتیجه دامنه‌های ارتعاش آنها به‌هم افزوده‌می‌شود و دامنه و شدت موج درنقطهP ماکزیمم‌است. ولی اگر اختلاف راه S_1P-S_2P برابر $\frac{\lambda}{2}$ یا $3\frac{\lambda}{2}$ و ... ویا بطورکلی $(2K+1)\frac{\lambda}{2}$ باشد امواجی که از دو منبع به‌این نقطه می‌رسند در فاز متقابل هستند، در نتیجه دامنه و شدت موج در این نقطه صفر است.

برای محاسبه λ ، قوس MS_2 را به مرکز P و به‌شعاع PS_2 رسم می‌کنیم. در این صورت $MP=PS_2$ وطول قطعه خط MS_1 برابراختلاف فاصله نقطه P از دو منبع S_1 و S_2 است. اگر d نسبت به $\frac{D}{\lambda}$ خیلی کوچك باشد (و در عمل می‌توان به آسانی این شرایط را ترتیب داد) قوس S_2M راکه‌قوس خیلی‌کوچکی ازیك دایره بزرگ می‌شود می‌توان عملاً معادل یك قطعه خط راست درنظر گرفت. زاویه S_1MS_2 نیز خیلی نزدیك به ۹۰° خواهد بود به‌طوری‌که می‌توان مثلث S_1S_2Mرا قائم‌الزاویه دانست . علاوه براین دو زاویه S_1S_2M و POQ نیز برابرند بنابراین دو مثلث قائم‌الزاویه S_1S_2M و POQ متشابه هستند و

خواهیم داشت : $\frac{S_1M}{d} = \frac{x}{L}$

اگر فاصله D نسبت به x بزرگ باشد طولهای D و L تقریباً برابر خواهند بود. چنانچه دامنه یا شدت در نقطه P ماکزیمم باشد $S_1M = K\lambda$ است و خواهیم داشت

$$\frac{K\lambda}{d} = \frac{x}{D}$$

و یا

$$\lambda = \frac{xd}{KD} \qquad (۱۸-۵)$$

حساب می‌شود.

به‌ازاء $K = ۰$ نقطه P روی نقطه Q است و به‌ازاء $K = ۱$ نقطه P اولین نقطه ماکزیمم در یکی ازدو طرف نقطه Q است و...

پرسش ۵-۱۲- اگر P، یك نقطه ساکن باشدت صفر باشد رابطه ۵-۱۷ به چه صورت در می‌آید؟

خودتان آزمایش کنید

الف- نمودار تغییرات I ، طول یك آونگ ساده را یا T^2، مجذور زمان تناوب آونگ رسم کنید واز روی آن طول آونگ ساده دیگری را معین کنید.

ب- شتاب جاذبه زمین را حساب کنید.

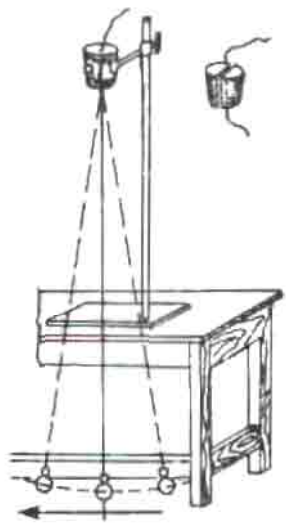
وسائل لازم : یك گلوله فلزی کوچك قلاب‌دار، نخ باریك ومحکم (مانند نخ قرقره)، کرونومتر، کولیس، پایه وگیره، یك قطعه چوب پنبه معمولی نسبتاً بزرگ که آن را از وسط در امتداد قطر به‌دو نیمه کرده‌اید ویك قطعه گچ، خط‌کش مدرج بلند یا متر فلزی.

۱- آونگ ساده‌ای به ترتیب زیر فراهم کنید:

یك سرقطعه نخی به‌طول تقریبی ۱/۵ متر را به قلاب گلوله قلاب‌دار ببندید وسر دیگر نخ را از وسط دوقطعه چوب پنبه بگذرانید وچوب پنبه را میان گیره‌ای که به یك پایه بسته‌اید وآن را روی میز یا چهارپایه یا صندلی چوبی وبا نیمکت قرار داده‌اید محکم کنید به طوری که دولبهٔ پائینی چوب پنبه درست مقابل هم قرارگیرند وبتوانید با کشیدن نخ از وسط چوب پنبه طول پاندول را تغییر دهید. (ممکن است درمیان وسائل آزمایشگاهی ، گیره‌هائی مخصوص نگاهداشتن نخ آونگ باشدکه بتوان نخ را ازوسط آنها گذراند. اگر چنین گیره‌هائی درآزمایشگاه موجود است از آنها استفاده کنید) .

۲- طول آونگ را ابتدا در حدود ۱۲۰ سانتیمتر انتخاب کنید، طول آونگ برابر فاصله گرانیگاه گلوله ازآویزگاه آن است. برای تعیین آن، قطر گلوله را با کولیس اندازه بگیرید و فاصله میان لبهٔ پائین چوب پنبه و محل اتصال قلاب به‌گلوله را با دقت معین نمائید و این فاصله را با شعاع گلوله جمع کنید. طول آونگ به‌دست خواهد آمد.

۳ـ گیره را روی پایه طوری تنظیم کنید که گلوله آونگ نزدیک کف اتاق قرار گیرد و با قطعه گچ خط کوتاهی روی کف اتاق موازی با لبهٔ میز یا صندلی که پایه آونگ را روی آن گذارده‌اید بکشید وخط کوتاه دیگری عمود بروسط این خط رسم کنید و آونگ را طوری تنظیم نمائید که گلوله آن درست بالای محل تقاطع دوخط قرار گیرد (شکل ۵ ـ ۲۱)



شکل ۵ـ۲۱

۴ـ کار کرونومتر را امتحان کنید وعقربه آن را روی صفر بیاورید. گلوله آونگ را به اندازه چهار یا پنج سانتیمتر روی خطی که موازی لبهٔ میز کشیده‌اید منحرف کرده و رها سازید و لحظه‌ای که ازوضع تعادل اولیه (یعنی ازمقابل محل تقاطع دوخط روی‌زمین) می گذرد کرونومتر را به راه اندازید و زمان ۲۰ نوسان کامل آن را اندازه بگیرید ودرآخرین نوسان، لحظه‌ای که آونگ به محل تقاطع دوخط می‌رسد کرونومتر را متوقف کنید و زمان ۲۰ نوسان کامل را بخوانید و زمان یك نوسان کامل آونگ را حساب کنید.

۵ـ طول آونگ را با کشیدن نخ از میان دو نیمه چوب پنبه ۱۰ سانتیمتر کم کنید و با پائین آوردن گیره روی پایه، گلوله را نزدیك کف اتاق قرار دهید و دوباره زمان ۲۰ نوسان کامل آن را اندازه بگیرید. بهمین ترتیب درآزمایشهای بعدی طول آونگ را ۱۰ سانتیمتر، ۱۰ سانتیمتر کم کنید و هربار گیره را پائین آورید تا گلوله نزدیك کف اتاق قرار گیرد و زمان ۲۰ نوسان کامل آن را اندازه بگیرید. برای این که بتوانید نمودار تغییرات l با T^2 را رسم کنید ۵ طول مختلف کافی است.

۶ـ زمان تناوب T را برای هرطول l حساب کنید و T^2 را معین نمائید سپس نسبت $\frac{l}{T^2}$ را برای هرآزمایش جداگانه حساب کنید ومیانگین آنها را بدست‌آورید ومقدار g شتاب جاذبه را

از رابطه $g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}$ حساب کنید.

۷- روی کاغذ میلیمتری دومحورعمود برهم رسم‌کنید. روی محور افقی طولهای آونگ و روی محور عمود برآن مجذور زمان تناوبهای مربوط به‌آنها را ببرید ونمودار تغییرات T^2 را برحسب l رسم‌کنید. این نمودار باید یک خط راست باشد. از روی این نمودار طول‌آونگ ساده‌ای را که زمان نوسان کامل آن در دست است (مثلاً ۲ ثانیه) به وسیله اکستراپولاسیون یا اکسترا ولاسیون پیدا کنید ، نتایج آزمایش را می‌توانید در جدولی مانند جدول ۵-۱ ثبت کنید. تحقیق کنید که بین زمانهای نوسان دو پاندول و طولهای آنها رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\sqrt{l_1}}{\sqrt{l_2}}$$

خطاهائی که ممکن است درضمن انجام آزمایش پیش آید و باید تا ممکن است از آنها اجتناب کنید عبارتند از :

۱- خطای شخصی در براه انداختن یا نگاهداشتن کرونومتر.

شماره آزمایش	طول آونگ (l)	زمان ۲۰ نوسان کامل آونگ			زمان نوسان کامل آونگ $T = \frac{t}{20}$	T^2	$\frac{1}{T^2}$
		۱	۲	میانگین (t)			
۱							
۲							
۳							
۴							
۵							
اندازه‌میانگین $\frac{1}{T^2} = \ldots$							$g = 4\pi^2 \frac{1}{\ldots} = \ldots$

جدول ۵-۱

۲- نوسانهای پایه اگر تعادل آن پایدار نباشد.

۳- خاصیت کشسانی نخ ودر نتیجه زیاد شدن طول آونگ به هنگام نوسان.

طول آونگ را با دقت میلیمتر اندازه بگیرید. برای این‌که اندازه‌گیری زمان نوسان T دقیقتر باشد توصیه می‌شود که تعداد نوسانات کامل بیشتری را اندازه بگیرید.

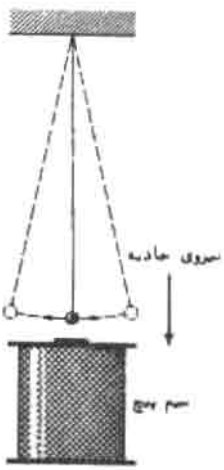
به این پرسشها پاسخ دهید

۱) ـ این اصطلاحات را به اختصار ولی دقیق تعریف کنید:
ارتعاش، تواتر، دامنه، فاز

۲) ـ چه نوع حرکتی را حرکت نوسانی ساده گویند؟ آیا یک‌آونگ ساده‌که مثلا بازاویه °۶۰ نوسان می‌کند دارای حرکت نوسانی ساده است؟

۳) ـ چگونه می‌توان یک حرکت نوسانی ساده را به‌وسیله حرکت یک نقطه برروی دایره نمایش داد؟

۴) ـ درنظر بگیرید که زیر گلولهٔ یک‌آونگ ساده‌به‌طول l که ازفولادساخته‌شده وجرم‌آن m است یکی ازقطبهای یک آهن ربای الکتریکی قرار داده شده است (شکل ۵-۲۲) و در دامنه کوچکی که آونگ نوسان می‌کند، آهن‌ربا با نیروی ثابت F گلوله را جذب می‌نماید رابطه‌ای بنویسید که زمان تناوب آونگ را دراین حالت نشان دهد.



شکل ۵-۲۲- علاوه برنیروی جاذبه، نیروی دیگری رو به پائین برگلوله آونگ توسط آهن‌ربا وارد می‌شود و زمان تناوب آن را تغییر می‌دهد.

۵) ـ یک منبع تولید امواج مکانیکی چه شرایطی باید داشته باشد؟

۶) ـ چه نوع امواج مکانیکی در جامدات منتشر می‌شوند؟

۷) ـ چه نوع امواج مکانیکی درمایعات وگازها منتشر می‌شوند؟

۸) ـ چه نوع امواجی پلاریزه می‌شوند؟

۹) ـ درنظر بگیرید حیوانی مثلا یک‌گربه یا یک موش زیر پتوئی‌که برکف اتاق گسترده است حرکت می‌کند. آیا آشفتگی که در اثر حرکت حیوان در پتو ایجاد می‌شود موج است؟ توضیح دهید.

۱۰) ـ سرعت انتشار امواج در یک محیط به چه عواملی بستگی دارد و چه عواملی در این سرعت مؤثر نیستند؟

۱۱) ـ دومثال بیاورید که انتقال انرژی به‌وسیله انتقال ماده صورت می‌گیرد.

۱۲) ـ دومثال بیاورید که انتقال انرژی به وسیله موج صورت می‌گیرد.

۱۳) ـ از عاملهای تواتر، طول موج ، زمان تناوب، دامنه و پلاریزاسیون کدامشان :

الف ـ وضعیت مکانی موجها را بیان می‌کنند؟

ب ـ وضعیت زمانی موجها را بیان می‌کنند؟

۱۴) ـ اهمیت رابطه $\lambda = VT$ در چیست؟

۱۵) ـ اگر موجی سینوسی نباشد چگونه می‌توان طول موج آن‌را تعریف کرد؟

۱۶) ـ سرعت انتشار امواج عرضی در یك سیم به طول ۶ متر وبه جرم ۶۰ گرم که با نیروی ۱۰۰۰ نیوتن کشیده شده است چند متر بر ثانیه است؟

۱۷) ـ ازکمیتهای زیرکه مربوط به‌موج هستندکدام‌یك بستگی به سه‌کمیت دیگر ندارد؟

۱ـ سرعت ۲ـ طول موج ۳ـ دامنه ۴ـ تواتر

۱۸) ـ امواج صوتی حاصل از یك منبع صوت در هوا به شکل کره منتشر می‌شوند . هرگاه شعاع کره موج دو برابر شود چگالی انرژی صوتی (انرژی صوتی درواحد سطح کره)

۱ـ دوبرابر می‌شود ۲ـ نصف می‌شود ۳ـ چهاربرابر می‌شود ۴ـ ربع می‌شود

در جواب درست بحث کنید.

۱۹)ـ امواجی که از دو منبع ارتعاشی هم‌فاز و هم پرید منتشر می‌شوند در چه صورت با فازمتقابل به‌یك نقطه می‌رسند؟

۲۰)ـ پدیده تداخل در چه شرایطی به وجودمی‌آید؟

۲۱)ـ آیا هذلولیهای ساکن و متحرکی که درپدیده تداخل امواج به‌وجود می‌آیند نظیر شکمهاوگره‌های امواج ایستاده درطول یك طناب هستند؟ توضیح دهید

۲۲ـ در پدیده تداخل، نقاطی‌که بیشترین‌دامنه ارتعاش را دارند درچه مکانهائی هستند؟ نقاطی که‌کمترین دامنه ارتعاش را دارند درچه مکانهائی هستند؟

۲۳)ـ اگر دو منبع ارتعاش هم پرید که امواج حاصل از آنها تداخل می‌کنند دارای دامنه یکسان نباشند چه کیفیتی اتفاق می‌افتد؟

این مسئله‌ها را حل کنید

۱ ـ دیاپازنی می‌تواند با تواتر ۶۰۰ هرتز مرتعش شود. هرگاه این دیاپازن به‌ارتعاش در آید و سرعت انتشار صوت در هوا ۳۴۰ متر بر ثانیه باشد صوت حاصل از این دیاپازن

خواهد رسید؟

جواب : پس از ۳۵ ارتعاش کامل

۲) ـ ذره‌ای روی یك خط راست دارای حرکت نوسانی ساده است . اگر بیشترین مقدار سرعت آن $۰/۴۷ \frac{m}{s}$ و زمان نوسان کامل آن $۰/۸۰ s$ باشد

الف ـ دامنه نوسان ذره را حساب کنید.

ب ـ بیشترین مقدار شتاب این ذره چه اندازه است؟

جواب : الف) ـ تقریباً $6cm$ ب) ـ تقریباً $۳/۶۹ \frac{m}{s^۲}$

۳) ـ در مکانی که شتاب جاذبه زمین $g=۹/۸۱۵۰ \frac{m}{s^۲}$ است زمان نوسان آونگ یك ساعت دیواری ۱/۲۵۵۰ ثانیه است. اگر این ساعت به مکانی برده شود که شتاب جاذبه در آن جا $g'=۹/۷۹۵۰ \frac{m}{s^۲}$ باشد وطول پاندول ثابت بماند زمان نوسان کامل آونگ را در این مکان تا ۵ رقم معنی‌دار حساب کنید. چه تغییری درمدت ۲۴ ساعت در زمانی که ساعت نشان می‌دهد حاصل خواهد شد؟

جواب : ۱/۲۵۶۳ ثانیه و ۱ دقیقه ۲۹/۵ ثانیه تقریباً ساعت عقب خواهدرفت

۴) ـ آونگ ساده‌ای تشکیل شده است از گلوله کوچکی که به سیم فولادی باریکی آویزان است ودر دمای $۲۰°C$ زمان نوسان کامل آن $۲/۰۰ s$ است اگردمای محیط به $۴۰°C$ برسدچه‌تغییری درزمان‌نوسان‌آن‌حاصل‌خواهدشد؟ضریب‌انبساط‌خطی‌فولاد $۱۱ \times ۱۰^{-۶}(°C^{-۱})$ است.

جواب: $۲/۲۰ \times ۱۰^{-۵}$ ثانیه افزایش می‌یابدکه با توجه به دقتی که درتعیین زمان نوسان در صورت مسئله به‌کار رفته است عملا محسوس نیست .

۵) ـ دو آونگ ساده A و B را با هم با دامنه‌کم به نوسان درمی‌آوریم پس ازگذشت زمان ۵ دقیقه و ۲۴ ثانیه آونگ B یك نوسان‌کامل از آونگ A جلو می‌افتد اگر زمان‌نوسان کامل آونگ A برابر ۲/۰۰ ثانیه باشد نسبت طول‌آونگ A به‌طول‌آونگ B را حساب‌کنید.

جواب: این نسبت تا ۵ رقم معنی‌دار ۱/۰۱۲۴ است .

۶) ـ یك سرطنابی‌را با حرکت نوسانی ساده عمود بر راستای طناب با تواتر ۲/۵ هرتز به نوسان در می‌آوریم. اگر سرعت انتشار امواج حاصل، در طول طناب $۱۰ \frac{m}{s}$ باشد اولا، طول موج این امواج‌را حساب‌کنید.

ثانیاً، اگر جرم هرمتر طناب ۵۰ گرم باشد طناب با چه نیرویی کشیده شده است؟

جواب: $\lambda = ۴m$ و $F = ۵N$

۷) ـ به‌انتهای آزاد یك تیغهٔ فنری‌که با تواتر ۱۰۰ هرتز ارتعاش می‌کند میلهٔ‌کوتاهی عمود برراستای تیغه نصب شده‌است ونوك آن با سطح‌آب، درون ظرفی تماس‌دارد به‌طوری‌که وقتی تیغه مرتعش می‌شود نوك میله برروی سطح آب امواج عرضی با دامنه ۲ میلیمتر تولید می‌کندکه به‌شکل دایره با سرعت ۰/۳۷ متر برثانیه برسطح‌آب منتشر می‌شوند:

اولا، معادله حرکت ارتعاشی مبدأرا دریك لحظهٔ غیر مشخص t بنویسید.

ثانیاً، معادله ارتعاشی یك نقطه M راکه به‌فاصله ۱۴/۸ میلیمتر از مبدأ ارتعاش واقع است در لحظهٔ t بنویسید (فرض کنید که دامنه ارتعاش در این مسیر کوتاه ثابت می‌ماند). چه مدت طول می‌کشد تا پس ازشروع حرکت ارتعاشی مبدأ، نخستین موج حاصل ازآن به‌نقطه M برسد؟ بعد حرکت نقطه M پس ازگذشت یك ثانیه ازشروع حرکت مبدأ چه‌اندازه است؟

۸)ـ زمان تناوب یك حرکت‌سینوسی ۴ ثانیه ودامنه حرکت‌آن ۵ سانتیمتر وفاز اولیه آن $+\frac{\pi}{۶}$ رادیان است مطلوبست

الفـ بعد اولیه این حرکت و بعدآن ۶ ثانیه پس از آغاز حرکت

بـ فاز حرکت آن پس از۶ ثانیه

جواب: ۲/۵Cm و ۲/۵Cm − و $۳\pi + \frac{\pi}{۶}$

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۵

۵-۱) ـ تواتر حرکت نوسانی بر روی قطر دایره مرجع برابر تعداد دورهای متحرك در ثانیه بر روی محیط دایره است

۵-۲) ـ $x = r\cos\omega t$

۵-۳) ـ معمولا برحسب رادیان

۵-۴) ـ در لحظه‌هائی‌که $\cos\frac{۲\pi t}{T} = ۰$ باشد یعنی $\frac{۲\pi t}{T} = (۲k-۱)\frac{\pi}{۲}$

و یا: $t = (۲k-۱)\frac{T}{۴}$

برای مدت یك پرید داریم: $t_1 = \frac{T}{4}$ (به‌ازای $k=1$) و $t_2 = 3\frac{T}{4}$ (به‌ازای $k=2$)

۵-۵) - باید شاخه‌های دیاپازن را کوتاه و ضخیم بسازند.

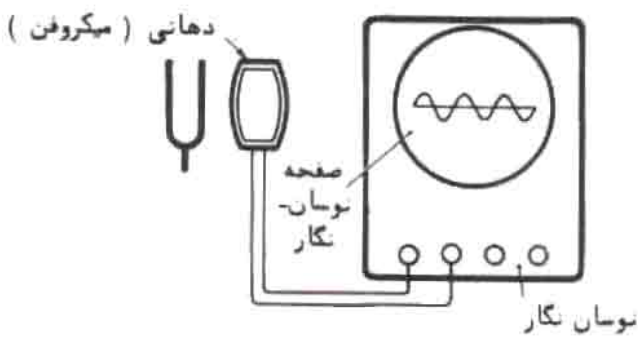
۵-۶) - در صورتی که طول تیغه کوتاهتر یا وزنه روی آن پایینتر باشد.

۵-۷) - فرکانس یك دیاپازن (یا هرجسم مرتعش را) بسته به امکانات اندازه‌گیری، به چند روش می‌توان معین کرد:

الف - به‌وسیله ثبت ارتعاشات - به‌این ترتیب که به‌نوك شاخه دیاپازن الکتریکی تیغهٔ فلزی نوك تیزی را نصب می‌کنند و نوك تیغه را روی صفحه دوده اندوده دستگاه ثبات که با حرکت یکنواخت حرکت می‌کند (نظیر شکل ۵ -۵) تماس می‌دهند، ودر مدت کاملا معینی ارتعاشات دیاپازن را ثبت می‌نمایند و ارتعاشات کامل آن را در واحد زمان معین می‌کنند در این روش می‌توان ارتعاشات ثبت شده دیاپازن را با ارتعاشات ثبت شده یك جسم مرتعش استاندارد مقایسه کرد.

ب - به‌وسیلهٔ نوسان نگار کاتدی - نوسان‌نگار کاتدی که اساس کارآن‌را در کتاب فیزیك سال‌سوم دیدید این‌ویژگی‌را داردکه هرحرکت ارتعاشی‌را می‌توان درآن به‌یك ارتعاش الکتریکی دارای همان فرکانس و به‌همان شکل و با دامنه‌ای متناسب با دامنه ارتعاش اصلی تبدیل کرد و آن را روی صفحه فلوئورسنت نوسان نگار ظاهر ساخت.

نوسان نگارکاتدی را می‌توان به‌خوبی و با همان دقت ویژه نوسانهای الکتریکی، برای بررسی ارتعاشات صوتی به‌کار برد،کافی است‌که یك دهانی (یا میکروفن)[1] به‌نوسان‌نگار متصل کرد وجسم مرتعش، مثلا دیاپازن[2] را جلو آن قرار داد (شکل ۵ -۲۳) .



شکل ۵-۲۳. نوسان‌نگار کاتدی مجهز به میکروفن برای بررسی ارتعاشات دیاپازن

۱- با اساس‌کار دهانی یا میکروفن در کتاب علوم سال سوم دورهٔ راهنمایی آشنا شده‌اید.

۲- بهتر این است‌که دیاپازن الکتریکی باشد تا دامنه نوسان آن ثابت بماند .

ارتعاشات دیاپازن در مدار میکروفن جریان متغیری تولید می‌کند. این جریان ولتاژ متغیری که فرکانس آن برابر فرکانس ارتعاشات دیاپازن است بین صفحات y نوسان‌نگار برقرار می‌سازد. اگر تواتر ولتاژهای بین صفحه‌های X و Y برابر باشد نموداری که روی صفحه نوسان نگار ظاهر می‌شود به شکل یک موج کامل است و معرف ارتعاشات سینوسی دیاپازن می‌باشد. چون فرکانس ولتاژ بین دو صفحه X روی دستگاه خوانده می‌شود فرکانس ارتعاشات منبع ارتعاش به‌آسانی معین می‌گردد.

۵-۸) - زیرا چنانکه محاسبه نشان می‌دهد این معادله برای حرکت نوسانی بر روی خط راست نوشته شده است. موقعی که دامنه نوسان آونگ کوچک باشد می‌توان حرکت گرانیگاه آن را روی خط راست درنظر گرفت ولی وقتی که زاویه نوسان آونگ بزرگ باشد گرانیگاه آن دیگر روی خط راست حرکت نمی‌کند و این رابطه برای توجیه حرکت آونگ کافی نیست و باید معادله کاملتری را به‌کار برد.

۵-۹) - زیرا حرکت آونگ، وقتی که اصطکاک درکار نباشد نظیر حرکت جسم برروی سطح شیب دار بدون اصطکاک و یا حرکت سقوط آزاد است که شتاب آن بستگی به جرم ندارد.

۵-۱۰) - امواج پلاریزه در طول یک طناب مستقیماً با چشم به خوبی تشخیص داده نمی‌شوند. بهتر این است که طناب را از یک شکاف عبور دهیم. اگر شکاف در سطح موج واقع باشد، موج ازآن می‌گذرد.

۵-۱۱) - برای نقاط همفاز داریم $۲\pi\frac{x}{\lambda}=۲k\pi$ (زیرا $\sin(\omega t \pm ۲k\pi)=\sin\omega t$)

در نتیجه :

$$x=k\lambda$$

۵-۱۲) - به صورت

$$\frac{\lambda}{۲}=\frac{xd}{(۲k+۱)D}$$

۶

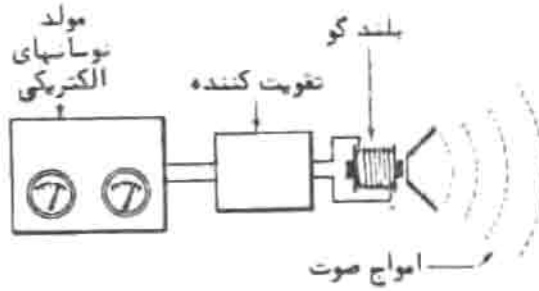
صوت

امواج صوتی از نوع موجهای مکانیکی هستند که در اثر ارتعاش اجسام کشسان تولید می‌شوند ودر گازها ومایعات وجامدات منتشر می‌گردند. وقتی امواج صوتی به‌پرده حساس گوش برخورد کنند گوش احساس شنیدن می‌کند. در دانش آکوستیک، به‌همان اندازه‌که فیزیک صوت اهمیت دارد زیست‌شناسی و حتی روانشناسی شنیدن نیزدارای اهمیت است. ولی در این جا ما صوت را به‌صورت یك حرکت ارتعاشی بررسی می‌کنیم وخواص موجی آن مانند تواتر، طول موج، سرعت، انتشار، طرزتولید، طرز انتشاربازتابش وشکست را مورد مطالعه قرارمی‌دهیم واندکی هم درباره آشکار سازی صوت و اثر امواج صوتی بر گوش به‌بحث خواهیم پرداخت.

تولید و انتشار صوت

می‌دانیم صوت در اثر ارتعاش یك جسم یا مجموعه‌ای از اجسام کشسان تولید می‌شود. در بخش ۵ ضمن تعریف امواج ایستاده متذکر شدیم که تقریباً تمام‌صوتهای حاصل ازاسبابهای‌موسیقی در اثر تشکیل موجهای ایستاده تولید می‌گردند. منبع مولد صوت ممکن است یك جسم جامد باشد، مانند یك دیاپازن، یا یك سیم باریك که بین دو نقطه کشیده شده است، یا یك زنگ، یا یك صفحه نازك (مثلاً پوسته طبل، صفحه مرتعش بلندگو یاگوشی تلفن) و یا ممکن است جرم معینی از هوا باشد مانند صوت حاصل از ارتعاش هوای درون لوله‌های صوتی. منبع مولد صوت ممکن است مانند یك دیاپازن یا ارتعاشات ساده خود صوت ساده‌ای را تولیدکند ویامانند تارهای جنجره یا ارتعاشات پیچیده خود صوت مرکبی را به‌وجود آورد.

به‌کمك دستگاههای الکترونیکی نوسان ساز که امروزه در آزمایشگاهها مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توان نوسانهای الکتریکی با تواتر دلخواه را (مثلاً بین ۱۰ هرتز و ۱۰۰ کیلو هرتز) تولید کرد و آنها را پس از تقویت روی یك بلندگو فرستاد، در بلندگو چنان که می‌دانید، نوسانهای الکتریکی دستگاه تبدیل به ارتعاشهای مکانیکی یك صفحه نازك مرتعش با همان تواتر می‌گردند. درشکل (۶-۱) طرح ساده این دستگاه



شکل ۶-۱- طرح ساده‌ای از یک دستگاه نوسان سازالکترونیکی.

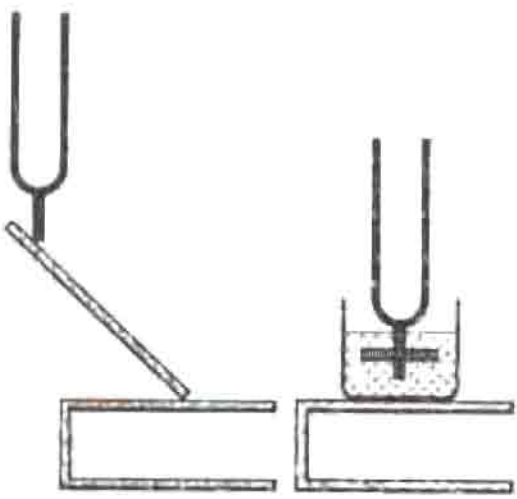
نشان داده شده است. ولی گوش انسان صوتهایی را می‌شنود که‌تواتر آنها چنان که می‌دانید به‌طور متوسط بین ۲۰ هرتز و ۲۰،۰۰۰ هرتز باشد[۱]. تواترهای بیش از ۲۰،۰۰۰ هرتز را ماورای صوت می‌نامند صوتی که از یک منبع مولد صوت تولید می‌شود آنآ به‌گوش نمی‌رسد بلکه با سرعتی که از سرعت نور به‌مراتب کوچکتر است در هوا منتشر می‌گردد. انتشار صوت در واقع، انتشار حرکت ارتعاشی منبع مولد صوت است. ازاین منبع امواجی منتشر می‌شوند که ویژگیهای آنها نظیر همان موجهایی است که دربخش پیش آنها را بررسی کردیم. این امواج حامل انرژی مکانیکی به‌نام انرژی صوتی هستند که بخشی از انرژی مکانیکی منبع ارتعاش است. بنابراین لازم است که بین منبع مولد صوت وگوش یک محیط الاستیک موجود باشدتا این انرژی مکانیکی را منتقل کند.

پرسش ۶-۱- چگونه می‌توان نشان داد که صوت در خلأ منتشر نمی‌شود؟

محیط انتشار صوت معمولاً هواست ولی مشاهدات روزانه نشان می‌دهد که صوت درجامدات و مایعات نیز منتشر می‌شود.

انتشارصوت درمایعات وجامدات را می‌توان با آزمایشهای ساده‌ای که نمونه آنها در شکل (۶-۲- الف و ب) نشان داده شده است تحقیق کرد.

پرسش ۶-۲- نمونه‌هایی از انتشار صوت در جامدات و مایعات را که روزانه با آنها مواجه هستید بیان کنید.



(ب) (الف)

شکل ۶-۲

الف- صوت دیاپازونی که پایه انتهای آن یک ورق فلزی نصب شده است توسط آب درون ظرف به‌جعبه تشدید صوت منتقل و تقویت شده می‌شود.

ب- میله چوبی یا فلزی یا پلاستیکی صوت حاصل از دیاپازون را به جعبه تشدید صوت منتقل می‌کند.

۱- گوش سگ می‌تواند امواتی را که تواتر آنها را بین ۱۵ هرتز و ۵۰،۰۰۰ هرتز است بشنود. خفاش ویک نوع حیوان‌دریایی به‌نام Porpoise(گراز ماهی) که شباهت زیادی به دلفین دارد می‌توانند تا حدود تواتر ۱۲۰،۰۰۰ هرتز رادریافت دارند یا خود تولید کنند.

امواج صوتی درهوا وآب یا درهرسیال دیگر (اعم ازگاز یا مایع) چنان‌که گفتیم به‌طور طولی منتشر می‌شوند، یعنی در مسیر خود، مولکولهای سیال را در راستای انتشار به ارتعاش در می‌آورند و آشفتگی که به‌هنگام عبور موج در هر جزء ازحجم سیال به‌وجود می‌آید همواره‌توأم با تغییرات تناوبی **فشار بصورت تراکم و انبساط است**[1].

پرسش ۶-۳- امواج‌صوتی بلاریزه‌نمی‌شوند. علت چیست؟

سرعت انتشار صوت

الف- سرعت صوت درگازها- در بخش ۵ ضمن بحث در باره امواج طولی‌متذکر شدیم‌که سرعت این امواج دریك محیط (که‌موجهای صوتی ازآن جمله‌اند) بستگی به‌خاصیت الاستیك‌آن محیط دارد. درگازهای کامل، خاصیت الاستیك بستگی به خواص ترمودینامیکی گاز (یعنی تغییرات فشار و وحجم گاز یا دما) در ناحیه‌ای که حرکت ارتعاشی منتشر می‌شود دارد. سرعت صوت درگازهای کامل از رابطه زیر که به «فرمول لاپلاس» معروف است حساب می‌شود:

$$v=\sqrt{\gamma\frac{P}{\rho}} \qquad (۱-۶)$$

که در آن P فشار گاز، ρ جرم حجمی گاز و $\gamma=\frac{C_p}{C_v}$ (γ حرف یونانی با تلفظ گاما) نسبت ظرفیت گرمایی ویژه گاز در فشار ثابت (C_p) به ظرفیت گرمایی‌ویژه‌گاز درحجم ثابت (C_v) است. ظرفیت‌های گرمائی ویژه (C_p و C_v) از یك گاز به‌گاز دیگرمتفاوت است ولی نسبت $\frac{C_p}{C_v}$ برای گازهایی که اتمیسیته آنهایکی است (یعنی ملکولهای آنها دارای تعداد اتمهای مساوی هستند) یکسان می‌باشد.

اندازه γ برای گازهای تك‌اتمی مانند آرگن (A) ونئون (Ne) وگازهای کمیاب دیگر تقریباً ۱/۶۷ و برای گازهای دو اتمی مانند اکسیژن، ئیدروژن و نیتروژن (O_2 و H_2 و N_2) و همچنین برای‌هوا که تقریباً $\frac{۴}{۵}$ آن‌نیتروژن‌و$\frac{۱}{۵}$آن‌اکسیژن‌است تقریباً ۱/۴۰ وبرای گازهای سه اتمی مانند CO_2 تقریباً ۱/۳۳ است.

درکتاب فیزیك سال‌دوم دربخش گرما دیدیم که برای یك‌گازکامل، که حجم آن در دمای مطلق T و فشار P برابر V است نسبت $\frac{PV}{T}$ همواره مقدار ثابتی است. اگر یك‌ملکول گرم گازکامل را درنظر بگیریم وحجم آن‌را درفشار P ودمای T به V_mنمایش دهیم نسبت $\frac{PV_m}{T}$ نیز مقدار ثابتی‌است که بستگی به‌دما وفشارگاز ندارد. این مقدار ثابت رابه R نمایش می‌دهیم بنابراین

$$\frac{PV_m}{T}=\frac{P_0V_{0m}}{T_0}=\ldots=R \qquad (۲-۶)$$

۱- به‌کتاب فیزیك سال دوم نظری، بخش حرکات موجی مراجعه‌کنید

مسئله مهم وجالب این است که R برای کلیه گازهای کامل مقدار ثابتی است و به‌همین‌جهت آن‌را «ثابت عمومی گازهای کامل» نامیده‌اند.

پرسش ۶-۴- با سابقهٔ آشنایی که از سالهای پیش درباره گاز کامل دارید در یک جمله کوتاه گاز کامل را تعریف کنید.

پرسش ۶-۵- چرا با آن که جرم ملکولی گازهای مختلف یکی نیست مقدار ثابت R برای کلیه گازهای کامل یکی است؟

اگر به‌جای فشار P در رابطه (۶-۱) معادل آن $P=\frac{RT}{V_m}$ را که از رابطه (۶-۲) حساب می‌شود بگذاریم خواهیم داشت.

$$v=\sqrt{\gamma\frac{RT}{\rho V_m}} \qquad (۶-۳)$$

ρV_m (یعنی حاصل‌ضرب جرم حجمی گاز در حجم ملکول‌گرم آن) برابر جرم ملکولی گاز است که آن‌را به M نمایش می‌دهیم بنابراین:

$$\boxed{v=\sqrt{\gamma\frac{RT}{M}}} \qquad (۶-۴)$$

مقدار ثابت عمومی گازهای کامل، یعنی R، برابر ۸/۳۱۴ $\frac{\text{ژول}}{\text{مول . درجه کلوین}}$ $\left(\frac{\text{J}}{\text{mol .°K}}\right)$ است γ و M هم برای یک گاز مورد نظر مقادیر ثابتی هستند بنابراین با دانستن γ و M، سرعت صوت در گاز مورد نظر در هر دمای T از رابطه (۶-۴) حساب می‌شود. مثلا اگر هوا را در حکم گاز کامل بگیریم سرعت صوت در هوای صفر درجه سلسیوس (۲۷۳°K) که جرم ملکولی متوسط آن تقریباً ۲۹ $\frac{\text{گرم}}{\text{مول}}$ یا $۲۹\times۱۰^{-۳}\frac{\text{کیلوگرم}}{\text{مول}}$ و $\gamma=۱/۴۰$ است برابر خواهد بود با:

$$v_0=\sqrt{\gamma\frac{RT_0}{M}}$$

$$=\sqrt{\frac{۱/۴۰\times۸/۳۱۴\times۲۷۳}{۲۹\times۱۰^{-۳}}}\simeq۳۳۱\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

این سرعت با مقداری که از اندازه‌گیری مستقیم به‌دست آمده است به‌خوبی مطابقت دارد.

پرسش ۶-۶- با توجه به‌این‌که حجم ملکول گرم گازهای کامل در شرایط استاندارد (فشار یک اتمسفر و دمای صفر درجه سلسیوس) برابر ۲۲/۴ لیتر است مقدار ثابت R را از رابطه (۶-۲) حساب کنید.

عوامل مؤثر بر سرعت صوت در گازها

۱- اثر دما - رابطه ۶-۴ نشان می‌دهد که سرعت صوت در یک گاز معین با جذر دمای مطلق گاز متناسب است. اگر v_0 سرعت صوت در گاز مورد نظر در دمای T_0 باشد به‌کمک رابطه زیر می‌توان با دانستن v_0 سرعت صوت را در آن گاز در هر دمای T به‌دست آورد:

$$\frac{v}{v_0}=\frac{\sqrt{T}}{\sqrt{T_0}}$$

یا:

$$v=v_0\sqrt{\frac{T}{T_0}}=v_0\sqrt{\frac{T}{۲۷۳}} \qquad (۶-۵)$$

چون $T=۲۷۳+\theta$ است پس:

$$v = v_0\sqrt{\frac{۲۷۳+\theta}{۲۷۳}} = v_0\sqrt{۱+\frac{\theta}{۲۷۳}}$$

$$= v_0(۱+\frac{\theta}{۲۷۳})^{\frac{۱}{۲}}$$

اگر θ در مقابل ۲۷۳ کوچک باشد می‌توان نوشت:

$$(۱+\frac{\theta}{۲۷۳})^{\frac{۱}{۲}} \simeq ۱+\frac{۱}{۲}\frac{\theta}{۲۷۳} = ۱+\frac{\theta}{۵۴۶}$$

بنابراین وقتی که دمای گاز زیاد نباشد سرعت صوت در گاز از رابطه تقریبی زیر حساب می‌شود:

$$v \simeq v_0(۱+\frac{\theta}{۵۴۶}) \qquad (۶-۶)$$

یادآوری ـ سرعت صوت در هوا را می‌توان مستقیماً از رابطه زیر حساب کرد:

$$v = v_0 + ۰/۶۱۰\theta \qquad (۶-۷)$$

که در آن $v_0 = ۳۳۱\frac{m}{s}$ سرعت صوت در هوای صفر درجه و θ دمای هوا برحسب درجه سلسیوس است این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش هر $1^\circ C$ سرعت صوت در هوا تقریباً ۰/۶۱ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد. مثلا سرعت صوت در هوای $20^\circ C$ برابر است با:

$$v = ۳۳۱ + ۰/۶۱۰ \times ۲۰ \simeq ۳۴۳\frac{m}{s}$$

۲ـ اثر جرم ملکولی و جرم حجمی گاز ـ رابطه‌های (۶ ـ۳) و (۶ ـ۴) نشان می‌دهند که سرعت صوت در یک گاز نسبت معکوس با جذر جرم حجمی یا جذر جرم ملکولی گاز دارد. بنابراین هرچه گاز سبکتر باشد سرعت صوت در آن بیشتر است. مثلا نسبت سرعت صوت در گاز ئیدروژن به سرعت صوت در گاز اکسیژن که هردو گاز دوا تمی هستند در یک دمای معین برابر است با:

$$\frac{v_H}{v_O} = \sqrt{\frac{M_O}{M_H}} = \sqrt{\frac{۳۲}{۲}} = ۴$$

یعنی سرعت صوت در گاز ئیدروژن که ۱۶ مرتبه سبکتر از گاز اکسیژن است در شرایط یکسان ۴ برابر سرعت صوت در گاز اکسیژن است.

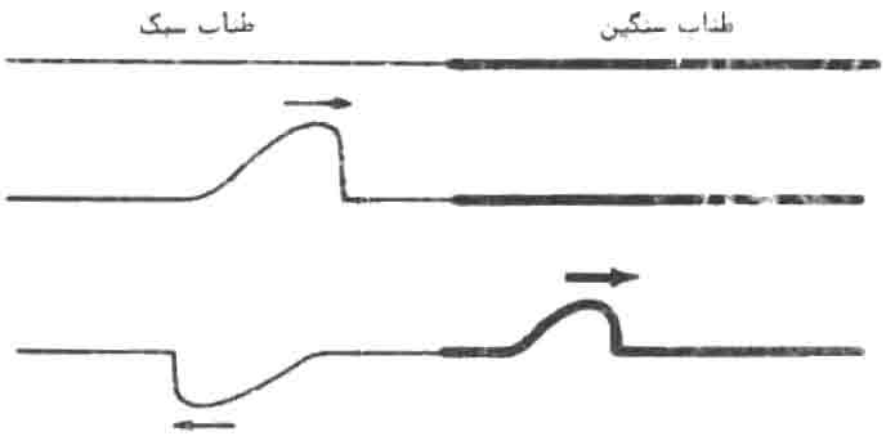
۳ـ **اثر الاستیسیته گاز** ـ الاستیسیته گازها نیز در سرعت صوت نقش مؤثری دارند و عامل الاستیسیته به‌صورت ضریب γ در فرمول وارد می‌شود.

پرسش ۶-۷ـ رابطه (۶ ـ۴) نشان می‌دهد که سرعت صوت به‌فشار گاز بستگی ندارد و آزمایش نیز این مطلب را تأیید می‌کند. آیا می‌توانید علت را بیان کنید؟

ب ـ سرعت صوت در مایعات و جامدات ـ سرعت صوت در مایعات و جامدات معمولا بیشتر از سرعت صوت در گازها است در جدول ۶ ـ۱، سرعت صوت در چند گاز و مایع و جامد برای مقایسه داده شده است

نوع ماده	سرعت صوت بر حسب متر بر ثانیه
هوا در	۳۳۱
بی‌اکسید کربن (CO_2)	۲۵۸
مونواکسید کربن (CO)	۳۳۷
ئیدروژن	۱۲۶۹
آب در دمای معمولی	۱۴۲۵
اتیل	۱۲۱۲
جیوه	۱۱۴۲
آلومینیوم	۵۱۰۴
آهن	۵۱۲۰
چوب بلوط	۳۸۵۰
شیشه	۵۵۰۰
یخ	۳۰۱۵
مس	۳۵۶۰
نیکل	۴۹۷۰

جدول ۶ـ۱



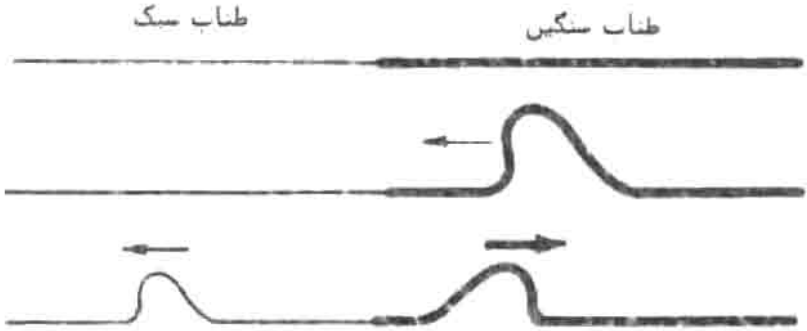
شکل ۶-۳ - انعکاس یک آشفتگی ازمحل اتصال دوطناب سوقتی که موج‌تابش‌ازطناب سبک به‌طرف طناب سنگین می‌رود.

بازتابش یا انعکاس صوت

وقتی‌که امواج صوتی به مانعی برخورد می‌کنند ، یا به محیطی می‌رسندکه از محیط اولیه انتشار آنها غلیظتر یا رقیقتر است ، قسمتی از این امواج ازروی‌مانع یاازسطح‌مشترك دومحیط‌منعکس شده وبرمی‌گردد وقسمت دیگر در محیط جدید پیش می‌رود. اگر محیط کاملا سخت باشد امواج‌به‌طور کامل منعکس می‌شوند. برای روشن شدن مطلب، پیش ازآن‌که به‌بحث در بارهٔ بازتابش امواج صوتی بپردازیم آزمایش ساده‌ای رابیان می‌کنیم:

درشکل ۶-۳ دو طناب، یکی باریك و سبك و دیگری کلفت وسنگین نشان داده شده است‌که به هم متصل بوده و بین دو نقطه‌کشیده شده‌اند. اگر نخست درسرطناب سبك یك آشفتگی ایجاد شوداین آشفتگی هنگامی‌که به محل اتصال دوطناب می‌رسد قسمتی ازآن دراین محل منعکس شده وبرمی‌گرددو قسمتی ازآن هم‌به طناب‌سنگین منتقل شده‌به‌حرکت خود ادامه می‌دهد ،ولی آشفتگی‌که در طناب سبك برمیگردد جهتش وارونه میشود.

اگر آشفتگی نخست درسرطناب سنگین‌تولید شود موقعی‌که به محل اتصال دو طناب می‌رسد بازهم قسمتی از آن به‌طناب سبك منتقل می‌شود و



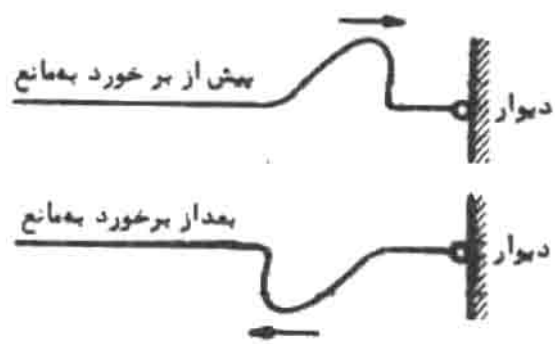
شکل ۶-۴ - انعکاس یك‌آشفتگی ازمحل‌اتصال دوطناب سوقتی‌که موج‌تابش ازطناب سنگین به طرف طناب سبك می‌رود

قسمت دیگر در محل اتصال منعکس شده در طناب سنگین برمی‌گردد ولی‌جهت آشفتگی برگشته مانند حالت پیش وارونه نیست (شکل ۶-۴).

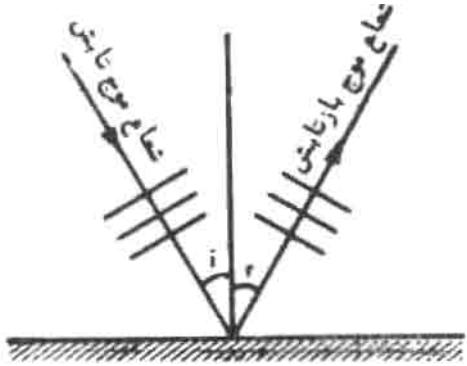
پرسش ۶-۸ - آیاسرعت انتشار آشفتگی در دوقسمت طناب یکی‌است؟

اگر یك سرطناب به مانع بزرگ و سختی، مثلاً به یك قلاب که به دیوار کوبیده شده است متصل باشد، موج رونده پس از برخورد بـه مانع کاملاً منعکس می‌شود. زیـرا نیرویی که از طرف موج به‌قلاب وارد می‌گرددنمی‌تواندديوار راحرکت دهد بنابراین انرژی‌که توسط موج درراستای‌طناب مطابق شکل ۶-۵ ازچپ به‌راست منتقل می‌شود نمی‌تواندطناب‌را ترك‌کنددرنتیجه موج کاملامنعکس می‌گردد و انرژی را از راست به طرف چپ منتقل می‌کند. علت وارونه شدن موج را می‌توان چنین توجیه‌کرد:

موقعی‌که‌موج‌تابیده به‌مانع‌می‌رسد می‌خواهد قلاب رابه طرف بالابکشد ولی‌قلاب تکان نمی‌خورد و طبق قانون عمل و عکس‌العمل نیرویی در جهت مخالف به‌طناب وارد می‌کند. این‌نیرو درتمام‌مدتی که‌موج درحال انعکاس است برطناب اثرمی‌کند ودر نتیجه موج بازتابیده وارونه می‌گردد.



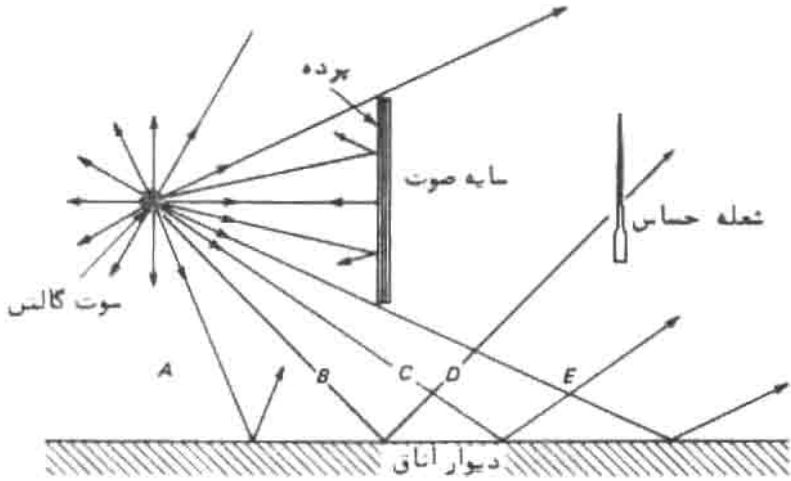
شکل ۶-۵ - انعکاس موج ازروی یك‌مانع بزرگ‌وسخت.



شکل ۶-۶ - شعاع موج جهت انتشار راامشخص می‌کند.

بازتابش امواج‌صوتی نیزبه‌همین روال‌صورت می‌گیرد جزاین‌که امواج صوتی دریك محیط ایزوتروپ‌به‌شکل موجهای‌کروی منتشر می‌شوند. برای این‌که بیان چگونگی بازتابش این‌امواج آسانترشود باید جهت انتشار موج مشخص‌گردد. معمولا جهت انتشار موج‌کروی یاموج مسطح به‌وسیلهٔ خطوطی که عمود برسطح موج هستند مشخص می‌گردد. هر یك از این خطها را «شعاع موج» می‌نامند و شعاع موج جهت انتشارموج را مشخص می‌کند. مثلا در شکل (۶-۶) شعاعهای تابش و بازتابش‌که عمود برسطح موج هستند جهت انتشار موج‌را پیش‌ازبازتابش وپس از آن مشخص می‌کنند. آزمایش نشان می‌دهدکه زوایای‌تابش i وبازتابش r باهم برابرند. یعنی بازتابش امواج صوتی ازروی یك‌سطح، مانند نور، تابع قوانین بازتابش است.

درآزمایشگاه می‌توان بازتابش امواج صوتی را باروشهای مختلف نشان داد. یکی ازاین روشها در شکل ۶-۷ نشان داده شده است. در این روش منبع تولید صوت، یك سوتك میکرومتری به نام سوتك‌گالتون است‌که‌با دمیدن هوای‌متراکم درآن می‌توان صوتی باتواتر خیلی زیاد تولیدکرد. برای



شکل ۶-۷- طرح ساده‌ای ازیک آزمایش برای نشاندادن انعکاس امواج‌صوتی از روی دیوار یک اتاق

آشکار ساختن پدیده انعکاس می‌توان از یک‌میکروفن حساس‌که متصل به یک نوسان نگارکاتودیک یا یک بلندگو است ویااز یک‌شعله حساس به‌عنوان‌دریافت کننده امواج بازتابیده استفاده‌کرد. شعله حساس عبارتست از یک شعله باریک و بلندکه‌مطابق شکل (۶-۸) درنوک یک لوله شیشه‌ای یا فلزی باریک در اثر سوختن گاز با جریان ملایم تولید می‌شود. وقتی‌که‌امواج‌صوتی ازروی‌نوک این لوله‌می‌گذرند شعله ناپایدار می‌شود و طول آن‌کوتاه می‌گردد.

میان منبع مولد صوت و دستگاه آشکار ساز، یک‌مانع سخت‌مانند یک‌تخته بزرگ قرارداده‌می‌شود به طوری‌که دستگاه آشکارساز درسایه صوتی، این مانع واقع‌شود. دراین صورت‌امواج صوتی مستقیماً به‌آن نمی‌رسند بنابراین اگراین دستگاه‌امواج صوتی‌را دریافت کند دلیل براین است‌که این امواج در اثر بازتابش ازروی دیوار اتاق به‌آن می‌رسند. وقتی‌که سوتک دراثر جریان هوای متراکم به‌طور مداوم به صدا در می‌آید و دستگاه آشکار ساز دریافت امواج صوتی حاصل از انعکاس رانشان‌می‌دهد اگرآزمایش کننده درامتداد دیوار از طرف منبع مولد صوت به طرف آشکار ساز حرکت‌کند فقط در لحظه‌هائی‌که از وضعیتهای BوD می‌گذرد مانع‌رسیدن امواج‌منعکس

شکل ۶-۸- شکل ساده‌ای ازیک شعله حساس وقتی‌که موجهای صوتی‌از بالای لوله‌لوله می‌گذرند ارتفاع شعله کم می‌شود.

به‌دستگاه آشکارساز می‌شود ودستگاه وضع‌عادی‌خود رانشان می‌دهد. زیرا فقط موجهائی‌که درراستای B به‌دیوار می‌تابند درراستای D روی آشکارساز متعکس می‌شوند. پرتوهایی که‌درشکل‌نشان‌داده‌شده‌اندهمان شعاع‌موجهای کروی شکل صوتی هستندکه ازمنبع مولد صوت در هوا پخش می‌شوند .

نمونه‌سایه صوتی که درشکل ۶-۷ نشان‌داده شده است ویژه صوتهایی است‌که تواتر آنها زیاد و طول موجشان‌کوتاه است و نشان می‌دهدکه امواج صوتی‌کوتاه مانندنور به ظاهر به خط راست منتشر می‌شوند ،ولی صوتهایی‌که تواتر آنهاکم ودرنتیجه طـول موجشان بزرگ است در موقع برخورد به لبه‌های مانع ازمسیر مستقیم خودمنحرف می‌شوند، به‌عبارت دیگر «تفرق»حاصل می‌کنند. مثلاهنگامی که یك اسباب موسیقی مجموعه‌ای از صوتهای زیر (باتواترزیاد) وبم (باتواترکم) رامجاور دیوار یك ساختمان تولید می‌کند ، هرگاه شنونده در یکی از زوایای ساختمان به کنار ساختمان بپیچد صوتهـای زیررا به‌طور محسوس ضعیف می‌شنود درصورتی‌که صوتهای بم‌بازهم به طور وضوح شنیده می‌شوند . علت این است‌که صوتهای زیر (باطول موج‌کوتاه) روی لبه ساختمان‌کمتر تفرق حاصل می‌کنند ولـی صوتهای‌بم (باطول‌موج‌بلند) تفرق‌حاصل می‌کنند.

در شکل (۶ - ۹) انعکاس امواج صوتی از روی دو آینه مقعر بزرگ‌که می‌توان آنها را در دوطرف اتاق مقابل‌هم قرارداد نشان داده‌شده‌است. هرگاه منبع تولید صوت دوکانون یکی از آینه‌ها گذارده شود به وسیله دستگاه آشکار ساز به آسانی می‌توان پی‌بردکه صوت‌حاصل ازاین منبع درکانون آینه دیگر واضح‌تر از نقاط دیگر اطراف آن شنیده می‌شود.

شکست‌امواج صوتی

وقتی‌که امواج تناوبی‌ازیك محیط واردمحیط دیگر می‌شوند سرعت انتشار آنها و در نتیجه طول مـوجشان تغییر می‌کند. اگررابطه بین‌طول موج و تواتررا برای دومحیط (۱) و(۲) بنویسیم خواهیم داشت:

$$v_1 = \lambda_1 f \qquad \text{درمحیط (۱)}$$

$$v_2 = \lambda_2 f \qquad \text{درمحیط (۲)}$$

از تقسیم این دورابطه برهم نتیجه می‌شود

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

این رابطه نشان می‌دهدکه نسبت طول موج دردومحیط مساوی نسبت سرعتهای انتشار موج در آن دومحیط است. اگرموج ازیك محیط وارد محیط

شکل ۶-۹ صدای منبع تولید صوت (S) که درکانون یك آینه مقعر قرار دارد درکانون آینه دیگر واضح‌تر ازنقاط اطراف آن شنیده می‌شود

دیگری‌شود که سرعت آن کمتر وطول موجش کوتاهتر گردد، سطح موجها به‌علت نزدیک‌شدن به‌عمق‌طوری منحرف می‌شوندکه زاویه میل آنها نسبت به سطح مشترك دومحیط کمتر می‌گردد، به‌عبارت دیگرشعاع موج به‌خط عمود برسطح مشترك دومحیط نزدیکتر می‌شود . برعکس اگر موج وارد محیطی شودکه سرعت آن بیشتر و طول موجش بزرگتر شود سطح موجها از هم دورتر می‌شوند ودر نتیجه زاویه میل آنها نسبت به‌سطح مشترك دومحیط بیشتر می‌گردد، به‌عبارت دیگرشعاع‌موج‌ازخط عمودبرسطح مشترك دو محیط دور می‌شود.

امواج صوتی نیز در اثر شکست درلایه‌های مختلف‌جو، که دمای آنها متفاوت است مسیرقوسی شکلی را طی می‌کنند، زیرا چنان‌که دیدیم سرعت صوت درهوای گرم بیشتر ازسرعت آن‌در هوای‌سرد است. مثلا هنگام قایق‌رانی روی‌یك دریاچه درشب صدای رادیو یاموزیك ساحل درفواصل نسبتاًدور از آن به خوبی شنیده می‌شود در صورتی که در روز شنیده‌نمی‌شود. علت این‌پدیده‌که درشکل ع ۱۰۰ مجسم شده‌این است‌که در شب هوای مجاور سطح آب سردتر ازهوای طبقات بالاست، درنتیجه سرعت صوت درطبقات هوای‌بالا بیش‌از سرعت آن‌درطبقات هوای پائین است. این امر سبب می‌شودکه امواج صوتی در لایه‌های هوا طوری شکست پیدا کنند که زاویه‌میل آنها به‌تدریج افزایش‌یابد تااین‌که پس از انعکاس‌کلی دوباره به‌طرف پائین برگردند. در روز برعکس، دمای هوای مجاور سطح آب بیشتر ازدمای هوای طبقات بالاست و امواج صوتی به طرف بالا منحرف می‌شوند.

آزمایشهایی از این نوع در سالهای اخیر با

شکل ع ۱۰۰ـشکست امواج صوتی درطبقات مختلف هوا به علت تغییر دما.

صداهای شدید حاصل ازتوپهای بزرگ انجام شده‌و امواج صوتی آنها از طبقات بالای جو منعکس شده است. به‌وسیله این‌آزمایشها تا اندازه‌ای محقق شده است که‌درناحیه استراتوسفر درارتفاع بین ۵۰ و ۶۰ کیلومتری سطح زمین طبقات هوای گرمی وجود دارد .

مشخصات صوت

اصوات‌را معمولا به‌دوسته تقسیم می‌کنند : اصوات موسیقی و صدا .

اصوات موسیقی به صوتهائی گفته می‌شودکه درگوش اثرمطلوب دارند. این‌اصوات معمولاتوسط اسبابهای موسیقی تولید می‌شوند . صوتهایی که در گوش اثر مطلوب ندارند صدا نامیده می‌شوند مانند صدای تفنگ ،صدای حاصل ازکشیدن‌سوهان

روی‌یك قطعه فلز، صدای خروج دود از اگزوز موتورسیکلت ومانند اینها.

باید درنظر داشت‌که اصوات موسیقی در اثر ارتعاش کاملا منظم‌اجسام‌کشسان (الاستیك) تولید می‌شوند بدون این‌که تغییر ناگهانی در دامنه ارتعاش آنها حاصل شود، در صورتی‌که صداها به وسیله اجسامی‌تولید می‌شوندکه تواتر منظم‌ندارند. ولی‌این تنهااختلاف بین‌اصوات‌موسیقی وصدانیست زیرامثلا تیك‌تیك ساعت یك صدای منظم و تناوبی است ولی صوت موسیقی نیست . شرط اساسی برای تولیداصوات موسیقی‌این‌است‌که بین نتهای‌موسیقی که‌بتوالی هم ایجاد می‌شوند فاصله موسیقی منظمی موجود باشد. فاصله موسیقی دراین جانسبت‌تواتر ارتعاشات دو نت موسیقی است‌که بتوالی یکدیگر ایجاد می‌شوند.

اصوات موسیقی باسه‌صفت متمایز ازیکدیگر تشخیص داده می‌شوندکه‌آنهارا «مشخصات اساسی صوت»نامند. این مشخصات عبارتنداز:

بلندی ، ارتفاع ، طنین

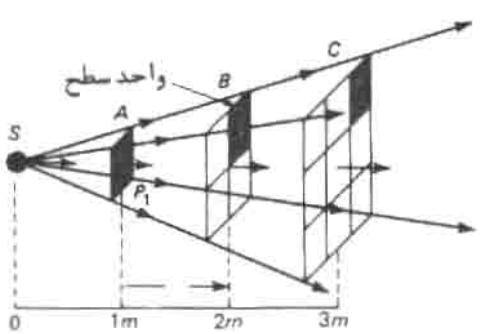
باید در نظر داشت‌که مشخصات نامبرده ، ذهنی هستند یعنی ویژگیهایی هستندکه‌گوش آنها را احساس می‌کند. ازنظر فیزیکی این مشخصات به ترتیب مترادف باشدت ، تواتر و شکل ارتعاشات می‌باشند. اینك به‌اختصار به‌شرح‌آنها می‌پردازیم.

الف ـ بلندی صوت ـ بلندی صوت ویژه‌تمام اصوات اعم ازصوتهای موسیقی وصداست وبامیزان‌احساس گوش ازصوتی‌که به‌آن می‌رسد ارتباط دارد. بلندی هرصوت بستگی به‌شدت آن‌صوت‌داردو **شدت صوت** بنابه تعریف ، مقدار انرژی صوتی است‌که درمدت یك ثانیه ازواحدسطح (مثلایك‌مترمربع) عمود برراستای انتشار امواج می‌گذرد . بنابراین شدت صوت‌کمیت فیزیکی است‌که ارتباطی با حساسیت‌گوش ندارد ، درصورتی‌که بلندی صوت یك صفت فیزیولوژیکی‌است که‌هم بستگی به‌انرژی وهم بستگی به حساسیت‌گوش دارد .

درشدت‌صوت‌عوامل‌زیرمؤثرند: دامنه‌ارتعاش، فاصله‌شنونده ازمنبع‌تولید صوت‌وجنس محیط‌انتشار.

۱ـ بستگی شدت صوت با دامنه ارتعاش ـ محاسبه نشان می‌دهد که انرژی حرکت ارتعاشی متناسب با مجذور دامنه ارتعاش است. چون متناسب بودن انرژی با مجذور دامنه ارتعاش در مورد همهٔ ارتعاشات صادق است بنابراین انرژی امواج‌صوتی ودر نتیجه شدت صوت هم متناسب بامجذور دامنه است. مثلا اگردامنه ارتعاش ۲یا۳ برابرشودشدت ۴یا۹ برابر می‌گردد .

۲ـبستگی شدت صوت‌بافاصله ـ محاسبه وآزمایش نشان می‌دهدکه شدت‌صوت متناسب باعکس‌مجذور فاصله ازمنبع تولیدصوت است (قانون عکس‌مجذور فاصله). درشکل (۶ـ۱۱) ، S نمایش یك‌منبع‌است



شکل۶ـ۱۱ـ نمایش قانون عکس مجذور فاصله

که‌امواج صوتی گسیل می‌دارد. مقدار انرژی‌صوتی که‌درزمان معین ازواحد سطح (A) واقع در فاصله یك‌متری منبع S، می‌گذرد ازدوسطح B و C که‌به ترتیب درفاصله‌های دومتری وسه‌متری S، موازی با A قراردارند نیزمی‌گذرد زیرا این‌انرژی‌درجایی انبار نمی‌شود. چون مساحتهای این‌سطوح به‌نسبت ۱و۴و۹ هستند انرژی‌که درهرثانیه ازواحد سطح‌در هریك ازاین فاصله‌ها می‌گذرد به‌ترتیب به‌نسبت۱ و $\frac{1}{4}$ و $\frac{1}{9}$ خواهد بود.

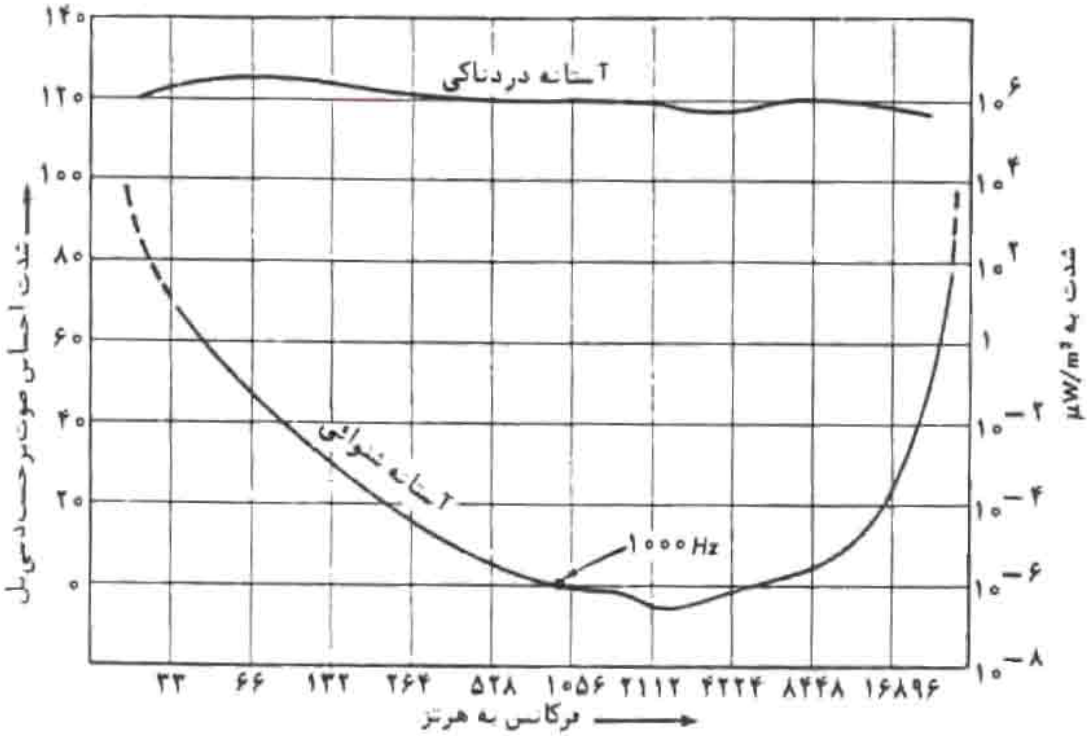
۳ـ اثر محیط انتشار در شدت صوت ـ محیطی که‌صوت‌درآن منتشر می‌شودکم وبیش انرژی‌صوتی راجذب می‌کند وآن قسمت ازانرژی صوتی که‌جذب محیط می‌شود به‌گرما تبدیل می‌گردد. محیطهایی که‌زیادجاذب انرژی‌هستند عملاصوت‌را خفه‌میکنند. توانایی جذب‌یك‌محیط برای‌امواج صوتی«انتخابی»[1] است، یعنی انرژی که در واحد زمان در ضخامت معینی ازمحیط مورد نظر جذب می‌شود بستگی به تواتر صوت داردمثلا هرچه تواتر صوت‌بیشتر باشد درهوا بیشتر جذب می‌شود.

حساسیت‌گوش انسان و نمودار شنوایی آن

گفتیم‌که بلندی یك صوت بستگی به انرژی صوت و حساسیت‌گوش دارد و حساسیت‌گوش هم ارتباط بافرکانس صوت دارد، بنابراین اصواتی‌که شدتشان یکسان ولی‌تواترشان مختلف است معمولا بابلندی متفاوت احساس می‌شوند. آزمایش نشان داده است که برای یك فرکانس معین اگر شدت صوت از یك حد معین کمتر باشد آن صوت دیگر شنیده نمی‌شود. این شدت حد را «آستانه شنوایی» نامیده‌اند. اگربرعکس شدت صوت را به تدریج افزایش دهند به حدی می‌رسدکه درگوش ناراحتی ودرد احساس می‌شود. این‌حد فوقانی‌شدت را «آستانه دردناکی» گوش نامیده‌اند. نتایج آزمایشهای بسیاری‌که با فرکانسهای متفاوت روی اشخاص مختلف انجام شده است نشان می‌دهدکه گوش انسان درحالت طبیعی به‌توانهای از ۲۰۰۰ تا۴۰۰۰ هرتز حساستر است وحساسیت‌گوش برای توانهای خیلی زیادتر یاخیلی‌کمتر از این حدودبه میزان زیادکاهش می‌یابد، به‌عبارت دیگر شدت‌لازم برای شنیدن توانهای دو حد شنوائی (۲۰ هرتزو ۲۰۰۰۰هرتز) چندین‌برابر بزرگتر ازشدتی است‌که برای شنیدن توانهای‌از ۲۰۰۰تا۴۰۰۰ هرتزلازم است. شکل (ع-۱۲) نمودار شنوائی‌گوش راکه درآن دوآستانه شنوائی و دردناکی برای توانهای متفاوت نمایش داده‌شده‌است نشان می‌دهد.

برای تعیین شدت یك صوت، معمولا توان (یعنی انرژی درواحدزمان) آن‌را نسبت به‌توان‌یك صوت دیگر می‌سنجند. چون‌گوش انسان می‌تواند اصوات بسیاری راباگام‌انرژی بسیارگسترده‌دریافت کند، برای این‌که نسبت این دو توان عدد بزرگی نشود معمولا به جای خود نسبت، لگاریتم آن را حساب می‌کنند. بنابراین اگر P توان صوت مورد نظرو P_0توان‌صوت‌مبنابه‌ازاءفرکانس‌معین‌باشد شدت

۱ـ خاصیت انتخابی محیط برای جذب صوت نظیر خاصیت انتخابی محیط برای جذب نور است که درکتاب فیزیک سال دوم با آن آشنا شده‌اید



شکل ۶ـ۱۲ ـ نمودار شنوائی گوش انسان که در آن آستانه شنوائی و آستانه دردناکی مشخص شده است .

تسبی احساس صوت ازرابطه زیرحساب می‌شود :

$$b = k\log_{10}\frac{P}{P_0} \quad (۶-۸)$$

b شدت احساس صوت

k مقدار ثابتی است.

P_0 را معمولاً توان آستانه شنوائی گوش طبیعی برای تواتر ۱۰۰۰ هرتز انتخاب می‌کنند. این توان برابر $۱۰^{-۱۲}$ $\frac{\text{وات}}{\text{مترمربع}}$ یا $۱۰^{-۶}$ میکرو-وات برمترمربع $(\frac{\mu W}{m^2})$ است اگر $k=۱$ باشد b برحسب واحد بل (به‌نام گراهام‌بل[1] مخترع تلفن) بیان می‌شودچون بل‌واحد بزرگی است در عمل به جای آن واحد کوچکتری به‌نام دسی‌بل که یک‌دهم بل است به‌کار می‌رود. بنابراین شدت‌احساس‌صوت برحسب دسی‌بل از رابطه‌زیر حساب می‌شود.

$$b\,d = ۱۰\log_{10}\frac{P}{P_0} \quad (۶-۹)$$

پرسش ۶ـ۹ ـ اگر توان صوتی $۱۰^{-۲}\frac{\mu W}{m^2}$ باشد شدت احساس آن چند دسی‌بل است؟

درجدول (۶ـ۲) حدود توان چند صدا برحسب میکرو وات برمترمربع و شدت احساس‌نسبی آنها برحسب بل و دسی‌بل برای مقایسه داده شده است.

---

۱ ـ Alexander Graham Bell فیزیک‌دان امریکائی (۱۹۲۲-۱۸۹۴ میلادی).

جدول (۶-۲) حدود توان چند صدای ضعیف و قوی

نوع صدا	توان برحسب میکروروات برمترمربع	قدت احساس صوت	
		بل	دسی‌بل
آستانه شنوایی	10^{-4}	۰	۰
صدای نفس‌کشیدن معمولی	10^{-5}	۱	۱۰
صدای خش‌خش برگ‌درختان درنسیم	10^{-4}	۲	۲۰
صحبت‌کردن (از فاصله یک متر)	10^{-3}	۳	۳۰
صحبت درفروشگاه یا دفترکار	10^{0}	۶	۶۰
ترافیک شلوغ	10^{1}	۷	۷۰
ترن زیرزمینی	10^{4}	۱۰	۱۰۰
آستانه دردناکی	10^{6}	۱۲	۱۲۰
مسلسل	10^{7}	۱۳	۱۳۰
فرش هواپیمای جت معمولی درموقع بلندشدن	10^{8}	۱۴	۱۴۰
راکت فضائی موقع بلندشدن از زمین	10^{11}	۱۷	۱۷۰

ب- ارتفاع صوت. ارتفاع، صفت وبژه اصوات موسیقی است وبا این صفت دونت زیر و بم از یك دیگر تشخیص داده‌می‌شود. ارتفاع یك‌صوت‌بستگی به تواتر آن دارد: هرچه صوتی زیرتر باشد تواتر آن بیشتر است.

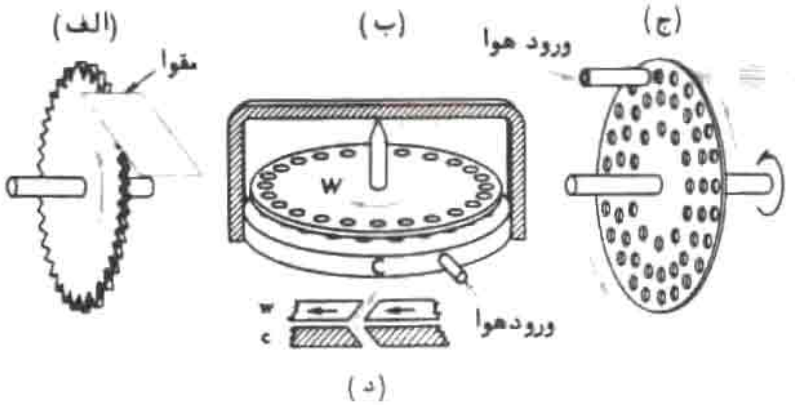
اگر تواتر دوصوت یکی باشد ارتفاع آن دو صوت نیز یکی است. در این صورت دو صوت را «همصدا» گویند.

پرسش ۶-۱۰- به‌نظر شما با استفاده از خاصیت همصدایی آیا می‌توان ارتفاع یك صوت را معین کرد؟

باید درنظر داشت‌که ارتفاع صوت یك‌کیفیت احساسی و فیزیولژیکی است درصورتی که تواتر یك کمیت فیزیکی است. بنابراین ارتفاع و تواتر یکی نیستند ولی احساس ارتفاع با تواتر بستگی دارد. با آزمایشهای ساده‌ای می‌توان این بستگی‌را نشان داد:

در شکل ۶-۱۳ - الف یك چرخ دندانه‌دار (به‌نام چرخ ساوار[1]) نشان داده شده است‌که یك قطعه مقوا با دندانه‌های آن در تماس است. هرگاه چرخ را بچرخانند صفحه مقوا به‌ارتعاش درمی‌آید و صدا تولید می‌کند و هرچه سرعت دوران چرخ بیشتر باشد تواتر ارتعاش مقوا زیادتر می‌شود و صوت حاصل از آن زیرتر (و ارتعاش بیشتر) می‌گردد. برعکس اگر سرعت دوران چرخ کم شود تواتر صوت حاصل نیز کم می‌شود و صوت بم،

۱- Savart دانشمند فرانسوی (۱۷۹۱-۱۸۴۱)که تارهای مرتعش‌را مورد بررسی قرار داده است.



شکل ۶-۱۴- آزمایشهایی که نشاندهنده ارتفاع صوت بستگی به‌تواتر آن دارد.

یعنی ارتعاش کم می‌گردد. بدیهی است اگر p عده دندانه‌های چرخ و n عده دورهای آن در ثانیه باشد تواتر صوت حاصل ازصفحه مقوا برابرخواهد بود با:

$$f = p \cdot n \qquad (۱۰-۶)$$

شکل ب اسبابی به‌نام سیرن را (نظیر آن چه معمولاً درکارخانه‌ها برای اعلام شروع یا ختم کار مورد استفاده قرار می‌گیرد) نشان می‌دهد. هوای فشرده پس‌از عبور از سوراخهای کوچك و متساوی‌الفاصله قرص ثابت C، از سوراخهای قرص دوار W، که تعداد و قطرشان با سوراخهای موجود در قرص ثابت C برابر ولی شیب آنها برعکس است، (شکل د) نیز می‌گذرد وضمن عبور ازاین سوراخها نیرویی بربدنه آنها وارد می‌کندکه سبب چرخیدن قرص W می‌شود. همین‌که یك سوراخ دوقرص W از مقابل سوراخ مجاور خود در قرص C گذشت عبور هوا در لحظهٔ کوتاهی توسط فاصله بین دو سوراخ متوالی قطع می‌شود تا این‌که سوراخ بعدی جای آن را بگیرد. عبور متناوب جریان هوا از سوراخهای قرص دوار W ایجاد یك‌صوت موسیقی می‌کندکه تواتر آن مانند حالت پیش $f = p \cdot n$ است (دراین‌جا p عده سوراخها است).

شکل (ج) قرص سیرنی را نشان می‌دهد که به‌جای یك‌ردیف، چند ردیف سوراخ‌متساوی‌الفاصله (ولی باتعداد متفاوت) دارد و جریان هوای فشرده فقط توسط یك لوله ازسوراخها می‌گذرد. با ثابت نگاهداشتن لوله‌هوا مقابل هریك‌از ردیفها و تغییر دادن سرعت دوران قرص سیرن می‌توان اصوات موسیقی باارتفاعهای‌دلخواه ومتفاوت‌را تولیدکرد.

پرسش ۶-۱۱- در نظر بگیریدکه در یك قرص سیرن چندردیف (مثلا ۸ ردیف) سوراخ‌وجود داردکه هرردیف یکی‌از نتهای موسیقی‌را ایجاد می‌کند. اگر سرعت دوران قرص را تغییر دهیم از لحاظ اثر برگوش‌کدام‌کیفیت تغییر می‌کند و کدام کیفیت ثابت می‌ماند؟

نتایج آزمایشهای متعددی‌که روی گوش اشخاص، چه موسیقی‌دان و چه‌عادی صورت‌گرفته است نشان می‌دهد که ارتفاع و تواتر یکی نیستند ولی با هم بستگی دارند.

بهـ طنین صوتـ طنین نیز مـانند ارتفاع، صفت ویژه اصوات موسیقی است، با این صفت می‌تـوان صوتهـای هم‌شدت و هم‌ارتفاع راکه ازمنابع صوتی مختلف تولید می‌شوند از هم تمیز داد. مثلاً وقتی که اعضاء یك ارکستر با سازهای هم‌کوك خود یك نت خاص موسیقی را با هم می‌نوازند گوشی‌که با اصوات سازهای موسیقی آشناست صوتهای حاصل از سازهای متفاوت را از یك‌دیگر تشخیص می‌دهد. زیرا با آن‌که این صوتها هم‌شدت وهم‌ارتفاع‌هستند طنین متفاوت دارند.

برای این‌که کیفیت طنین بهتر شناخته شود صوت حاصل‌از یك دیاپازن را به‌وسیله نـوسان‌نگار کاتدی میکروفن‌دار (شکل ۵-۲۳) بررسی می‌کنیم: وقتی‌که دیاپازن را بـه‌ارتعاش در می‌آوریم و جلو میکروفن نوسان‌نگار نگاه می‌داریم یك منحنی ساده سینوسی روی صفحه نـوسان‌نگار ظاهـر می‌شود و نشان می‌دهدکه صوت دیاپازن یك‌صوت ساده‌است. هرصوتی‌که از یك حرکت ارتعاشی ساده سینوسی به وجود آید «صوت‌ساده» نامیده می‌شود. چنین صوتی معمولاً بی‌حالت وبی‌روح است‌که اثر آن درگوش نه خوشایند است و نه ناخوشایند وطنین‌آن ویژگی خاصی ندارد. ولـی اگـر همین دیاپازن مرتعش را روی جعبهٔ خاص تقویت صدا (جعبهٔ تشدید صدا) قرار دهیم منحنی که روی صفحه نـوسان‌نگار دیده می‌شود گرچه تناوبی است ولـی سینوسی نیست و معرف یك حرکت ارتعاشی مـرکب است. در ایـن صورت می‌گوئیم صوت‌حاصل، یك «صوت موسیقی مرکب» است . ایـن صوت دارای حالت و ویژگی خاصی است کـه به‌وسیله آن باز شناخته می‌شود. اصواتی‌که ازاغلب‌سازهای موسیقی تولید می‌شوند دارای حالت و ویژگی‌خاص‌خود هستندکه‌با اندکی آشنایی می‌توان آنها را تشخیص داد.

در بخش ترکیب حرکات ارتعاشی دیدیم‌کـه هرحرکت ارتعاشی مرکب با تواتر N را می‌تـوان به مجموعه‌ای از حرکات ارتعاشی ساده سینوسی با تواتر KN (که K عدد درستی است) تجزیه کـرد. براساس این خاصیت می‌توانیم هرصوت مرکب به تواتر N را مجموعه‌ای ازچند صوت ساده باتواتر KN بدانیم‌که همه باهم تولید می‌شوند.

بهترین صوت این مجموعه ($K=1$) «صوت اصلی» نامیده می‌شود، زیرا تواتر صوت مـرکب نیز برابر تواتر همین‌صوت اصلی است. بقیه صوتها راکـه تواتر آنها مضرب صحیحی از تواتر صـوت اصلی است «هماهنگ» (یا هـارمونیك) صوت اصلی می‌نامند. آزمایش نشان می‌دهـد هرتغییری‌کـه در تواتر یا در دامنه اجزاء صوت مرکب صورت‌گیرد سبب تغییر طنین آن می‌شود بنابراین:

طنین یك صوت موسیقی مرکب بستگی به‌تعداد هماهنگهای‌تشکیل‌دهنده صوت وشدت‌نسبی‌آنها دارد.

پرسش ۶ -۱۲ـ آیاکیفیت‌طنین درتشخیص صدای اشخاص نیز مؤثر است؟

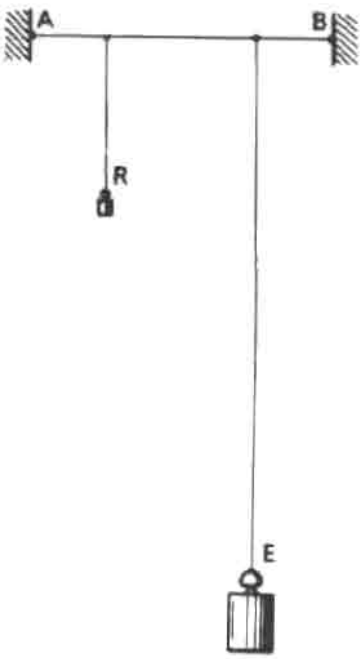
تشدید یا رزونانس[۱]ـ هرگاه برجسمی کـه می‌تواند بـا پرید معین (پریـد طبیعی) نـوسان کند ، ضربه‌های متناوبـی که پرید آنها با پرید نوسان جسم برابر است وارد کنیم جسم شروع به نوسان

۱ـ Resonance

می‌کند و دامنه نوسان آن به تدریج افزایش می‌یابد. این پدیده را تشدید یا رزونانس گویند. چون معمولاً مقداری از انرژی جسمی که نوسان می‌کند در اثر اصطکاک به‌صورت گرما تلف شود اگر انرژی ازدست‌رفته مرتباً به‌وسیله ضربه‌ها جبران‌شود دامنه نوسان جسم ثابت می‌ماند. تاب، نمونه ساده‌ای از پدیدهٔ تشدید را نشان می‌دهد، زیرا مجموعه تاب و شخصی که در آن نشسته است آونگی را تشکیل می‌دهد که برید نوسان آن تابع طول آونگ است. اگر تواتر ضربه‌های واردبر تاب باتواتر آن یکی باشددامنه‌نوسان‌تاب زیاد می‌شود.

پرسش ۶-۱۳- اگر برید ضربه‌هایی که بر جسم نوسان‌کننده وارد می‌شود با برید خاص جسم برابر نباشد آیا جسم نوسان می‌کند؟

در شکل ۶-۱۴ مثال دیگری از پدیده تشدید نشان داده شده است:

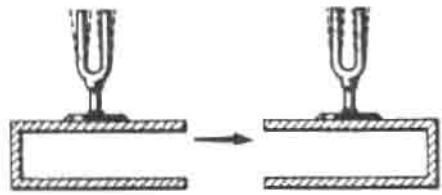


شکل ۶-۱۴
پدیده تشدید وقتی اتفاق می‌افتدکه برید دوآونگ یکی باشد.

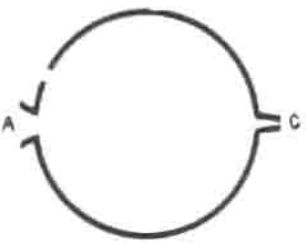
دو وزنه E و R توسط دو رشته‌نخ به‌صورت دو آونگ ساده به‌یك پایه الاستیك‌که دراین‌جا سیم فولادی افقی AB است آویخته شده‌اند و وزنه E سنگینتر از وزنه R است. آونگ E را محرك و آونگ R را مشدد یا رزوناتور می‌نامیم. طول آونگ E ازابتدا بزرگتر ازطول آونگ R انتخاب می‌شود، درنتیجه برید نوسان آن بزرگتر از برید نوسان آونگ R است. هرگاه در این حالت آونگ E را به نوسان در آوریم آونگ R به طور منظم نوسان نخواهد کرد، بلکه چند نوسان کم دامنه انجام می‌دهد سپس متوقف می‌شود و این عمل مرتباً تکرار می‌گردد. علت این است‌که ضربه‌های متوالی آونگ محرك E از راه پایه الاستیك AB به‌آونگ R منتقل می‌شود ولی برید این ضربه‌ها باپرید نوسانهای ویژهٔ آونگ R مطابقت ندارد. اگر یکی از این ضربه‌ها آونگ R را به نوسان درآورد ضربه‌بعدی اثر آن‌را خنثی می‌کند ودرنتیجه آونگ R نمی‌تواند نوسان‌منظمی داشته باشد.

اگر طول آونگ محرك E را به‌تدریج کم کنیم تا تواتر آن (f) رفته رفته زیاد شود وقتی‌که تواتر آن به‌تواتر خاص آونگ R (یعنی f_0)نزدیك می‌شود این آونگ شروع به‌نوسان منظم‌تری می‌کند و هرچه تواتر دو آونگ به یکدیگر نزدیکتر شوند دامنه نوسان آونگ R بیشتر می‌شود و در حالتی که $f = f_0$ است دامنه نوسان آونگ R به بیشترین مقدار خود می‌رسد و این، پدیده تشدید یا رزونانس است.

پدیده تشدید در بسیاری از موارد به‌ویژه



شکل ۶-۱۵- دیاپازنهائی که روی جعبه تشدید قرار دارند پدیده تشدید را نشان می‌دهند.



شکل ۶-۱۶- رزوناتور هلمهولتز

درصوت مشاهده می‌شود: مثلاً اگر دوتار هم‌کوك مجاور هم باشند و سیم یکی از آنها را به ارتعاش درآورند سیم مشابه در تار دیگر نیز خود به‌خود به‌ارتعاش درمی‌آید وهمان نت‌را تولید می‌کند.

شکل (۶-۱۵) نمونه‌دیگری ازپدیده‌تشدید را به‌وسیله دو دیاپازن یکسان که روی دو جعبهٔ تشدیدیکسان‌نصب شده‌اند نشان می‌دهد.اگریکی‌از دو دیاپازن مثلاً A را به‌ارتعاش درآوریم دیاپازن دیگر خود به‌خود به‌ارتعاش درمی‌آید ومی‌توان با متوقف‌کردن ارتعاشات دیاپازن A با دست، ادامه صوت را از دیاپازن B شنید. در این آزمایش جعبه چوبی زیر هردیاپازن عمل تشدید و تقویت صوت را انجام می‌دهد. هرموج صوتی تقویت شده‌ای‌که از جعبهٔ زیر دیاپازن A گسیل می‌شود و وارد جعبهٔ دیاپازن B می‌گردد هوای درون آن را به ارتعاش درمی‌آورد. با واردشدن ضربه به‌دیوارمهای این جعبه، دیاپازن B نیز با همان بسد به‌ارتعاش درمی‌آید. برای این که پدیده رزونانس صورت‌گیرد باید ابعاد دو جعبه و دیاپازنها کاملاً یکسان باشند تا تواتر ارتعاشات آنها مساوی شود.

پرسش ۶-۱۴- انرژی ارتعاشی که صرف ارتعاش هوای درون جعبهٔ تشدید می‌شود از کجا تأمین‌می‌گردد؟ آیا وجود این‌جعبه، استهلاك دامنه حرکت دیاپازن را تسریع می‌کند؟

پرسش ۶-۱۵- هرگاه شخصی جلو یك پیانو نت خاصی را به‌طور مداوم اجرا کند از پیانو صدای همان‌نت شنیده‌می‌شود. علت‌را توضیح‌دهید.

با استفاده از پدیده رزونانس می‌توان تواتر یك صوت‌را معین‌کرد و یا هارمونیکهای یك صوت مرکب‌را تشخیص داد. برای این‌منظور می‌توان از رزوناتورهائی از نوع رزوناتور هلمهولتز[1] (شکل ۶-۱۶) استفاده‌کرد. فضای‌کروی‌شکل درون این رزوناتورها فقط به‌ازاء تواتر معین وحساب‌شده‌ای به ارتعاش درمی‌آید. منبع صوت محرك جلو دهانه A و زائده C درگوش قرار داده می‌شود.

منابع تولید صوتهای موسیقی

گفتیم صوتهای موسیقی اصواتی هستند که اثر آنها بر گوش موزون و خوشایند است، چه جداگانه یکی پس از دیگری (به صورت ملودی) و

۱- Herman Helm Holtz (۱۸۲۱-۱۸۹۴ میلادی) فیزیك‌دان آلمانی که در نور و صوت و الکتریسیته تحقیقاتی انجام داده است.

چه باهم (به‌صورت هارمونی) نواخته شوند. چنان‌که دیدیم دو صفت ویژه اصوات موسیقی ارتفاع و طنین است که اولی بستگی به‌تواتر منبع تولید صوت و دومی بستگی به‌هماهنگهایی دارد که باهم ترکیب می‌شوند. تعداد و نوع هماهنگهائی که یك اسباب موسیقی تولید می‌کند بستگی به‌نوع اسباب و روش به ارتعاش درآوردن آن دارد.

علاوه بر این اسباب باید بتواند تعداد زیادی از نتهای موسیقی را[1] که فاصله موسیقی آنها مشخص وحساب شده است تولید کند.

اسبابهای مولد اصوات موسیقی را معمولاً به سه‌دسته تقسیم می‌کنند: سازهای تاری، سازهای بادی وسازهای ضربی. برای این‌که چگونگی تولید صوت در این اسبابها مشخص شود نخست تارهای مرتعش و لوله‌های صوتی را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

الف ـ تارهای مرتعش ـ تار مرتعش یك رشته سیم از جنس فولاد یا ژه است که بین دو نقطه ثابت کشیده شده است ودر اثر ارتعاش به صدا درمی‌آید ازلحاظ تئوری، یك‌تار مرتعش بنا به تعریف عبارت است ازیك رشته‌سیم باریك وبلند و قابل انعطاف با مقطع ثابت (یکنواخت) که با دامنه کم در اطراف وضع تعادل خودمرتعش شود. چنین تارمرتعشی‌فقط جنبهٔ تئوری دارد و ایده‌آل است. تارهای مرتعش اسبابهای موسیقی ارتعاشات پیچیده‌تری دارند ولی اگر شرایط آنها به‌شرایط تارایده‌آل نزدیك باشد تاحد زیادی‌ازقوانین تارهای‌ایده‌آل پیروی‌می‌کنند.

روش به‌ارتعاش درآوردن تارهای مرتعش در سازهای موسیقی یکسان نیست. مثلاً سیمهای ویولن باآرشه، سیمهای گیتار وچنگ با انگشت و سیمهای پیانو با چکش به ارتعاش در می‌آیند. تار مرتعش را درشرایط کاملا خاص می‌توان طوری به ارتعاش درآوردکه فقط یك‌شکم درو سط و دوگره‌در دو سرآن تولید شود. (شکل ع ۱۷۰)

شکل ع ۱۷۰ـ طرز ارتعاش یك تارمرتعش هنگام تولید صوت اصلی

۱ـ نت‌هایی که درموسیقی به‌کار می‌روند ارتفاع مشخص و درنتیجه فاصله موسیقی حساب شده‌ای دارند که مجموعاً یك‌گام موسیقی‌را تشکیل می‌دهند. اساسی نتهای یك‌گام طبیعی که فاصله‌های موسیقی نتهای آن به‌پرده ونیم‌پرده تقسیم شده‌است به‌ترتیب زیر است:

	do	re	mi	fa	sol	la	si	(do)′
۱		$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	۲
		پرده	پرده	نیم‌پرده	پرده	پرده	نیم‌پرده	

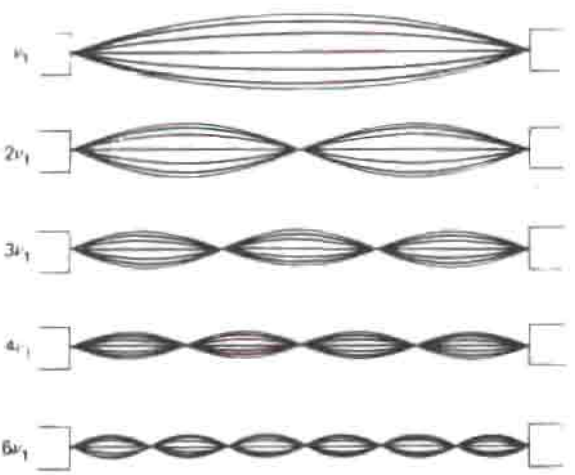
۱ـ مواصل موسیقی نتها نسبت به‌مبنای do

۲ـ مواصل نتها نسبت به‌یکدیگر برحسب پرده ونیم‌پرده

هر پرده‌معادل $\frac{9}{8}$ یا $\frac{10}{9}$ است که اختلاف آنها فاچیز است ونیم پرده معادل $\frac{16}{15}$ است نت (do)′ که تواتر آن دوبرابر تواتر نت do (مبنای گام) است اکتاونت مینا نامیده می‌شود.

دراین حالت تار بهترین صوت خود، یا به عبارت دیگر، صوت اصلی خودرا تولید می‌کند.

بایك تارمرتعش،علاوه‌برصوت اصلی‌می‌توان هماهنگ‌های دیگر این صوت‌راکه تواتر آنهامضرب صحیحی از تواتر صوت اصلی است نیز ایجاد کرد. برای این‌منظور کافی است هنگامی که سیم در حال ارتعاش است نوك انگشت‌را دروسط‌یادر $\frac{1}{3}$ یا در $\frac{1}{4}$ و ... طول‌سیم به‌طور ملایم‌تماس داد ومانع‌ارتعاش آن‌نقطه شد. در نتیجه وضع ارتعاش سیم به صورت حالتهای ۲ و ۳ و ٤ ... کـه در شکل ۶ - ۱۸



شکل(۶-۱۸)- تولید هماهنگ‌های صوت اصلی درتارهای‌مرتعش

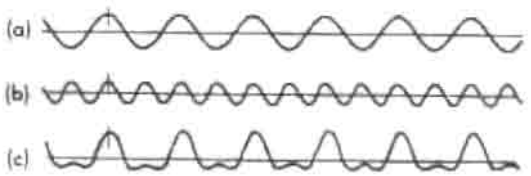
نمایش داده‌شده است درمی‌آید وتواتر صوت حاصل به‌ترتیب دوبرابر،سه‌برابر وچهار برابر تواترصوت اصلی تار می‌شود.

علت ایجاد گره و شکم در طول سیم ، تشکیل امواج ایستاده در سیم است : وقتی که در یك نقطه از طول تار در اثر زدن ضربه یا کشیدن آرشه آشفتگی به‌وجود می‌آید این آشفتگی

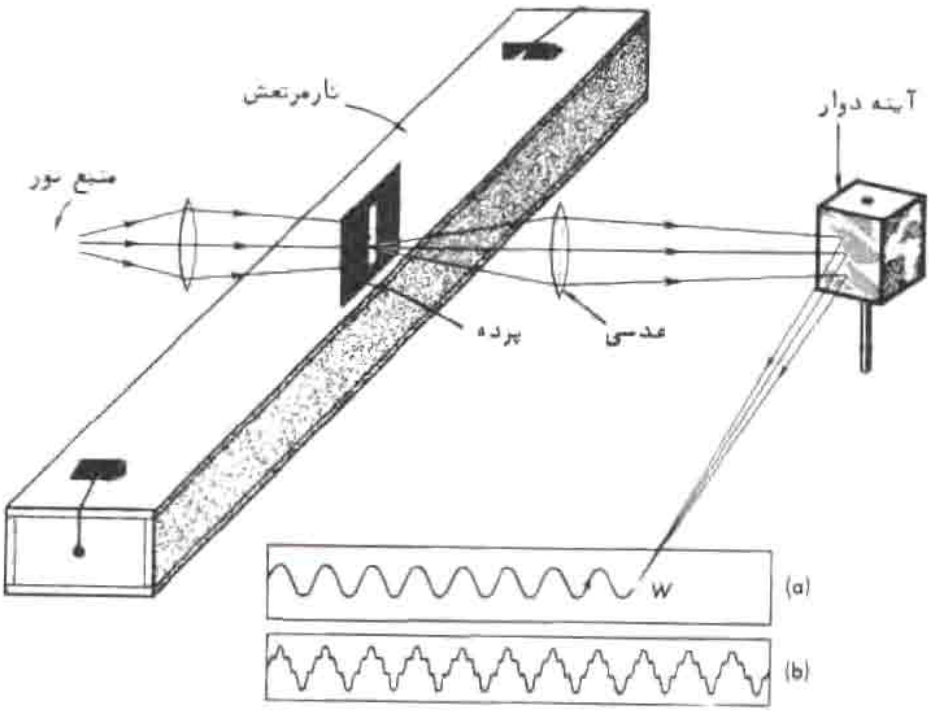
شکل ۶ - ۱۹ - وضع ارتعاشی تار مرتعشی که صوت اصلی و هماهنگ دوم آنرا باهم ایجاد می‌کند

به‌صورت تك‌موج یادسته امواج درتار منتشرشده و از روی مانعهای سخت دو سر تار به طور وارونه برمی‌گردد واین عمل‌رفت و برگشت ادامه می‌یابد وسبب می‌شودکه درطول تارگره وشکم ایجادشود.

به‌آسانی می‌توان یك‌تار مرتعش‌را طوری به ارتعاش درآوردکه صوت‌اصلی خودرا باچندهماهنگ زیر، باهم ایجادکند. برای این منظورکافی است‌که ضربه محکمتری به‌یك طرف تار واردکنند (یا آرشه را محکمتر روی‌سیم بکشند). شکل ۶ - ۱۹ وضع ارتعاش یك‌تار مرتعش‌را به‌هنگام تولید صوت‌اصلی باتواتر f وهماهنگ‌دوم آن باتواتر2f نشان‌میدهد. به‌طوری‌که درشکل دیده می‌شود علاوه براین که یك‌شکم مربوط به‌صوت تار با تـواتر f ایجاد شده است دوشکم دیگر مربوط به‌هماهنگ دوم با تواتر 2f نیز درون شکم اول تشکیل گردیده است. در شکل ۶ - ۲۰ نموداراولی نمایش ارتعاشات‌صوت اصلی باتواتر f ونمودار دومی نمایش هماهنگ دوم باتواتر 2f ونمودار سومی نمایش ترکیب‌این‌صوت است‌که برروی پرده‌گوش اثر می‌کند.



شکل ۶-۲۰- ترکیب صوت اصلی وهم‌آهنگ دوم‌آن



شکل ع ۲۱ ـ آزمایش برای مشاهده وضع ارتعاشی یک تار مرتعش

بایک آزمایش جالب که در شکل ع ـ۲۱ نشان داده‌شده است می‌توان به‌کمک یک آینه دوار وضع ارتعاشی یک‌تار مرتعش‌را مجسم کرد.

نور قوی حاصل ازیک‌لامپ، توسط یک‌عدسی دروسط یک سیم فولادی مرتعش متمرکز می‌شود. برای این‌منظور می‌توان از یک دستگاه صوت‌سنج (سونومتر) که معمولاً[2] در آزمایشگاهها موجود است[1] استفاده کرد. در محل تمرکز نور یک شکاف قائم کوچک‌که روی صفحه‌ای ایجاد شده است‌قرار دارد.

تصویر این شکاف و جزو کوچکی از سیم که مقابل شکاف است توسط یک‌عدسی دیگر، پس از بازتابش نور از روی سطح آینه دوار روی پرده‌ای تشکیل می‌شود. وقتی که سیم مرتعش شود و آینه نیز همزمان باارتعاش آن دوران کند روی پرده منحنی دندانه‌ای‌مشاهده می‌شود. اگر ضربه‌ملایمی به‌وسط سیم وارد شود منحنی سینوسی ساده‌ای‌مانند منحنی (الف) روی پرده‌دیده می‌شود ولی اگرضربه محکمی نزدیک به انتهای سیم وارد شود منحنی دندانه‌داری مانند شکل (ب) مشاهده می‌گردد،

۱ـ دستگاه صوت‌سنج معمولا ازدر رشته سیم‌فولادی تشکیل یافته است‌که روی یک جعبه‌چوبی تشدید، بین دوخرك کشیده شده‌اند وکشش سیمها قابل تنظیم است. به‌کمك این دستگاه می‌توان قوانین تارهای مرتعش را تحقیق کرد.

زیرا دراین حالت صوت اصلی همراه باچند هماهنگ آن تولید می‌شود.

فرمول وقوانین تارهای مرتعش ـ فرض کنیم که تار مرتعش وضع ارتعاشی ایده‌آل خود را دارد و صوت اصلی خود را تولید می‌کند. بنابراین دوگره در دو انتهای تار و یک شکم دروسط آن تشکیل می‌شود، و چون همان طور که گفتیم تشکیل گره وشکم به‌علت ایجاد امواج ساکن است، فاصله بین هردوگره متوالی برابر نصف طول موج است. اگرطول تار را به l نمایش دهیم برای صوت اصلی داریم:

$$\lambda = 2l \quad \text{ویا} \quad l = \frac{\lambda}{2}$$

ازطرف دیگر داشتیم:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad \text{و} \quad f = \frac{V}{\lambda}$$

بنابراین:

$$f = \frac{V}{2l} \qquad (۶-۱۱)$$

V سرعت انتشار امواج عرضی در طول تار است که بستگی به‌نیروی کشش‌تار وجرم‌واحدطول آن دارد وچنان‌که دیدیم از رابطه $V = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ حساب می‌شود بنابراین:

$$\boxed{f = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{F}{\mu}}} \qquad (۶-۱۲)$$

تواترصوت اصلی تار مرتعش

که در آن l برحسب متر و F برحسب نیوتن و μ برحسب $\frac{\text{کیلوگرم}}{\text{متر}}$ و f برحسب هرتز است.

اگرتارمرتعش هماهنگ k ام صوت اصلی‌خود را تولید کند طول تار مطابق آنچه درشکل ۶ـ۱۸ نمایش داده‌شده است برابر $k\frac{\lambda}{2}$ خواهد بود (زیرا فاصله هر دوگره متوالی $\frac{\lambda}{2}$ است) دراین صورت تواتر هماهنگ k ام برابر خواهد بود با:

$$f_k = kf$$

یا

$$\boxed{f_k = \frac{k}{2l}\sqrt{\frac{F}{\mu}}} \qquad (۶-۱۳)$$

از روابط بالا قوانین‌تارهای مرتعش به‌صورت زیر نتیجه می‌شود:

قانون اثر طول ـ تواتر صوت اصلی تار مرتعش با طول آن نسبت عکس دارد.

قانون اثر نیروی کشش ـ تواتر صوت اصلی تار مرتعش باجذر نیروی کشش تار متناسب است.

قانون اثر جرم ـ تواتر صوت اصلی تار مرتعش با جذر جرم واحد طول تارنسبت عکس دارد.

قانون هماهنگها ـ با یک تار مرتعش می‌توان هماهنگهای فرد و زوج صوت اصلی را نیز تولید کرد.

قوانین تارهای مرتعش را می‌توان عملاً به وسیله صوت سنج تحقیق کرد و درستی رابطه ۶ـ۱۳ را بررسی نمود.

مثال ـ یکی از سیمهای پیانویی دارای طول ۱/۱۰ متر وجرم ۰/۱۶۰ کیلوگرم است اگرتواتر

صوت اصلی آن ۳۳/۰ هرتز باشد نیروی کشش آن چند نیوتن است؟

داریم:

$$f=\frac{1}{2l}\sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

یا:

$$F=4l^2f^2\mu$$

به‌ازاء $f=33/0\,Hz$ و $l=1/10\,m$

و

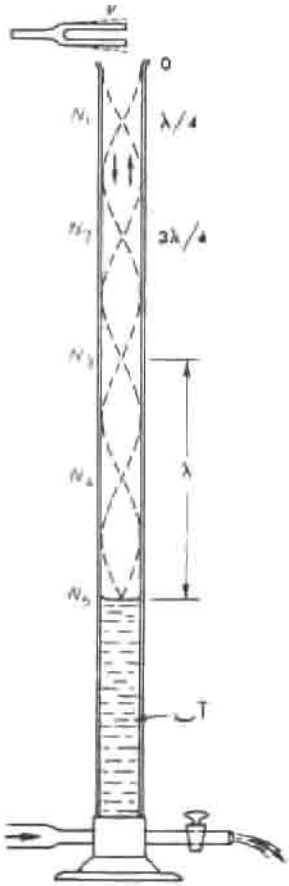
$$\mu=\frac{0/160}{1/10}\ \frac{kg}{m}$$

خواهیم داشت:

$$F=4\times(1/10)^2\times(33)^2\times\frac{0/160}{1/10}\simeq 766N$$

ب ـ لوله‌های صوتی ـ لوله صوتی بنا به‌تعریف لوله‌ای است که وقتی هوای درون آن به‌ارتعاش درآید صوت‌تولید کند. چگونگی ارتعاش ستون‌هوای درون یک لوله صوتی را می‌توان با یک آزمایش ساده که در شکل ع ـ ۲۲ نشان داده شده است مجسم کرد:

یک‌دیاپازن الکتریکی که درحکم منبع ارتعاش است مقابل دهانه باز لوله بلندی که محتوی آب است نگاه داشته شده‌است وارتفاع آب درون لوله قابل تنظیم است. امواج صوتی حاصل ازدیاپازن در ستون هوای‌درون لوله به‌طرف پایین حرکت‌می‌کنند وپس از برخورد به‌سطح آب‌که درحکم مانع سخت است به‌سمت‌بالا برمی‌گردند وباامواج تابش‌ترکیب می‌شوند. اگر سطح آب‌درون لوله بالا وپایین برده شود تاارتفاع ستون هوا مناسب برای‌تشدید صوت دیاپازن گردد امواج‌ایستاده به‌وجود می‌آیدوصدای دیاپازن‌تشدید می‌شود.



شکل ع ـ ۲۲ ـ امواج صوتی حاصل از دیاپازن در صورتی که طول لوله مناسب باشد سبب تشکیل امواج ایستاده درهوای‌داخل ستون می‌شوند

نخستین تشدید هنگامی صورت می‌گیرد که سطح آب در N_1 باشد و دراین حالت فاصله‌این‌سطح از دهانه لوله (به‌عبارت دیگر طول قسمتی از لوله که درآن صوت دیاپازن تشدید می‌شود) کوتاهترین مقدار ممکن است. دومین تشدید در N_2 اتفاق می‌افتدکه‌فاصله آن ازلبه لوله۳برابر حالت‌نخستین است وسومین تشدید در N_3 حاصل می‌شودکه‌فاصله آن ازلبه لوله ۵ برابر حالت اول است‌الی آخر.

علت فردبودن ضریب فاصله‌ها این است که

همواره یک گره درانتهای بسته لوله (دراین‌جاسطح آب) ویک شکم دردهانه بازلوله تشکیل می‌شود.

امواج ایستاده درهوا دارای ماهیت طولی هستند ولی در این شکل و شکلهای بعد، برای آسانی کار به‌طور عرضی نمایش داده شده‌اند.

دراین آزمایش اگر تواتر دیاپازن معین باشد می‌توان سرعت انتشار صوت درهوای درون لوله‌را حساب کرد، زیرا فاصله بین هر دوگره متوالی $\frac{\lambda}{2}$ وفاصله هرگره وشکم‌متوالی $\frac{\lambda}{4}$ است، مثلاً، در یک آزمایش واقعی که دمای محیط ۲۷ درجه سلسیوس و فرکانس دیاپازن ۵۱۲ هرتز است فاصله دوگره متوالی یعنی $\frac{\lambda}{2}$ برابر ۰/۳۴۰ متر است، باقرار دادن این مقادیر در رابطه $V=f\lambda$ سرعت V حساب می‌شود:

$$V=۵۱۲\times۲\times۰/۳۴۰=۳۴۸/۲\frac{m}{s}$$

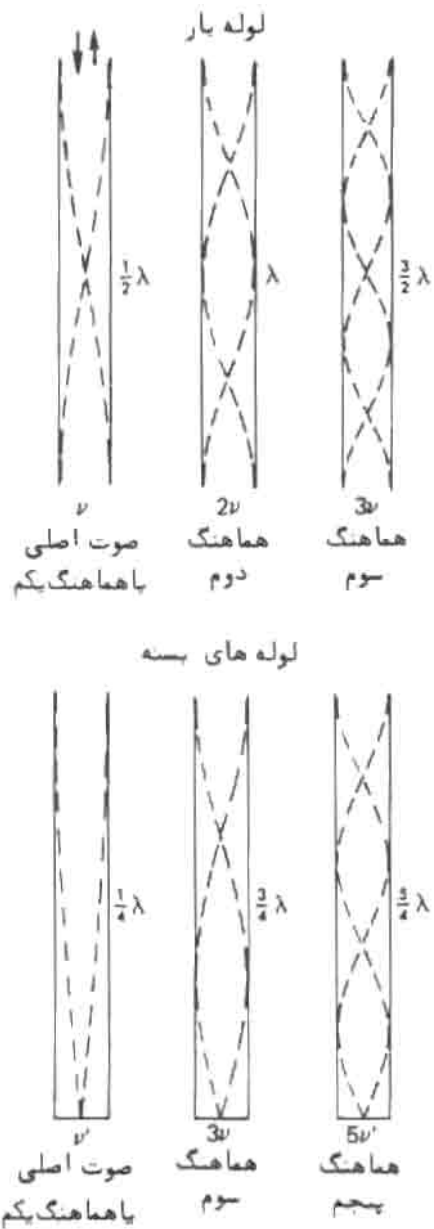
وضع ارتعاشی هوا درلوله‌های صوتی‌باز وبسته

درشکل ۶ ـ ۲۳ ، چند وضع ارتعاشی هوای‌درون لوله‌های صوتی بازوبسته به‌هنگام تولیدصوت نشان داده شده است.

ستون هوای درون لوله صوتی‌باز ممکن‌است طوری مرتعش شود که:

۱ـ یک گره درمیان لوله و دوشکم در دو سر آن (که هردو باز هستند و با هوای خارج ارتباط دارند) تشکیل گردد. دراین حالت لوله صوت‌اصلی یعنی بمترین صوت خودرا تولید می‌کند و طول آن برابر نصف طول‌موج است.

۲ـ دوگره وسه شکم‌درآن به‌وجود آید. در این حالت لوله هماهنگ دوم صوت اصلی را ایجاد می‌کند وطول آن برابر دو تا نصف طول موج یا برابر یک طول موج است.



شکل ۶ ـ ۲۳ ـ ستون هوای درون لوله‌های صوتی باز و بسته با تواتر معینی می‌تواند مرتعش شود

۳ـ سه گره وچهار

دراین حالت لوله هماهنگ سوم صوت اصلی خودرا تولید می‌کند وطول آن برابر سه‌تا نصف طول‌موج است وجز اینها...

به‌همین ترتیب ستون هوای درون یک لوله صوتی بسته ممکن است طوری مرتعش شود که:

۱ـ یک‌گره در انتهای بسته و یکم شکم در سرباز لوله تشکیل گردد. دراین حالت لوله صوت اصلی یعنی بهترین‌صوت خودرا تولید می‌کندوطول آن برابر ربع طول موج است.

۲ـ دوگره و دوشکم درآن به‌وجود آید. دراین صورت طول لوله $۳\frac{\lambda}{۴}$ است وهماهنگ سوم صوت اصلی لوله تولید می‌شود.

۳ـ سه‌گره وسه شکم درآن تشکیل شود. در این حالت طول لوله برابر $۵\frac{\lambda}{۴}$ است وهماهنگ‌پنجم صوت اصلی را تولید می‌کند وجز اینها...

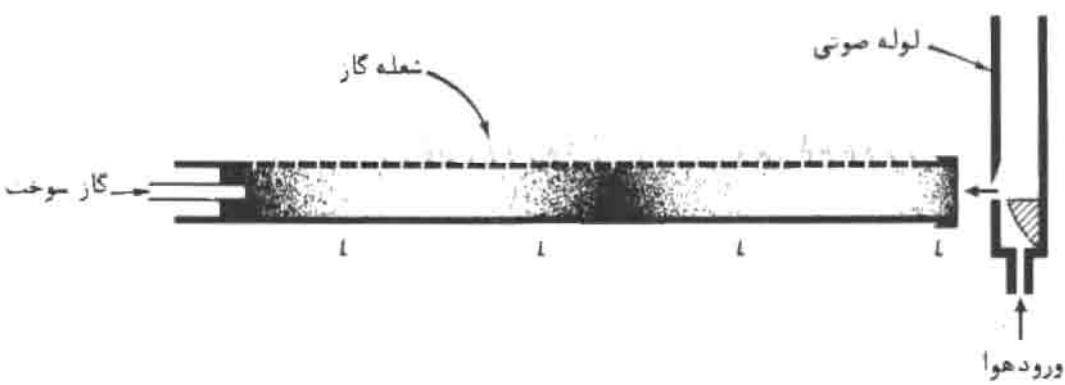
باید درنظر داشت که درتمام لوله‌های صوتی به‌هنگام تولید صدا، همیشه یک شکم درانتهای باز لوله‌ویک گره درانتهای‌بسته لوله تشکیل‌می‌شود.

توجه به‌این نکته مهم است‌که فرکانسهایی‌که شوند دارای اندازه‌های ثابت ومشخصی‌هستندکه فقط بستگی به‌طول‌لوله وسرعت انتشارصوت درهوای‌درون آن دارند. مثلا اگرطول لوله‌ها درشکل ۶ ـ ۲۳ برابر ۶۰ سانتیمتر و سرعت انتشار صوت در هوای درون‌لوله۳۴۸متر برثانیه‌باشد،لوله‌هادرحالتهائی‌که درشکل نشان داده شده است فقط با تواترهای زیر می‌توانند مرتعش شوند:

لوله باز	f	۲f	۳f
	۲۹۰ هرتز	۵۸۰	۸۷۰
لوله بسته	f	۳f	۵f
	۱۴۵ هرتز	۴۳۵	۷۲۵

لوله‌های صوتی بسته فقط هماهنگهای فرد صوت‌اصلی‌لوله‌رامی‌توانندتولیدکنند در صورتی که لوله‌های صوتی بازهمه هماهنگهای صوت اصلی‌اعم ازفرد یازوج را تولید می‌نمایند.

تشکیل امواج ساکن دریک ستون هوا یا گاز مرتعش‌را به هنگام تشدید می‌توان با لوله دراز و سوراخ‌داری که محتوی گاز سوخت است مطابق شکل ۶ ـ۲۴ به‌خوبی نشان داد.



شکل ۶ـ۲۴ـ تشکیل امواج ساکن درلولهٔ محتوی‌گاز سوخت

در سراسر این لوله سوراخهای ریزی به فاصله‌های مساوی وجود دارد و گازی که از آنها خارج می‌شود باشعله باریک می‌سوزد. یک سر لوله باورقه کاغذ نازکی مسدود است که به وسیله منبع تولید صوت (مثلاً یک لوله صوتی) مرتعش می‌شود و در سر دیگر آن یک پیستون قرار دارد که لوله متصل به منبع گاز سوخت از وسط آن می‌گذرد. وقتی که لوله صوتی به صدا درمی‌آید و با جلو و عقب بردن پیستون در گاز درون لوله حالت تشدید پیدا می‌شود وضع شعله‌ها از حالت یکنواختی اولیه خارج شده به صورتی که در شکل دیده می‌شود درمی‌آید و مکان گره‌ها و شکم‌ها را نشان می‌دهد. (در مکان گره‌ها طول شعله‌ها بلندتر است).

وضع تشکیل امواج ساکن در لولهٔ محتوی گاز را می‌توان با روش Kundt[1] نیز بررسی کرد به‌این ترتیب که لولهٔ شیشه‌ای بلندی به طول تقریبی یک متر را افقی روی پایه‌هائی قرار داد و سرتاسر درون آن گرد سبکی مانند گرد چوب‌پنبه ریخت، سپس یک دهانه لوله را با پیستونی مسدود کرد و مقابل دهانه دیگر، منبع تولید صوت را قرار داد و پیستون را آنقدر جلو و عقب برد تا هوای درون لوله حالت تشدید پیدا کند. در این حالت ذرات چوب‌پنبه در نقاط تشکیل شکمها به شدت مرتعش می‌شوند و در گره‌ها ساکن می‌مانند. بدیهی است در هر دو روش نامبرده، اگر تواتر منبع ارتعاش مشخص باشد با اندازه‌گیری طول موج (که دوبرابر فاصله هر دو گره متوالی است) سرعت صوت در گاز داخل لوله حساب می‌شود.

فرمول وقوانین لوله‌های صوتی - ارتعاش هوای درون سازهای بادی که در موسیقی به‌کار می‌روند مانند آنچه در شکل ۶-۲۳ دیده می‌شود یکنواخت ومنظم نیست وبه‌همین دلیل فواصل گره‌های متوالی ازیک دیگر مساوی نبوده واصوات فرعی نیزدرست هماهنگ واقعی صوت اصلی نیستند.

بنابراین فرمول لوله‌های صوتی و بیان قوانین آنهارا محدود به‌حالت ساده‌ای می‌کنیم که:

لوله مستقیم است.

مقطع آن ثابت ویکنواخت است.

قطر مقطع نسبت به‌طول لوله کوچک است.

دهانه آن لبه‌دار و به‌اصطلاح از نوع دهانه فلوتی است.

دراین نوع لوله‌های صوتی که لوله‌های ارگ نمونه‌های مشخص آنها هستند، جریان هوایی که درلوله دمیده می‌شود به‌وسیله لبهٔ تیغه تیزی که در شکل ۶-۲۵ مشاهده می‌گردد بریده شده و متناوباً به داخل و خارج لوله رانده می‌شود و جریان گرد بادی کوچکی درداخل وخارج لوله به‌وجودمی‌آورد. این جریان گردبادی متناوب سبب می‌شود که هوای داخل لوله به‌ارتعاش درآید وهمان‌طور که بیان کردیم امواج ساکن تشکیل شود ولوله صدا تولید کند.

وضع ارتعاشی منظم در هوای درون لوله باز و بسته (در شکل ۶-۲۳) نشان می‌دهد که در حالت کلی، طول لوله باز مضرب صحیحی از نصف طول موج[2]، وطول لوله بسته مضرب فردی از ربع طول موج است.

۱- فیزیک‌دان آلمانی (۱۸۹۴-۱۸۳۹) که درنور وصوت مطالعاتی دارد.

۲- می‌توان گفت که طول لولهٔ باز مضرب زوجی از ربع طول موج است.

شکل ۶-۲۵ - جریان‌هوا روی‌لبهٔ تیز لبهٔ بریده شده وجریانهای گرد بادی کوچکی در داخل وخارج لوله به‌وجود می‌آورد.

بنابراین :

در لوله‌های باز داریم:

$$l = K\frac{\lambda}{2}$$

اگر f_k تواتر هماهنگ Kام لوله باشد چون $\lambda = \frac{V}{f_k}$ است خواهیم داشت:

$$l = K\frac{V}{2f_k}$$

$$\boxed{f_k = K\frac{V}{2l}} \qquad (۶-۱۴)$$

فرمول کلی لوله‌های صوتی باز

$$\boxed{f = \frac{V}{2l}} \qquad (۶-۱۵)$$

بدیهی است به‌ازاء $K = 2$ ، $f_2 = 2f$ و به ازاء $K = 3$ ، $f_3 = 3f$ است و ...

در لوله‌های بسته داریم:

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

($2K-1$ نمایش عدد فرد است). بنابراین فرمول کلی لوله‌های صوتی بسته بصورت:

$$\boxed{f_k = (2K-1)\frac{V}{4l}} \qquad (۶-۱۶)$$

است.

برای صوت اصلی داریم: $K = 1$ و

$$\boxed{f = \frac{V}{4l}} \qquad (۶-۱۷)$$

به ازاء $K = 2$ داریم $f_2 = 3f$ و به ازاء $K = 3$ داریم $f_3 = 5f$ و ...

روابط (۶-۱۵) و (۶-۱۷) نشان‌می‌دهند که‌درشرایط‌یکسان‌تواترصوت‌اصلی لوله صوتی‌بسته نصف تواتر لوله صوتی بازهم طول است.

قوانین لوله‌های صوتی را با توجه به روابط (۶-۱۴) و (۶-۱۶) می‌توان به‌صورت زیربیان کرد:

قانون طولها ـ ارتفاع صوت اصلی حاصل از یك لوله صوتی، اعم ازلوله بازیابسته، باطول لوله‌نسبت عکس دارد.

بدیهی است هر چه طول لوله کوتاهتر باشد تواتر صوت حاصل از آن بیشتر و صدای آن زیرتر است، به‌طوری‌که اگر طول لوله نصف شود تواتر صوت آن دوبرابر می‌گردد.[1]

قانون سرعتها ـ تواتر صوت اصلی لوله‌های صوتی باسرعت صوت درگاز داخل لوله متناسب است.

چون سرعت صوت تابع جنس گاز درون لوله ودمای آن است این عوامل درتواتر صوت‌لوله نیز مؤثرند. مثلا اگر جدار یك‌لوله صوتی فلزی راگرم کنیم ارتفاع صوت‌حاصل ازآن افزایش می‌یابد زیرا سرعت انتشار صوت درهوای گرم‌شده درون لوله افزایش می‌یابد.

قانون هماهنگهاـ لوله‌های صوتی باز تمام هماهنگهای صوت اصلی (چه فرد و چه زوج) را می‌توانند تولیدکنند درصورتی‌که لوله‌های صوتی بسته فقط می‌توانند هماهنگ‌های فردرا تولیدکنند.

یادآوری ـ جنس لوله وشکل مقطع آن، در صورتی‌که لوله محدود به‌حالت ساده‌ای که شرایط آن بیان شده‌باشد تأثیری درارتفاع صوت حاصل از آن ندارد.

خودتان آزمایش کنید

۱ـ دستگاهی‌مطابق‌شکل ۶ ـ ۲۲درآزمایشگاه‌تهیه کنید ومنبع صوتی که‌تواتر آن معلوم‌است (مثلا یك‌دیاپازن الکتریکی) مقابل دهانه آن نگاهدارید وسطح آب‌را درلوله کاملا بالابیاورید تانزدیك دهانه لوله قرارگیرد سپس به‌ملایمت سطح آب‌را پایین ببرید واولین وضع تشدید رابه دقت پیداکنید سپس سطح آب‌را پایین ببرید تادومین وسومین وضع تشدید پیداشود. در هروضع طول‌موج‌را اندازه بگیرید وبا دانستن تواتر منبع صوتی (f) سرعت صوت درهوای داخل لوله را ازرابطهٔ $V = f\lambda$ حساب کنید ومیانگین نتایج اندازه‌گیری را به‌دست آورید.

۲ـ اگر درآزمایشگاه صوت‌سنج دراختیار دارید قوانین تارهای مرتعش‌را بررسی کنید.

۱ـ درواقع نتیجه‌ای‌که ازآزمایش به‌دست می‌آیددرصورتی باتئوری تطبیق می‌کندکه درطول لوله‌صوتی تصحیحی به‌عمل آید زیرا درانتهای بازلوله، شکم‌اندکی خارج ازلوله تشکیل می‌شود وطول مؤثر لوله اندکی بزرگتر از l است وباید فرمول‌های بالا تصحیح شوند. محاسبه نشان می‌دهدکه میزان تصحیح برای لوله بسته ۰/۳ D (D قطر داخلی لوله است)و برای لولهٔ هر دو طرف باز ۰/۶ D است. بنابراین در لوله بسته

$$f = \frac{V}{4(l + 0/3D)}$$ ودر لوله بسته $$f = \frac{V}{2(l + 0/6D)}$$

۱) صدای یك دیاپازن درنتیجه کدام یك ازعوامل زیرتولید می‌شود؟

۱ـ ایجاد امواج ایستاده در دیاپازن

۲ـ حرکت ارتعاشی ملکولهای دیاپازن

۳ـ انتشار امواج طولی در دیاپازن

۲) ماده‌ای را نام ببرید که صوت درآن خوب منتشر نمی‌شود.

۳) ازعوامل زیرکدامشان درسرعت صوت مؤثرند؟

شکل امواج صوتی ـ دامنه امواج صوتی ـ تواتر صوت ـ بخار آب موجود در هوا ـ وزش باد

۴) اثر دما وفشار را برسرعت صوت درگازها شرح دهید.

۵) افزایش کدام یك ازعوامل زیرسبب کاهش سرعت صوت دریك گاز می‌شود؟

فشارگاز جرم حجمی گاز تواتر ارتعاشات صوت

۶ـ برای اندازه‌گیری سرعت صوت درآب دریا، چه‌طرحی را پیشنهاد می‌کنید؟

۷) چگونه می‌توانید نشان‌دهیدکه سرعت صوت دریك جامد، (مثلاآهن) بیشتر ازسرعت صوت درهوا است؟

۸) چه‌شرطی باید باشد تابتوان پژواك یك‌صدا را ازصدای اصلی تشخیص داد؟

۹) شعاع موج چیست؟

۱۰) پنج رفتار موجی راکه می‌توان به‌وسیله امواج صوتی نشان‌داد نام ببرید.

۱۱) فرق بین انعکاس موج ازروی یك‌مانع سختتر ازمحیط انتشارموج وانعکاس از روی مانع نرمتر ازمحیط انتشار موج چیست؟

۱۲) اگرسرعت امواج تناوبی به‌هنگام واردشدن دریك محیط‌کم شود، تواتر وطول موج و راستای انتشار آنها چگونه تغییر می‌کند؟

۱۳) بلندی صوت‌به‌چه عواملی بستگی دارد؟شرح دهید. چه‌فرقی بین‌بلندی وشدت‌صوت موجود است وچه وجه اشتراکی دارند وبا چه واحدهایی اندازه‌گرفته می‌شوند

۱۴) مشخصات ویژه اصوات موسیقی کدامند به‌اختصار شرح دهید.

۱۵) آستانه شنوایی یعنی‌چه؟ آیا استانه شنوایی همهٔ مردم یکی است؟

۱۶) گوش انسان درحالت طبیعی برای احساس چه‌اصواتی احتیاج به‌شدت کمتری دارد؟

۱۷) گاهی دربعضی از فیلمها نشان می‌دهندکه شخص دهان خودرا مقابل یك‌بطری یایك لیوان شیشه‌ای خالی‌قرار می‌دهد وآواز می‌خواند ودراثر پدیدهٔ رزونانس ،هوای درون آنهابه

ارتعاش درمی‌آید و
است! به‌نظر شما آیا چنین کیفیتی می‌تواند واقعیت داشته‌باشد؟ توضیح دهید .

این مسئله‌ها را حل کنید

درحل این مسئله‌ها هرجا لازم باشد سرعت صوت در هوای صفردرجه سلسیوس را ۳۳۱ متر بر ثانیه بگیرید .

۱) سرعت صوت درمحلی ازقطب شمال راکه دمای هوا $-50^{\circ}C$ است حساب‌کنید.

جواب: تقریباً ۳۰۰ متر برثانیه

۲) صوتی درآب تولید می‌شود وطول موج آن درآب 5m است. اگر سرعت انتشار صوت درآب $1420\frac{m}{s}$ و در هوا $340\frac{m}{s}$ باشدتواتراین‌صوت وطول‌موج آن درهوا چیست ؟

جواب: ۲۸۴ هرتز وتقریباً ۱/۱۹متر

۳) صدای رعدشش ثانیه پس‌از جهش برق در ابر، به‌گوش ناظری در سطح زمین رسیده است. اگر دمای‌هوا $27/5^{\circ}C$ باشد جهش برق درابر،درچه فاصله‌ای ازناظر صورت گرفته‌است.

جواب: تقریباً ۲۰۸۷متر

۴) جرم ملکولی یك گاز دواتمی راکه سرعت صوت درآن‌در دمای $0^{\circ}C$ برابر ۱۲۶۰متر برثانیه‌است حساب‌کنید.

جواب ۲ $\frac{\text{گرم}}{\text{مول}}$

۵) سیرنی ۲۷ سوراخ دارد ودرحالی‌که باسرعت ۵ دور درثانیه می‌چرخد صوتی راایجاد می‌کند. سیرن دیگری‌که ۳۰ سوراخ دارد چنددور درثانیه باید به‌چرخد تا ارتفاع صوت حاصل ازآن دوبرابر ارتفاع صوت سیرن اولی بشود ؟

جواب: ۹ $\frac{\text{دور}}{\text{ثانیه}}$

۶) شدت صدای یك هواپیمای جت ۱۲/۶ $\frac{\text{میکروووات}}{\text{مترمربع}}$ وشدت صدای یك هواپیمای دیگر که در فاصله دورتری پرواز می‌کند ۰/۴۵ $\frac{\text{میکروووات}}{\text{مترمربع}}$ است. بلندی نسبی صداهای دو هواپیما را حساب‌کنید. (بامراجعه به‌جدول لگاریتم جواب را معین کنید)

جواب: ۱۴/۴۷db

۷) طول یک‌سیم پیانویی در قسمتی‌که مرتعش می‌شود ۸۰ سانتیمتر است اگر این سیم با نیروی ۲۰۰۰ نیوتن‌کشیده شود تواتر صوت حاصل ازآن ۱۵۰ هرتز می‌شود. جرم این‌سیم را حساب‌کنید.

جواب: تقریباً ۲۷/۸ گرم

۸) طول یکی‌ازسیمهای یک‌ساز موسیقی (چنگ) ۵۲/۰ سانتیمتر است و روی‌تواتر۶۶۰ هرتز کوک‌شده‌است. طول‌موج هماهنگ پنجم این‌نت‌را درسیم‌ودرهوا حساب‌کنید.سرعت صوت‌را درهوا $۳۵۰\frac{m}{s}$ بگیرید.

جواب: ۲۰/۸ cm و ۱۰/۶ cm

۹) یک‌سیم‌فولادی به‌طول ۲/۴۰متر وبه‌جرم ۸۰/۰ گرم بانیروی ۱۶۰۰N کشیده شده است. تواتر هماهنگ پنجم آن‌را حساب‌کنید وشکل تار را درحالتی‌که هماهنگ پنجم را تولید می‌کندرسم‌کنید .

۱۰) طول‌یکی ازلوله‌های صوتی ارگی ۳/۵۰متر است (لوله‌باز)، تواترهماهنگ پنجم این‌لوله راپیداکنید ووضع ارتعاشی لوله‌را بارسم شکل نشان دهید . سرعت صوت را در هوای داخل لوله $۳۵۰\frac{m}{s}$بگیرید .

جواب: ۲۵۰ Hz

۱۱)کوتاهترین طول لوله صوتی بسته‌ای راپیداکنیدکه بتواند ارتعاشات یک‌دیاپازن‌به تواتر ۴۴۰ هرتز را تشدیدکند. سرعت صوت در هوای داخل‌لوله $۳۵۰\frac{m}{s}$ است.

۱۲) یک‌لوله ارگ (لوله باز) طوری ساخته شده است‌که تواتر صوت حاصل از آن در دمای $۲۷^{\circ}C$ برابر ۴۴۰ هرتز است. اگردمای محیط به‌صفردرجه تنزل‌کند چه‌تغییری درتواتر صوت آن حاصل می‌شود .

جواب: ۲۱ هرتزکم می‌شود

۱۳) یک‌لوله صوتی‌باز به‌طول ۹۰/۰ سانتیمتر درشرایط استاندارد (صفر درجه سلسیوس وفشاریک آتمسفر)ازگاز CO_2 پرشده‌است.

الف- سرعت صوت دراین‌گاز را حساب‌کنید .

ب- تواتر صوت اصلی لوله را پیداکنید.

۱۴) دریک لوله صوتی‌باز به‌هنگام تولید صوت دوگره به‌فاصله ۵۰ سانتیمتر از یکدیگر تشکیل شده است. اگر سرعت صوت در هوای درون لوله ۳۴۰ متر برثانیه باشد طول لوله و

جواب : ۱m و ۱۷۰ Hz

پاسخ به‌پرسشهای متن بخش ۶

۶ـ۱) با قراردادن یك زنگ‌الکتریکی در حال کار زیر یك‌سرپوش دستگاه تخلیه‌هوا و خالی‌کردن هوای زیر سرپوش، وقتی‌که هوا کاملاً خالی شود صدای زنگ شنیده نمی‌شود.

۶ـ۲) انتقال صوت از دیوار، شیشه ولوله‌های‌آب وشوفاژ درخانه‌ها. شناگری‌که زیر آب است صدای ضربه روی سطح آب را می‌شنود.

۶ـ۳) زیرا این امواج طولی هستند وامواج طولی نمی‌توانند پلاریزه شوند.

۶ـ۴) به‌طوری‌که درکتاب فیزیك سال دوم دیده‌اید گاز کامل گازی است‌که تغییرات حجم و فشارش با دمای مطلق گاز تابع قانون عمومی گازها (یعنی $\frac{PV}{T}=Cte$) باشد.

۶ـ۵) مقدار ثابت گازهای کامل (یعنی $R=\frac{PV_m}{T}=\frac{P_0V_{0m}}{T_0}$) بستگی به‌جرم‌ملکول گرم‌گاز ندارد و حجم ملکول‌گرم‌کلیه‌گازها درشرایط ثابت همواره یکی است R نیز برای‌کلیه گازهای‌کامل یکی است.

۶ـ۶) به‌ازاء $P_0=1/013\times10^5\frac{N}{m^2}$ و $V_0=22/4lit=0/0224m^3$ و $T_0=273^\circ K$ داریم:

$$R=\frac{P_0V_0}{T_0}=\frac{1/013\times10^5\times0/0224}{273}=8/314\frac{J}{^\circ K.mol}$$

۶ـ۷) علت، چنان‌که می‌دانیم، این است‌که وقتی فشار گاز در دمای ثابت به میزان معینی افزایش می‌یابد جرم حجمی گاز نیز متناسب بافشار افزایش می‌یابد و نسبت $\frac{P}{\rho}$ تغییرنمی‌کند.

۶ـ۸) نه. زیرا سرعت بستگی به‌جرم واحد طول طناب داردکه در دو قسمت طناب یکی نیست.

۶ـ۹) ۳۰ دسی‌بل، زیرا $b=10\log_{10}\frac{10^{-3}}{10^{-6}}=10\log10^3=10\times3=30$

۶ـ۱۰) بلی. این کار را به‌وسیله بلندگو می‌توان انجام داد. به‌این‌ترتیب‌که هم‌زمان

با تولید صوت مجهول، سیرنی را (که دور سیمی روی محور آن نصب است) به‌صدادرمی آورند و تعداد دورهای آن را آن‌قدر تغییر می‌دهند تا صوت حاصل از آن با صوت مجهول یکسان شنیده شود. در این حالت ارتفاع دو صوت برابر است و از رابطه $f = np$ مشخص می‌شود. (n عده دورهای فرمان سیرن درثانیه است که دورشمار نشان‌می‌دهد و p عده سوراخهای روی صفحه سیرن است) این کار را می‌توان مستقیماً به‌وسیله دستگاه نوسان‌ساز الکترونیکی انجام داد، به‌این ترتیب که صوت حاصل‌از دستگاه نوسان ساز را طوری تنظیم می‌کنندکه با صوت مجهول هم‌صدا شود سپس روی دستگاه مستقیماً ارتفاع صوت را می‌خوانند.

۶-۱۱) ارتفاع صوت حاصل‌از هرردیف تغییرمی‌کند ولی نسبت ارتفاع صوتهای حاصل از هردو ردیف متوالی (یعنی فاصله موسیقی آنها) ثابت می‌ماند.

۶-۱۲) بلی. هرشخص به‌سبب ساختمان حنجره و اندازه حجم حلق و دهان ویژه خود (که در حکم مشدد است) صدای خاصی داردکه با آن صدا شناخته می‌شود.

۶-۱۳) نه. این‌حسم نمی‌تواند نوسان منظمی داشته باشد. زیرا ضربه بعدی اثر ضربه قبلی را خنثی می‌کند.

۶-۱۴) از خود دیاپازن. به‌همین جهت دامنه ارتعاشات دیاپازن سریعتر از حالتی‌که روی جعبه تشدید نیست مستهلك می‌شود.

۶-۱۵) علت، خاصیت تشدید است. زیرا سیمهای پیانوکه آن نت یا هماهنگهای آن را تولید می‌کنند به‌ارتعاش درمی‌آیند.

۷

میدانهای الکتریکی، پتانسیل و ظرفیت الکتریکی

در کتاب فیزیک سال سوم، ضمن مطالعه بخش الکتریسیته ساکن، دیدید اجسامی که بار الکتریکی دارند بریکدیگر نیرو وارد می‌سازند، همان‌طورکه نیروی جاذبه نیوتنی موجود بین اجسام یک نیروی بنیادی است که ازجرم مایه می‌گیرد، نیروی الکتریکی هم از «بار الکتریکی» که مانند جرم یک‌خاصیت بنیادی ماده است سرچشمه می‌گیرد. می‌دانیم نیروی الکتریکی که دو جسم باردار برهم وارد می‌سازند ممکن است جاذبه یا دافعه باشد: اجسامی که دارای بار الکتریکی هم‌نوع هستند یکدیگر را می‌رانند و اجسامی که دارای بار الکتریکی ازنوع مخالف هستند یکدیگر را می‌ربایند.

اجسام باردار، چه درحال حرکت باشند و چه در حال سکون، همواره برهم نیرو وارد می‌سازند ولی معمولاً هنگامی که اجسام باردار درحال سکون هستند این نیروها مورد مطالعه قرار می‌گیرند به‌همین‌جهت آنها را نیروهای جاذبه یا دافعه الکتروستاتیکی نامیده‌اند و چون نخستین‌بار اندازه این نیروها توسط کولن مشخص گردیده است آنهارا نیروهای‌کولنی نیز نامیده‌اند.

اجسام باردار، اگر هم از یکدیگر فاصله داشته باشند برهم نیروی جاذبه یادافعه الکتریکی وارد می‌سازند، بنابراین فرض براین است که اطراف بار الکتریکی «میدان الکتریکی» وجود دارد. این میدان باچشم دیده نمی‌شود ولی واقعیت دارد. در این بخش نخست به‌اختصار نیروی جاذبه یا دافعه‌کولنی و میدان الکتریکی را یادآور می‌شویم سپس، پتانسیل الکتریکی وخازنهای‌الکتریکی وظرفیت‌آنها را موردبحث قرار می‌دهیم.

نیرو ومیدان الکتریکی - نیروی جاذبه یا دافعه الکتریکی میان اجسام باردار بستگی به اندازه بارهای الکتریکی موجود درآنها وفاصله اجسام ازیکدیگر دارد ودر صورتی که این اجسام بزرگ وبه‌هم‌نزدیک باشند، شکل وابعاد آنها ،هم چنین چگونگی توزیع بارالکتریکی درآنها نیزدر اندازه نیرو مؤثر است . علاوه براین جنس محیطی که اجسام درآن قراردارند ویا ماده‌ای که بین دو جسم قرار می‌گیرد در اندازه نیرونقش مؤثری دارد .

اگر ابعاد دوجسم باردار خیلی کوچك باشند به طوری که بتوان آنها را در حکم «نقطه باردار» دانست و یا این که دو جسم باردار دوکره باشندکه بار الکتریکی به طور یکنواخت روی آنها پخش شده‌باشد نیروی بین‌بارها طبق قانون کولن ،(که با آن‌آشنائی دارید) از رابطهٔ زیر حساب می‌شود:[1]

$$F=K\frac{qq'}{r^2} \qquad (۱-۷)$$

که درآن q و q' بارهای الکتریکی روی‌دو جسم و r فاصله میان آنهاست . (در صورتی که دو جسم‌کروی باشند r فاصله بین‌دومرکز آنهاست.)

K ضریبی است که بستگی به‌واحدهای انتخاب شده و جنس محیطی داردکه دوجسم باردار درآن قرار گرفته‌اند. اگر اندازه‌گیری نیرو در خلأ صورت گیرد اندازه K در دستگاه بین‌المللی واحدها (که درآن F برحسب نیوتن، q برحسب کولن و r برحسب متراست)، تقریباً برابر است با :

$$K\simeq ۹/۰\times ۱۰^{۹}\frac{N.m^2}{C^2} \qquad (۲-۷)$$

پرسش ۷-۱- بنابه قانون‌عمل وعکس‌العمل نیروهایی که دو جسم باردار بریك دیگر وارد می‌سازند، چه‌جاذبه وچه دافعه همواره برابر و در خلاف جهت یکدیگرند. آیابرابربودن اندازه‌این‌دو نیرو مستلزم برابر بودن بارهای الکتریکی دوجسم است ؟

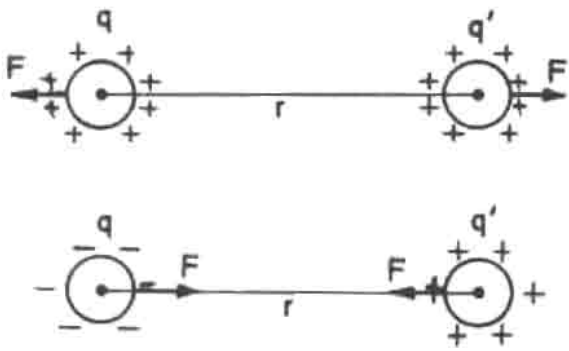
اندازه‌گیری نیرو معمولادرهوا صورت‌میگیرد ومی‌توان برای K درهوا نیزهمین مقدار رادر نظر گرفت . چنین متداول است که K را به صورت $\frac{۱}{۴\pi\varepsilon_۰}$ نمایش می‌دهند. $\varepsilon_۰$ مقدار ثابت دیگری‌است که «قابلیت گذردهی»[2] فضای آزاد یا خلأ نامیده می‌شود واندازه آن به آسانی از رابطه $K=\frac{۱}{۴\pi\varepsilon_۰}$ بدست‌میآید.

$$\varepsilon_۰\approx ۸/۸۵\times ۱۰^{-۱۲}\frac{C}{N.m^2} \qquad (۳-۷)$$

ازرابطه (۷-۱) فقط اندازه نیروی کولنی به‌دست‌می‌آید. راستای‌این نیروهمواره درامتدادخطی است که‌دوجسم رابه‌هم‌وصل میکند(اگردوجسم کروی باشند درامتداد خطی‌است که دومرکز آنها را به هم وصل می‌نماید) و جهت آن بستگی به نوع بارهای الکتریکی دو جسم دارد و چنان که گفتیم بارهای هم‌نوع یکدیگررادفع وبارهای‌غیرهم نوع یکدیگر

۱- به‌کتاب فیزیك سال سوم بخش الکتریسیتهٔ ساکن مراجعه‌کنید.

۲- Permitivity



شکل۷-۱- بارهای هم‌نوع یکدیگر رادفع وبارهای غیر هم نوع یکدیگر را جذب می‌کنند.

راجذب می‌کنند (شکل ۷-۱).

می‌دانیم که دوبارالکتریکی به‌طور مستقیم بر یکدیگر نیرو وارد نمی‌کنند بلکه نیرو توسط میدان الکتریکی بربارها اعمال می‌شود. مثلا نیرویی که بربار q' وارد می‌شود به‌این علت است که‌بار q' در میدان الکتریکی حاصل از بار q قرارگرفته است. همچنین نیرویی که بربار q وارد می‌شود به سبب وجود میدان حاصل ازبار q' است.

پرسش ۷-۲- چگونه می‌توانیم پی‌ببریم که دربك‌مکان میدان الکتریکی وجود دارد؟

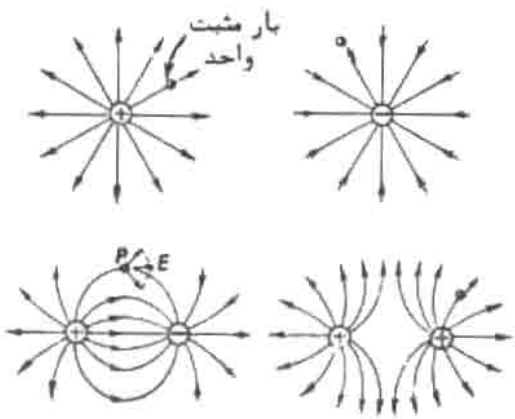
شدت میدان الکتریکی درهر نقطه اطراف یك بار الکتریکی، بنابه‌تعریف عبارت‌است ازنیرویی‌که درآن میدان بر واحدبارالکتریکی مثبت‌واردمی‌شود و آن را به $\vec{E}$ نمایش می‌دهند. بنا به تعریف بالا خواهیم داشت:

$$\vec{E}=\frac{\vec{F}}{+q'}=K\frac{\vec{q}}{r^2} \qquad (۷-۲)$$

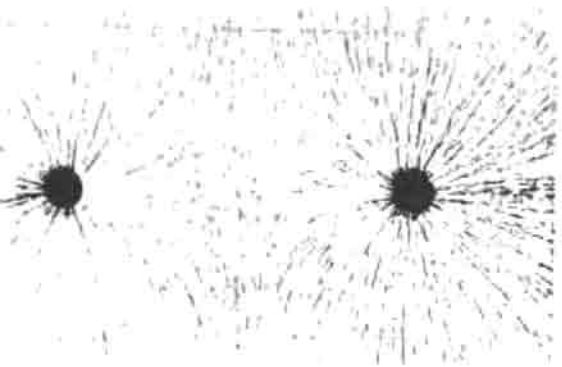
شدت‌میدان‌الکتریکی‌مانند نیروکمیت‌برداری است‌که دارای اندازه وجهت وراستا است. راستای $\vec{E}$ و $\vec{F}$ همواره یکی است ولی نیروی وارد بربار مثبت هم جهت با میدان و جهت نیروی واردبربار منفی درخلاف جهت میدان است.

واحد شدت میدان از رابطه $\vec{E}=\frac{\vec{F}}{+q'}$ تعریف می‌شود ودر دستگاه بین‌المللی واحدهانیوتن برکولن است که‌باعلامت اختصاری $\frac{N}{C}$ نمایش داده می‌شود.

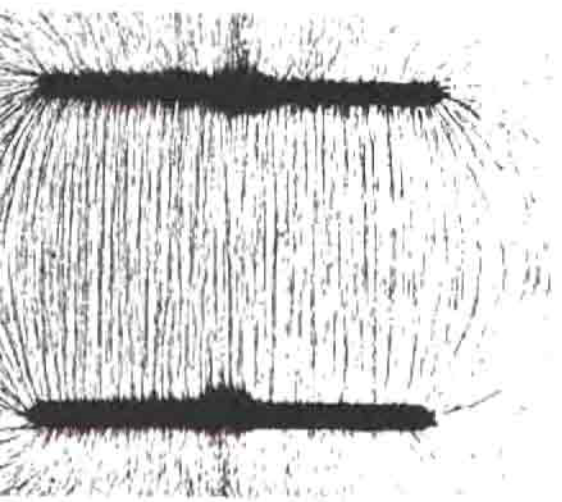
می‌دانیم برای نشان دادن میدان الکتریکی دریك ناحیه ازفضا «خطوط نیرو» به‌کاربرده‌می‌شود خطوط نیرو خطهای مجازی هستندکه درهر نقطه راستای‌مماس برآنهاموازی بامیدان $\vec{E}$ درآن نقطه است. بنابراین اگر نقشه‌ای ازنمایش خطوط میدان دردست باشد می‌توانیم درهرنقطه از میدان امتداد نیروئی راکه بربار آزمون واقع در آن نقطه وارد می‌شود مشخص‌کنیم. نمونه این‌نقشه‌ها را درکتاب فیزیك سال سوم دیده‌اید. نظربه اهمیتی که مفهوم میدان درتوجیه نیروها دارد دراین‌جانیز برای یادآوری نقشه‌ای از خطوط میدان در شکل (۷-۲)



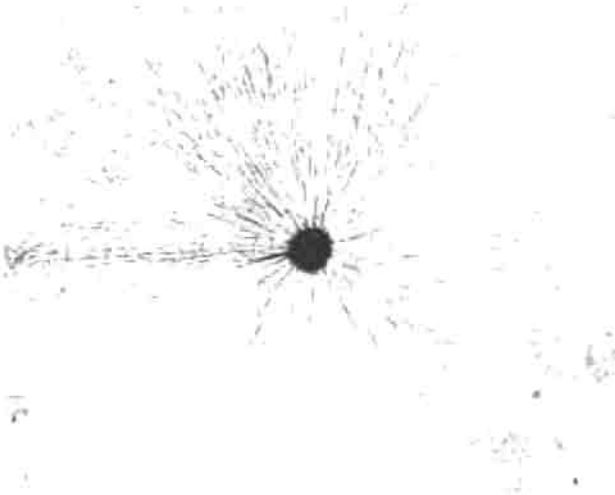
شکل۷-۲- نمودار خطوط میدان در اطراف بارهای الکتریکی



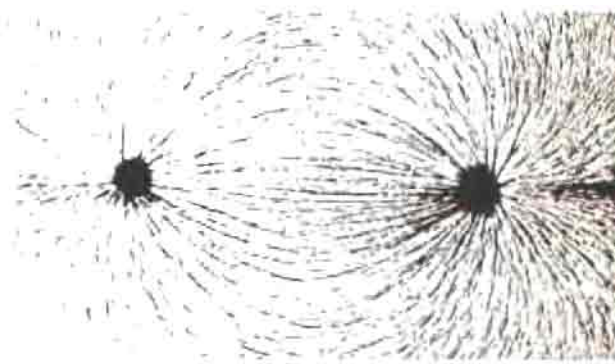
ب ـ میدان الکتریکی حاصل ازدوبار الکتریکی هم نوع



ت ـ میدان یکنواخت
بین دو صفحه موازی که دارای بار الکتریکی مخالف هستند.



الف ـ میدان حاصل ازیک بارالکتریکی منفرد



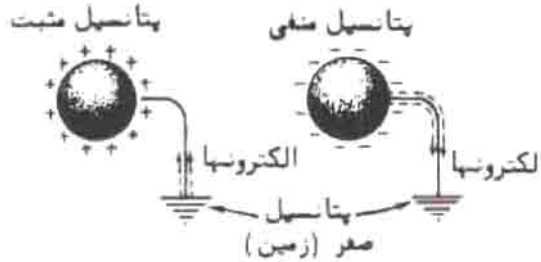
پ ـ میدان الکتریکی حاصل ازدوبار الکتریکی غیرهم‌نوع

شکل ۷ ـ ۳ ـ نمایش واقعی از خطوط میدان الکتریکی

نمایش داده‌شده‌است شکلهای (۷ ـ ۳ ـ الف ـ ب ـ پ ـ ت) نمونه‌های عکس‌برداری شده‌از خطوط میدان‌راکه به‌وسیله‌پاره نخهای کوچک‌وباریك معلق دریك‌روغن تشکیل شده‌اند نشان می‌دهد .

وجود میدان الکتریکی سبب می‌شودکه در دوسر هرپاره نخ دوبارالکتریکی مخالف القاء شود و در نتیجه ، پاره نخها به دنبال یکدیگر در امتداد خطوط میدان قرارگیرند.

پتانسیل الکتریکی یك جسم بار دار ـ میدانیم پتانسیل الکتریکی ، عامل یا شرطی است‌که سبب می‌شود وقتی میان دوجسم باردار ارتباط الکتریکی برقرار می‌شود ،الکتریسیته ازیك جسم به‌جسم‌دیگر برود. پتانسیل‌اجسام باردار راممولا نسبت‌به‌زمین می‌سنجند ودراین سنجش پتانسیل زمین‌رابنابه قرار داد صفر می‌گیرند. هنگامی‌که یك جسم باردار به وسیله یك رشته سیم به زمین متصل می‌شود (شکل



شکل۷-۴ جهت جریان الکترونها ـ موقعی‌که جسمی با بار الکتریکی مثبت یا منفی به‌وسیله‌یک‌سیم به‌زمین متصل‌می‌شود

۷ ـ۴) اگر الکترونها از زمین به‌سوی جسم‌جریان یابند پتانسیل جسم مثبت است برعکس اگر در این ارتباط الکتریکی الکترونها ازجسم به زمین بروند پتانسیل جسم منفی است . بنابراین اجسام باردار پیش از ارتباط الکتریکی با زمین چه‌پتانسیل مثبت داشته باشند چه‌پتانسیل منفی ،پس‌از اتصال به‌زمین پتانسیل آنهاصفر می‌شود.

پرسش ۷ـ۳ـ وقتی که‌دو جسم‌باردار‌بایک‌رشته سیم به‌هم متصل می‌شوند، آیا جهت جریان همیشه از جسمی‌که الکتریسیته بیشتر دارد به‌طرف جسمی است که الکتریسیته کمتر‌دارد؟

اندازه پتانسیل الکتریکی ـ پتانسیل الکتریکی یک جسم‌باردار ،که‌آن را به V نمایش می‌دهیم ، بنا به تعریف عبارت‌است از کاری‌که بایدانجام‌گیردتاواحد بارالکتریکی مثبت اززمین به‌جسم‌انتقال یابدوواحد آن‌چنان‌که می‌دانید ولت است. بنابراین اگر برای انتقال بار مثبت q کار W لازم باشد پتانسیل جسم ازرابطهٔ زیر حساب می‌شود :

$$V(\text{ولت}) = \frac{W\ (\text{ژول})}{q\ (\text{کولن})} \qquad (۵-۷)$$

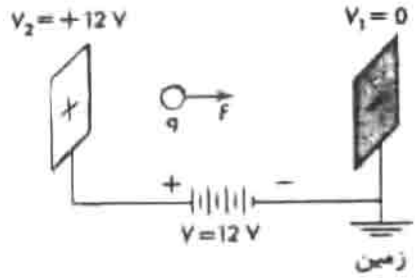
پرسش ۷ـ۴ ـ بنابه‌اصل بقاء انرژی، کاری که‌برای انتقال بار q انجام می‌گیرد چه‌می‌شود؟

اختلاف پتانسیل بین دوجسم باردار ـ اختلاف پتانسیل بین‌دوجسم‌باردارکه پتانسیل‌آنها V_1 و V_2 است بنابه تعریف عبارت‌است‌از انرژی که‌بایدمصرف شود تاواحد بارالکتریکی مثبت از یک جسم‌به‌جسم دیگر جریان یابد. اگراین‌اختلاف پتانسیل رانیزبه V نمایش دهیم بنا به‌این تعریف خواهیم داشت.

$$V = V_2 - V_1 \qquad (۶-۷)$$

مثلاوقتی‌که می‌گوئیم اختلاف پتانسیل‌میان دو قطب یک باتری اتومبیل ۱۲ ولت است بدین معنی‌است‌که‌برای‌انتقال‌واحدبار الکتریکی(یعنی یک کولن)ازیک‌قطب‌به‌قطب‌دیگر ۱۲ ژول‌انرژی‌مصرف یاآزاد می‌شود اگرقطب منفی این‌باتری رابه زمین وصل‌کنیم پتانسیل آن صفر و پتانسیل قطب مثبت ۱۲+ولت می‌شود. برعکس اگرقطب مثبت‌باتری رابه زمین متصل سازیم پتانسیل این قطب صفر و پتانسیل قطب منفی ۱۲- ولت می‌گردد . بنابراین اختلاف میان‌دوقطب درهرحال ثابت‌برابر ۱۲ولت ثابت می‌ماند .

در نظر بگیریم‌که دو قطب چنین باتری ۱۲ ولتی را مطابق شکل (۷ـ۵) به دو صفحه فلزی V_1 و V_2 وصل کرده‌ایم. اگرصفحه V_1 راکه‌دارای پتانسیل منفی است به زمین وصل‌کنیم پتانسیل آن صفر می‌گردد و پتانسیل صفحه V_2 در ۱۲+ولت نگاهداشته می‌شود. اگر بخواهیم در این حالت بار منفی q− را از V_2 به V_1 انتقال دهیم باید به‌اندازه $W = Vq$ انرژی مصرف‌کنیم، برعکس اگر همین



شکل۷-۵ - وقتی بارالکتریکی q از یك نقطه به‌نقطه‌دیگر که بین آنها اختلاف پتانسیل V موجود است انتقال می‌یابد انرژی Vq مصرف یاآزاد می‌شود

بارالکتریکی را از V_1 به V_2 برگردانیم انرژی Vq آزاد خواهد شد.

پرسش ۷-۵ - اگر بخواهیم بارمثبت $+q$ را از V_2 به V_1 بابرعکس انتقال‌دهیم انرژی‌چگونه مصرف یاآزاد خواهد شد؟

در این مثال اگر V_1 و V_2 بایك رشته سیم به هم متصل شوند الکترونها به سوی V_2 جریان می‌یابند وانرژی آزادشده به‌گرما تبدیل می‌شود. بنابراین، براساس شدت جریانی که از یك هادی می‌گذرد و توانی که به صورت گرما در آن مصرف می‌شود واحد اختلاف پتانسیل به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

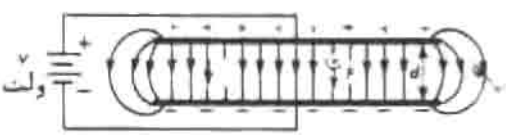
ولت: اختلاف‌پتانسیل الکتریکی بین دونقطه‌ازیك‌هادی است‌که اگر جریانی به شدت ثابت یك آمپر ازآن بگذرد توان الکتریکی‌که به‌صورت‌گرما در آن مصرف می‌شود یك‌وات باشد.[1]

پرسش ۷-۶ - اگردیمانسیون شدت‌جریان را به A نمایش دهیم دیمانسیون اختلاف پتانسیل براساس تعریف بالا چیست؟

میدان‌الکتریکی‌یکنواخت- در بسیاری‌ازآزمایشهایی که به منظور بررسی ساختمان اتم انجام می‌گیرد، لازم است‌که ذرات باردار را ازیك میدان‌الکتریکی یکنواخت عبور دهند و رفتار ذرات را دراین‌میدان مشاهده کنند. میدان یکنواخت میدانی است که در حجم محدودی ازفضا شدت وجهت آن ثابت باشد

برای ایجاد چنین میدانی می‌توانیم دو صفحه فلزی راکه مطابق شکل (۷-۶) مقابل یك‌دیگر به‌طور موازی قرار داده می‌شوند به‌دو قطب یك باتری متصل‌کنیم. دراین صورت در فضای بین دو صفحه میدان الکتریکی یکنواختی ایجاد می‌شود. ولی در فضای بیرون دو صفحه و در مجاورت لبه صفحه‌ها به‌طوری‌که در شکل دیده می‌شود میدان یکنواخت نیست.

فرض کنید میخواهیم بار مثبت $+q$ را از صفحه بالایی به‌صفحه پایینی منتقل‌کنیم. انرژی‌لازم



شکل ۷-۶- میدان الکتریکی بین دو صفحه موازی باردار یکنواخت است.

۱- می‌دانید توان الکتریکی‌برابراست‌با $P = \frac{W}{t} = \frac{Vq}{t} = \frac{Vlt}{t} = VI$ وتعریف ولت‌براساس رابطه $V = \frac{P}{I}$ است.

برای انجام این کار، چنان‌که در مبحث مکانیک دیدیم برابر حاصل‌ضرب نیرو در تغییر مکان است یعنی: $W = Fd$. برای بدست آوردن هم‌ارز الکتریکی این معادله کافی است روابط $W = Vq$ و $F = qE$ را به‌کار بریم بنابراین اگر در رابطه $W = Fd$ به جای W و F معادل آنها را قرار دهیم خواهیم داشت:

$$Vq = qE \cdot d$$

یا:

$$\boxed{E = \frac{V}{d}} \qquad (۷-۷)$$

که در آن V اختلاف پتانسیل میان دو صفحه برحسب ولت و d فاصله دوصفحه برحسب متر و E شدت میدان برحسب $\frac{\text{ولت}}{\text{متر}}$ است. با توجه به‌واحد شدت میدان الکتریکی که قبلاً تعریف شد خواهیم داشت:

$$۱\frac{\text{نیوتن}}{\text{کولن}} = ۱\frac{\text{ولت}}{\text{متر}} \qquad (۸-۷)$$

مثال- بین دو صفحه موازی که به فاصله ۲/۰ سانتیمتر از یکدیگر قرار دارند اختلاف پتانسیل ۱۰۰۰ ولت برقرار شده است:

الف- شدت میدان الکتریکی بین‌دوصفحه را حساب کنید.

ب- اگر یک پروتون با بار مثبت:

$۱/۶۰۲ \times ۱۰^{-۱۹}C$ بین این دو صفحه قرار گیرد چه نیروئی برآن وارد می‌شود؟

-مقادیرداده‌شده‌عبارتنداز: $d = ۰/۰۲۰^{m}$

$V = ۱۰۰۰V$ و $q = ۱/۶۰۲ \times ۱۰^{-۱۹}C$:

الف:

$$E = \frac{V}{d} = \frac{۱۰۰۰^{V}}{۰/۰۲۰^{m}} = ۵۰۰۰۰\frac{V}{m} =$$

$$۵۰۰۰۰\frac{N}{C}$$

ب:

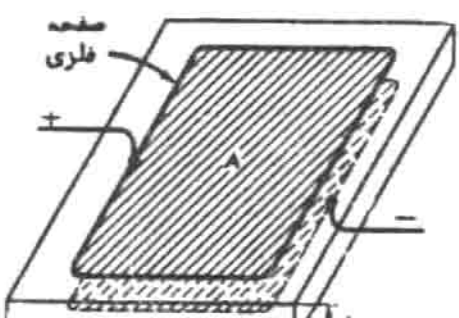
$$F = Eq = ۵۰۰۰۰\frac{V}{m} \times ۱/۶۰۲ \times ۱۰^{-۱۹}C$$

$$= ۸/۰۱ \times ۱۰^{-۱۵}N$$

خازن

خازن یک اسباب الکتریکی است که برای ذخیره‌کردن یک مقدار الکتریسیته به‌کارمی‌رود، به همان‌گونه که یک مخزن آب برای ذخیره‌کردن مقداری‌آب ویایک‌کپسول‌گاز برای انباشتن‌مقداری گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

خازن را می‌توان به‌شکلهای‌مختلف ساخت. متداولترین‌نوع‌آن‌خازن‌مسطح‌است. این‌نوع خازن از دو صفحه فلزی موازی‌که بین آنها عایقی به‌نام «دی‌الکتریک» قرار دارد تشکیل شده است و شکل (۷-۷) طرح‌ساده آنرا نشان می‌دهد. این‌صفحه‌ها



شکل۷-۷- طرح ساده‌ای از قسمتهای اصلی یک خازن.

سطح نسبتاً بزرگی دارند و خیلی نزدیک به‌هم قرار داده می‌شوند. دی‌الکتریکهای معمولی عبارتند از هوا، شیشه، میکا، روغن و کاغذ آغشته به‌روغن.

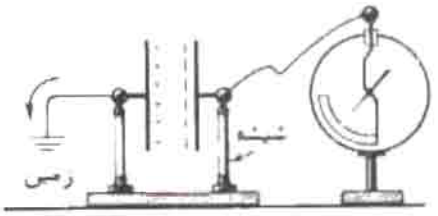
برای این‌که قابلیت خازن در ذخیره‌کردن مقدار الکتریسیته افزایش یابدیه‌عبارت دیگر برای این‌که ظرفیت الکتریکی خازن زیاد شود می‌توان تغییرات زیر را درساختمان آن داد:

۱- سطح صفحه‌های فلزی‌را افزایش داد.

۲- فاصله صفحه‌ها راکم‌کرد.

۳- دی الکتریك مناسب بین صفحه‌ها قرار داد: مثلاً اگر صفحه‌های خازن کوچك و فاصله آنها از هم زیاد باشد ظرفیت الکتریکی خازن کم است برعکس اگر سطح این‌صفحه‌ها بزرگ وفاصله آنها از هم‌کم باشد ظرفیت خازن زیاد خواهد بود.

اساس‌کار خازن- اصول کار یك خازن در شکل (۷-۸) مجسم شده است: دوصفحه فلزی‌که روی پایه عایق نصب شده‌اند مقابل هم قرار دارند و خازنی را تشکیل می‌دهند. یکی از این دو صفحه به‌زمین وصل شده است و صفحه دیگر با یك رشته سیم به یك الکتروسکپ یا یك الکترومتر متصل است. اگربه‌صفحه سمت‌راست، که ازلحاظ‌الکتریکی منفرد است، مقداری بار منفی بدهیم الکترونها از صفحه مقابل به طرف زمین رانده می‌شوند و این صفحه همان مقداربار مثبت پیدامی‌کند. اگربرعکس به صفحه سمت راست مقداری بار مثبت بدهیم (این کار در شکل نشان داده نشده است). الکترونها از زمین به طرف صفحه سمت چپ کشیده می‌شوند واین صفحه دارای بارمنفی‌می‌شود در هردوحالت، صفحه‌متصل به‌زمین، بنابه‌قرارداد،



شکل ۷-۸- طرح ساده‌ای از اصول‌کار یك خازن

دارای پتانسیل صفراست ولی‌صفحه منفرد در حالت اول دارای پتانسیل منفی و در حالت دوم دارای پتانسیل مثبت است. دراین صورت می‌گوئیم خازن «پر» یا «مشارژ» شده است. برای پر کردن یك خازن می‌توان مستقیماً دو صفحه آن را به‌دو قطب یك باتری وصل‌کرد. دراین صورت صفحه‌ای‌که به‌قطب مثبت باتری‌متصل‌می‌شوددارای بارمثبت وصفحه‌ای که به‌قطب منفی باتری وصل می‌گردد دارای‌بار منفی خواهد شد.

اگر دو صفحه خازن پرشده را با یك سیم به هم وصل کنیم الکترونها از صفحه‌ای‌که بار منفی دارد به‌صفحه‌دیگر که دارای بار مثبت‌است می‌روند. بنابراین بارهای الکتریکی مثبت و منفی یك‌دیگر را خنثی می‌کنند و خازن «تخلیه» یا «دشارژ» می‌شود. عمل تخلیه خازن معمولاً با جرقه و صدا همراه است.

در شکل (۷-۸) هرچه بیشتر الکترون به صفحه سمت راست داده شود اختلاف پتانسیل میان دو صفحه زیادتر می‌شود ولی بیشترین مقدار باری که می‌توان روی دوصفحه خازن ذخیره‌کرد بستگی به‌جنس عایق میان آنها دارد. اگر مقدار بار ازحد معینی بگذرد بین دو صفحه جرقه می‌زند و خازن خالی می‌شود.

پرسش ۷-۷- وقتی که یک خازن توسط دستگاه مولد الکتریسیته پر می‌شود اختلاف‌پتانسیل میان دوصفحه آن ازچه حدی نمی‌تواند بیشترشود؟

ظرفیت‌خازن- ظرفیت یک خازن یا «کاپاسیتانس»[1] که آن‌را به C نمایش می‌دهند بنابه‌تعریف عبارتست از خارج قسمت بار الکتریکی q ذخیره‌شده روی هریك از صفحات خازن براختلاف پتانسیل V میان دو صفحه آن. به‌عبارت دیگر ظرفیت خازن برابر است با مقدار بار الکتریکی که باید روی یکی از صفحه‌های خازن جمع شود تا پتانسیل آن نسبت‌به صفحه دیگر به‌اندازه یك ولت افزایش یابد.

بنابرتعریف بالا، خواهیم داشت:

$$C=\frac{q}{V} \qquad (۹-۷)$$

واحد ظرفیت به‌افتخار میشل فارادی، فاراد نامیده می‌شود و علامت اختصاری آن F است یك فاراد ظرفیت خازنی است که اگرروی هریك از صفحات آن بار الکتریکی معادل یك کولن ذخیره شود اختلاف پتانسیل میان دو صفحه آن یك ولت باشد:

$$۱F=\frac{۱C}{۱V} \qquad (۱۰-۷)$$

فاراد واحد بسیار بزرگی است و درکارهای عملی مورداستفاده قرار نمی‌گیرد. در عمل معمولاً واحدهای زیر را به‌کار می‌برند.

میکروفاراد (μF) برابر $۱۰^{-۶}$ فاراد

نانوفاراد (nF) برابر $۱۰^{-۹}$ فاراد

پیکوفاراد (pF) برابر $۱۰^{-۱۲}$ فاراد

محاسبه ظرفیت خازن مسطح- ظرفیت‌خازن‌مسطح به‌طورکلی از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$C=\varepsilon\frac{A}{d} \qquad (۱۱-۷)$$

که درآن A سطح مقابل هم هریك‌از دوصفحه‌خازن برحسب مترمربع، d فاصله بین دوصفحه برحسب متر (به‌شکل ۷-۷ مراجعه‌کنید)، C ظرفیت‌خازن برحسب فاراد و ε (حرف لاتینی‌با تلفظ اپسیلون) ضریب ثابتی است‌که بستگی به‌عایق بین دوصفحه دارد و درواقع قابلیت گذردهی دی‌الکتریك بین دو صفحه است. اندازه ε برابر است با حاصل ضرب قابلیت گذردهی خلا[2] (یعنی:

$\varepsilon_۰ = ۸/۸۵\times۱۰^{-۱۲}\frac{C^۲}{N.m^۲}$) دریك مقدارثابت K به‌نام «ثابت دی‌الکتریك[3]» که معرف نوع دی الکتریك است یعنی:

$$\varepsilon=\varepsilon_۰K \qquad (۱۲-۹)$$

بنابراین:

$$C=\varepsilon_۰K\frac{A}{d} \qquad (۱۳-۷)$$

۱- Capacitance

۲- K را ضریب دی‌الکتریك نیز نامیده‌اند.

برای خلأ (و تقریباً برای هوا) $K=1$ است بنابراین اگر بین صفحات یک خازن مسطح خلأ یا هوا باشد ظرفیت آن برابر است با:

$$C_0=\varepsilon_0\frac{A}{d} \qquad (۱۴-۷)$$

و از مقایسه این رابطه با رابطه (۱۳-۷) نتیجه می‌شود:

$$K=\frac{C}{C_0} \qquad (۱۵-۷)$$

چون C همواره بزرگتر از C_0 است، ثابت دی‌الکتریک همه دی‌الکتریک‌ها از یک بزرگتر است. در جدول زیر ثابت دی‌الکتریک چند جسم عایق برای مقایسه داده شده است:

نوع دی‌الکتریک	K	نوع دی‌الکتریک	K
خلأ	۱/۰۰۰۰	آب خالص	۸۱
هوا	۱/۰۰۰۶	بنزن	۲/۲۸
شیشه	۵ تا ۱۰	گلیسرین	۵۶
کائوچو	۲ تا ۳۵	روغن معدنی	۲/۲
میکا	۳ تا ۶		

پرسش ۷-۸- باتوجه به روابط (۱۲-۷) و (۱۵-۷) بگوئید دیمانسیون K چیست؟

مثال- دو ورقه نازک قلع به‌شکل مستطیل به‌ابعاد ۲۰ در ۲۵ سانتیمتر به‌دو طرف یک ورقه میکا به ضخامت ۰/۱۰ میلیمتر چسبانده‌شده ومجموعاً خازن مسطحی را تشکیل داده‌اند. ظرفیت این خازن را حساب کنید. ثابت دی‌الکتریک میکا ۵ است. داریم:

$$C=\varepsilon_0 K\frac{A}{d}=۸/۸۵\times۱۰^{-۱۲}K\frac{A}{d}$$

به ازاء $A=۰/۲۰\times۰/۲۵=۰/۰۵m^2$ و $d=۱/۰\times۱۰^{-۴}m$ و $K=۵$ خواهیم داشت:

$$C=۸/۸۵\times۱۰^{-۱۲}\times۵\times\frac{۰/۰۵}{۱/۰\times۱۰^{-۴}}$$
$$\simeq ۲/۲\times۱۰^{-۸}F=۰/۰۲۲\mu F$$

انرژی خازن پرشده- برای پرکردن یک خازن همواره مقداری انرژی مصرف می‌شودکه در خازن پرشده ذخیره می‌گردد. وقتی‌که دوصفحه یك خازن بدون‌بار به‌دوقطب‌یك‌مولد متصل‌می‌شودالکترونها به تدریج از یک صفحه خازن به صفحه دیگر آن منتقل می‌گردند تا این‌که بار الکتریکی نهایی q در خازن ذخیره شود. در نتیجه اختلاف پتانسیل میان دوصفحه خازن‌که درآغاز صفر بود لحظه به لحظه افزایش می‌یابد تا به‌حدنهایی $V=\frac{q}{C}$ برسد.

چون اختلاف پتانسیل میان دوصفحه خازن‌متناسب با بار الکتریکی افزایش می‌یابد، مقدار متوسط‌آن برابر است با $\bar{V}=\frac{۰+V}{۲}=\frac{V}{۲}=\frac{q}{۲C}$

می‌دانیم $\bar{V}$ بنابه تعریف مقدار انرژی است که برای انتقال واحد بار الکتریکی لازم است بنابراین‌انرژی‌کل‌لازم برای‌ذخیره‌شدن‌بارالکتریکی q درخازن برابر است با:

$$W=\bar{V}q=\frac{۱}{۲}\frac{q^2}{C}$$

که با استفاده از رابطه $q=CV$ می‌توان آن‌را به صورت‌های زیر نیز نوشت:

$$W=\frac{۱q^2}{۲C}=\frac{۱}{۲}CV^2=\frac{۱}{۲}qV \qquad (۱۶-۷)$$

W برحسب ژول و q بر حسب کولن و C برحسب فاراد و V بر حسب ولت است. وقتی که خازن تخلیه می‌شود این انرژی آزاد می‌گردد.

پرسش ۷-۹- اگر دوصفحه یک‌خازن معمولی پر شده را با سیمی به هم وصل کنیم آیا انرژی آزاد شده خازن می‌تواند سیم را گرم کند؟

به هم بستن خازنها- خازنها را، بسته به نوع استفاده از آنها، می‌توان به دو طریق موازی و متوالی به‌هم متصل کرد.

الف- به‌هم بستن موازی- شکل (۷-۹) اتصال چند خازن به طور موازی را نشان می‌دهد. در این حالت اختلاف پتانسیل بین دو صفحه همه خازنهایکی است ولی بارالکتریکی هرخازن‌متناسب با ظرفیت آن است یعنی:

$q_1=C_1V$ و $q_2=C_2V$ و $q_3=C_3V$ و ...

ولی بار الکتریکی کل q که توسط مولد به‌خازنها داده میشود برابر مجموع این بارهاست:

$$q=q_1+q_2+q_3+\cdots$$

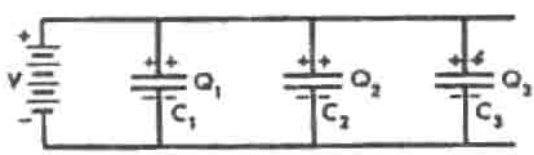
یا

$$q=C_1V+C_2V+C_3V+\cdots$$

و یا

$$\frac{q}{V}=C_1+C_2+C_3+\cdots$$

$C=\frac{q}{V}$ را می‌توان ظرفیت خازنی دانست که اگر



شکل ۷-۹- به‌هم بستن خازنها به‌طور موازی

به جای مجموعه خازنهای C_1 و C_2 و C_3 و... گذارده شود تحت اختلاف پتانسیل مشترک V بار الکتریکی کل q در آن ذخیره گردد. چنین خازنی را خازن معادل مجموعه گویند. بنابراین:

$$C=C_1+C_2+C_3+\cdots \qquad (۱۷-۷)$$

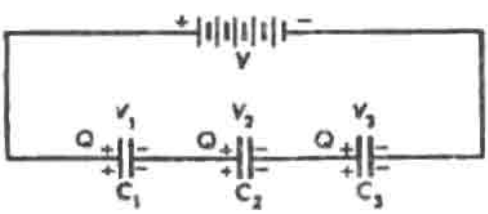
یعنی وقتی که خازنها به‌طور موازی به‌هم متصل می‌شوند ظرفیت کل مجموعه برابر مجموع ظرفیت خازنها است.

ب - به هم بستن متوالی (سری)- شکل ۷ - ۱۰ طرز به‌هم بستن متوالی خازنها را نشان می‌دهد. به‌طوری که در شکل دیده می‌شود تنها دو صفحه دو طرف مجموعه‌که مستقیماً به‌مولد بسته شده‌اند از مولد بار الکتریکی دریافت می‌کنند وصفحه‌های دیگر از طریق القاء دارای بار الکتریکی می‌شوند بنابراین اندازه بار الکتریکی همه خازنهایکی است ولی اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه برابر حاصل جمع اختلاف پتانسیلهای دو سر خازنهاست یعنی:

$$V=V_1+V_2+V_3+\cdots$$

ولی

$$V_1=\frac{q}{C_1} \text{ و } V_2=\frac{q}{C_2} \text{ و } V_3=\frac{q}{C_3} \text{ و } \ldots$$



شکل۷-۱۰- به‌هم بستن متوالی خازنها

پس $V = q(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots)$

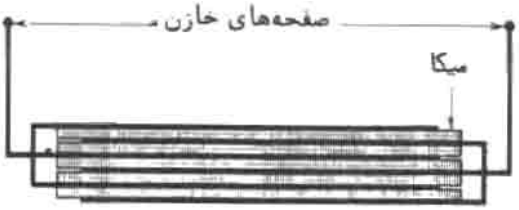
یا $\frac{V}{q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$

اگر C ظرفیت خازن معادل مجموعه باشد (یعنی خازنی که تحت اختلاف پتانسیل کل V بار الکتریکی مشترک q در آن ذخیره شود) برای این خازن خواهیم داشت $q = CV$ و یا $\frac{V}{q} = \frac{1}{C}$ بنابراین

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \qquad (۱۸-۷)$$

انواع خازن ـ خازنهائی که امروزه در صنعت الکترونیک به‌کار می‌روند بسته به‌مواردکاربردشان در جریانهای مستقیم یا متناوب، به انواع مختلف و به‌شکلهای گوناگون ساخته می‌شوند. در این جا فقط دو نمونه بسیار متداول را بیان می‌کنیم.

خازن باورقه‌های نازك ـ در این خازن دو نوار فلزی بسیار نازك، از جنس آلومینیوم یا قلع، به دو طرف یك نوارکاغذی آغشته به‌پارافین چسبانده شده است بنابراین دو نوار فلزی صفحه‌های هادی خازن و کاغذ آغشته به پارافین دی الکتریك آن را تشکیل می‌دهند این مجموعه را روی نوارکاغذی دیگری که‌آن هم آغشته به‌پارافین است قرار داده و می‌پیچند تا به شکل استوانه کوچکی درآید و در یك جعبهٔ کوچك می‌گذارند. این نوع خازنها که آنها را «خازنهای کاغذی» نیز می‌نامند درمدارهای



شکل۷-۱۱- خازن با ورقه‌های نازك میکا

الکترونیکی‌رادیو، تلویزیون، دستگاه برق اتومبیل و... به‌کار برده می‌شوند.

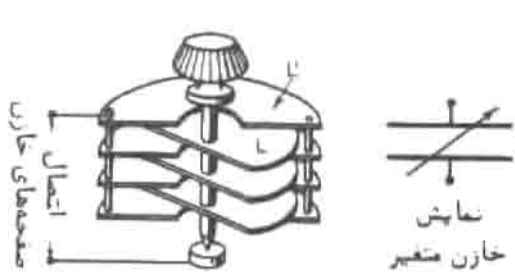
در نوع دیگری از این خازنها به‌جای کاغذ از ورقه‌های کوچك ونازك میکا به‌جای دی‌الکتریك استفاده می‌شود به‌این ترتیب که صفحات نازك فلزی و ورقه‌های میکا را یك درمیان روی هم قرار می‌دهند. با n ورقه میکا و $n+1$ ورقه فلزی خازن مرکبی از اجتماع n خازن مسطح به‌دست می‌آید که به‌طورموازی به‌هم‌بسته‌می‌شوند (شکل۷- ۱۱).

ظرفیت این نوع خازن را می‌توان به‌چند میکروفاراد رسانید. اگر دی الکتریك این نوع خازنها از ماده دی اکسید تیتانیوم[1] یا تیتانات‌باریم[2] که ضریب عایق خیلی بزرگی دارند انتخاب شود می‌توان خازنهائی با ابعادکوچك به‌ظرفیت چندین میکروفاراد ساخت.

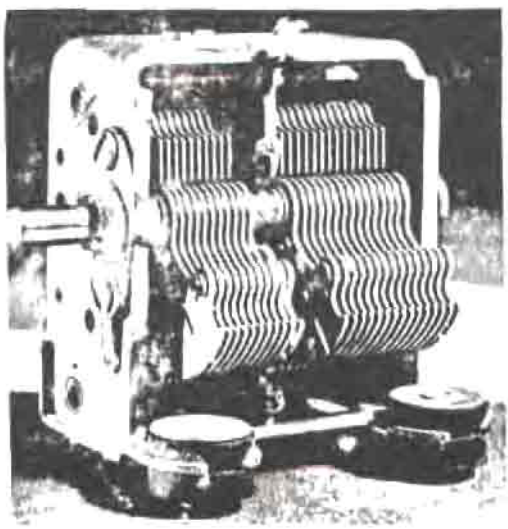
خازنهای متغیرـ ظرفیت‌این‌گونه خازن‌ها رامی‌توان به‌دلخواه ازصفر تا بیشترین مقدارآنها (که معمولاً ضعیف و در حدود نانوفاراد است) تغییر داد. این خازنها به‌سبب استحکام وسهولت کاربرد، درراديو به‌کار می‌روند. با چرخاندن صفحات متحرکی که بین صفحات ثابت قرار دارند، سطح مؤثر صفحات

۱- TiO_2 ۲- $BaTiO_3$

خازن تغییر می
می‌نماید. شکل (۷- ۱۲) طرح ساده‌ای از این خازن را نشان می‌دهد.



شکل ۷ ـ ۱۲ـ طرح ساده‌ای از خازن متغیر
L: صفحه متحرک L': صفحه ثابت



شکل۷ـ ۱۳ـ نمونه‌ای از خازن متغیر

به‌این پرسشها پاسخ دهید

۱) چه وجوه تشابهی وچه اختلافهائی‌بین نیروی جاذبه نیوتنی‌ونیروی الکتروستاتیکی کولنی وجود دارد؟

۲) ـ کدام آزمایشها نشان می‌دهند که نیروی جاذبه و نیروی الکتروستاتیک مانند هم با فاصله تغییر می‌کنند؟

۳) آیا کولن وآمپر هردو واحد بار الکتریکی هستند؟

۴) ـ از میدانهای زیرکدامشان اسکالر وکدامشان برداری هستند؟

میدان نور اطراف یك‌چراغ ـ میدان الکتریکی اطراف یك‌جسم باردار ـ میدان‌مغناطیسی اطراف یك آهن‌ربا ـ میدان صوت اطراف یك زنگ ـ میدان گرمایی اطراف یك بخاری ـ میدان جاذبه اطراف یك جرم

۵) ـ توضیح دهید چگونه با آزمایش می‌توان اندازه و جهت میدان الکتریکی را دریك نقطه از فضا معین کرد؟

۶) ـ تعریف اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دونقطه چیست؟

۷) ـ آیا اختلاف پتانسیل بین دو نقطه بستگی به اندازه بار الکتریکی‌که از یك نقطه

نقطه دیگر انتقال می‌یابد و مسیر حرکت آن دارد؟

۸) ـ با سابقه آشنایی که از الکترون ـ ولت دارید بگوئید این کمیت واحد کدام یک‌از کمیت‌های زیر است؟

بار الکتریکی، اختلاف پتانسیل، کار.

۹) ـ شدت میدان الکتریکی را تعریف کنید. چرا در اطراف یك بار الکتریکی واقع در یك نقطه، شدت میدان الکتریکی ثابت نیست؟ میدان یکنواخت را چگونه می‌توان به وجود آورد؟

۱۰) ـ در شکل (۷ ـ ۷) انحراف عقربه الکترومتر تابع بار الکتریکی q است و طبق رابطه $q=CV$ تابع اختلاف پتانسیل V نیز هست. آیا می‌توان الکترومتر را برحسب ولت مدرج کرد وآن را به‌عنوان ولت سنج بکار برد؟

۱۱) ـ در شکل (۷ ـ ۷) اگر دو صفحه خازن را به‌هم نزدیك کنیم انحراف عقربه الکترومتر کمتر و اگرآنها را از هم دور کنیم انحراف عقربه بیشتر می‌شود. علت را توضیح دهید.

۱۲) ـ ظرفیت خازن معادل در هریك از حالات زیر چیست؟

الف ـ هرگاه n خازن یکسان را که ظرفیت هریك C_1 است به‌طور متوالی به‌هم متصل کنیم

ب ـ هرگاه n خازن یکسان را که ظرفیت هریك C_1 است به‌طور موازی به‌هم ببندیم

پ ـ هرگاه $N=pn$ خازن یکسان را که ظرفیت هریك C_1 است در p رشته موازی هررشته شامل n خازن متوالی به‌هم وصل کنیم.

۱۳) ـ اگربدون این‌که بار الکتریکی یك خازن تغییر کند دو صفحه‌آنرا ازهم دورکنیم چه‌تغییری در انرژی آن حاصل می‌شود؟ علت این تغییر انرژی را براساس قانون بقاء انرژی بیان کنید.

۱۴) ـ دو صفحه خازنی‌که بین آنها هواست به‌دوقطب یك باتری متصل وخازن پرشده است. بدون این‌که خازن را از باتری جدا کنیم یك دی الکتریك شیشه بین دو صفحه آن‌قرار می‌دهیم از کمیت‌های زیر کدامشان تغییر می‌کنند و تغییرآنها چگونه است؟

اختلاف پتانسیل بین دو صفحه، بار الکتریکی خازن، ظرفیت خازن، انرژی خازن

۱۵) ـ تعدادی‌خازن‌دراختیار داریم. اگربخواهیم با اختلاف پتانسیل ثابت بارالکتریکی بیشتری داشته باشیم خازنها را چگونه باید به‌هم ببندیم.

این مسئله‌ها را حل کنید

شکل ۷-۱۴

۱) ـ در یك لوله شیشه‌ای قائم، دو گلوله کوچك وسبك A و B قرار داده شده است. گلوله A در پائین لوله نگاهداشته شده است وگلوله B می‌تواند در لوله به‌آزادی و بدون اصطکاك با جدار لوله بالا و پائین برود و جرم آن $۱۰^{-۴}$ کیلوگرم است. اگر به هریك از این دو گلوله بار الکتریکی -۴×۱۰^{-۸} کولن داده شود گلوله B از A دور می‌شود و در فاصله h ازآن قرار می‌گیرد(شکل ۷-۱۴). اگر ازآثار الکتریکی شیشه بر گلوله صرف‌نظرشود اندازه h را حساب کنید.

جواب: $۱۲/۱^{Cm}$

۲) ـ در آزمایشهای بسیار جالبی که توسط رادرفورد به‌منظور اثبات وجود هسته در اتم انجام گرفت، او ورقه نازکی از طلا را توسط یك دسته ذرات آلفا، حاصل از یك ماده رادیواکتیو بمباران کرد. پراکنده شدن ذرات آلفا به‌اطراف توسط ورقه طلا این فکر را در رادرفورد تقویت‌کردکه اتم طلا دارای هسته سنگین است که بار مثبت دارد و بارهای منفی موجود در اتم، همه خارج از هسته قرار دارند. هرذرهٔ آلفا (که‌هسته هلیوم است) دارای جرم تقریبی ۷×۱۰^{-۲۷} کیلوگرم وبار الکتریکی $+۲e$ $(e=۱/۶۰۲\times۱۰^{-۱۹}C)$ و هسته هر اتم طلا دارای جرم تقریبی ۳×۱۰^{-۲۵} کیلوگرم و بار الکتریکی $+۷۹e$ است. نیروی دافعه‌کولنی را وقتی‌که ذره آلفا به‌فاصله $۱۰^{-۱۴}$ متری هسته اتم طلا می‌رسد حساب کنید. ذره آلفا در این حالت با چه شتابی پراکنده می‌شود؟

جواب: تقریباً $۳۶۰N$ و $۵\times۱۰^{۲۸}\frac{m}{s^۲}$

۳)ـ بار الکتریکی معادل $-۴/۵\times۱۰^{-۷}$ کولن از یك نقطه به سطح یك کره فلزی کوچك که روی پایه عایقی قرار دارد منتقل شده و در این انتقال $۱/۸\times۱۰^{-۴}$ ژول کار انجام گرفته است. پتانسیل سطح کره فلزی را حساب کنید.

جواب: $-۴/۰\times۱۰^{۳}V$

۴)ـ بین دوصفحه رسانای موازی‌که فاصله آنها از یك‌دیگر ۳ سانتیمتر است اختلاف پتانسیل ۶۰۰۰ ولت برقرار شده‌است. یك قطره‌کوچك روغن با بار الکتریکی $۹/۶\times۱۰^{-۱۹}$ کولن درفضای بین این دو صفحه درحال سقوط است. (به‌شکل ۷ـ۶ مراجعه‌کنید)

الفـ شدت میدان الکتریکی بین دوصفحه را حساب‌کنید.

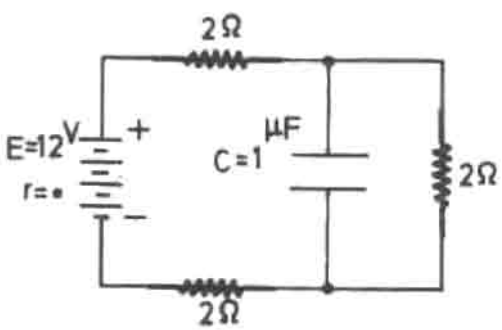
جواب: الف) $2\times10^{5}\frac{V}{m}$ ب) $1/92\times10^{-13}N$

۵)- یك تعمیر كار دستگاههـای الكترونیك، سه خـازن $C_1=4\mu F$ و $C_2=6\mu F$ و $C_3=12\mu F$ در اختیار دارد. این تعمیر كار با سه خازن خود چه ظرفیت‌هایی مـی‌تواند بدست آورد؟

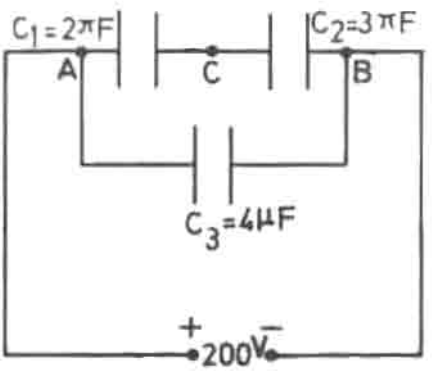
۶- سه خـازن $C_1=2\mu F$ و $C_2=3\mu F$ و $C_3=4\mu F$ مطابق شكل (۷-۱۵)به هم بسته شده‌اند. اگـر اختلاف پتانسیل بین دو نقطه A و B بـرابر ۲۰۰ ولت بـاشد اختلاف پتانسیل بین دونقطه A و C چه اندازه‌است؟

بار الكتریكی هـر خازن و ظرفیت معادل مجموعه را حساب كنید. انرژی كل مجموعه در وقت پربودن چه اندازه است؟

جـواب : ۱۲۰ ولت و ۲۴۰ و ۲۴۰ و ۸۰۰ میكرو كولن ، ۵/۲ میكرو فاراد ، ۰/۱۰۴ ژول



شكل۷-۱۶



شكل۷-۱۵

۷- درمدارشكل (۷-۱۶)بار الكتریكی روی خازن $C=1\mu F$ فاراد را حساب كنید. مشخصات‌مدار روی شكل نوشته شده‌است.

جواب: ۴ میكروكولن

۸- ظرفیت خازنی كه‌دی‌الكتریك آن هواست ۱۰۰۰ پیكوفاراد و بار الكتریكی هر یك ازصفحات آن ۱ میكروكولن است.

الف- اختلاف پتانسیل میان دوصفحه آن را حساب‌كنید

ب- اگر بار الكتریكی ثابت نگاهداشته شود ولی فاصله بین دو صفحه دو بـرابـر شود اختلاف پتانسیل میان دوصفحه چه اندازه خواهد شد

جواب: الف- ۱۰۰۰V ، ب- ۲۰۰۰V ، پ- 5×10^{-4}J

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۷

۷-۱)- نه. تساوی این نیروها مستلزم یکی بودن بار الکتریکی دو جسم نیست و به‌شکل دو جسم هم‌بستگی ندارد وفقط براساس اصل عمل وعکس‌العمل توجیه می‌شود.

۷-۲)- کافی است بار الکتریکی مثبت معینی را که «بارآزمون» نامیده می‌شود درآن مکان قرار دهیم وبررسی کنیم که آیا برآن نیرویی وارد می‌شود یا نه.

۷-۳)- نه. جهت جریان همواره ازپتانسیل بیشتر به‌طرف پتانسیل کمتراست، همچنان که گرما از جسمی که دمای آن بیشتر است به‌طرف جسمی که دمای آن کمتر است می‌رود، وآب از سطح تراز بالاتر به‌طرف سطح تراز پایین‌تر می‌رود ویا ملکولهای گاز از ظرفی که فشار گاز در آن بیشتر است به‌ظرف دیگری که فشار گاز درآن کمتر است می‌رود.

۷-۴)- اگر جسم از ابتدا دارای بار مثبت Q باشد کاری که برای انتقال بار مثبت q، به‌صورت $w=vq$ انجام می‌شود به‌صورت انرژی پتانسیل درجسم ذخیره می‌گردد وپتانسیل v مثبت است. ولی اگر جسم دارای بار منفی Q باشد، ضمن انتقال بار مثبت q اززمین به جسم، انرژی آزاد می‌شود وپتانسیل v منفی است.

۷-۵) درانتقال بار $+q$ از v_1 به v_2 انرژی به‌اندازه vq آزاد می‌شود ولی برعکس، در انتقال بار $+q$ از v_1 به v_2 همین مقدار انرژی باید مصرف شود

۷-۶) $ML^2T^{-2}A^{-1}$

۷-۷)- از نیروی محرکه مولد.

۷-۸)- چون K نسبت دوکمیت هم‌جنس ($\frac{C}{C_0}$ یا $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$) است بنابراین بدون دیمانسیون است.

۷-۹)- نه، زیرا این انرژی بسیار ضعیف است. مثلاً اگر ظرفیت خازن ۰/۲ میکرو- فاراد باشد و با اختلاف پتانسیل ۲۰۰ ولت پر شود انرژی آن:

$W=\frac{1}{2}CV^2=\frac{1}{2}\times 0/2\times10^{-6}\times4\times10^4=4\times10^{-2}$ J یعنی ۰/۰۰۴ ژول است

واین انرژی قادر نیست دمای سیم را به میزان قابل توجهی بالا ببرد، علاوه براین مدت تخلیه بسیار کوتاه است

۸

القای مغناطیسی ـ جریان القایی

درسال قبل دیدیم‌که چگونه جریان الکتریسیته‌دراطراف مدار خود میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند. هم‌چنین تحت‌عنوان اثرمیدان مغناطیسی برجریان الکتریکی، درباره نیرویی‌که سبب حرکت سیم حامل جریان درمیدان مغناطیسی می‌شود بحث کردیم. دراین بخش نخست حالاتی‌را یادآور می‌شویم که جریان الکتریکی ثابت از یك هادی می‌گذرد و دراطراف آن‌میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند وفرض می‌کنیم‌که محیط اطراف هادی خلأ یا عملاً هواست، سپس ضمن یادآوری جریان القایی و قانون مغناطیسی به بحث در باره تولید جریان متناوب خواهیم پرداخت.

القای‌مغناطیسی‌حاصل‌ازجریان‌الکتریسیته

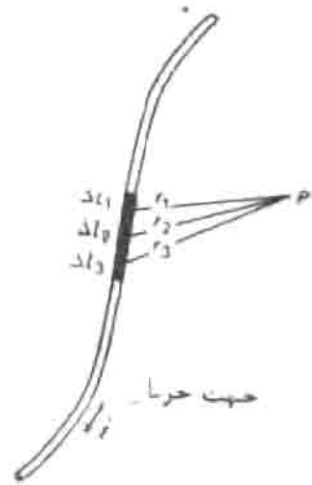
می‌دانیم وقتی ازیك هادی جریان‌الکتریسیته می‌گذرد در اطراف آن میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. شدت‌این‌میدان درهرنقطه از فضای‌اطراف هادی به صورت یك بردار نمایش داده می‌شود که آن‌را «القای مغناطیسی» یا «اندوکسیون مغناطیسی» می‌نامندوبه $\vec{B}$ نمایش می‌دهند. اندازه بردار $\vec{B}$ در هرنقطه اطراف یك‌هادی‌که ازآن جریان‌الکتریسیته می‌گذرد توسط بیو[1] و ساوار به‌وسیله آزمایش‌معین شده است:

طبق نظر این‌دو دانشمند هر جزء کوچك از هادی مانند Δl_1 در نقطه‌ای مانند P، که به‌فاصله r ازآن قرار دارد (شکل ۸ ـ ۱)، به هنگام عبور جریان، القای مغناطیسی جزئی به‌وجود می‌آورد. به‌همین ترتیب دیگر اجزاء سیم مانند Δl_2 و Δl_3 و ... نیز در ایجاد القای مغناطیسی در نقطه P سهمی خواهند داشت. بنابراین القای مغناطیسی‌در نقطه P حاصل‌جمع بردارهای القای‌مغناطیسی‌جزئی خواهد بودکه هرکدام متعلق به‌جزئی ازسیم حامل جریان می‌باشد.

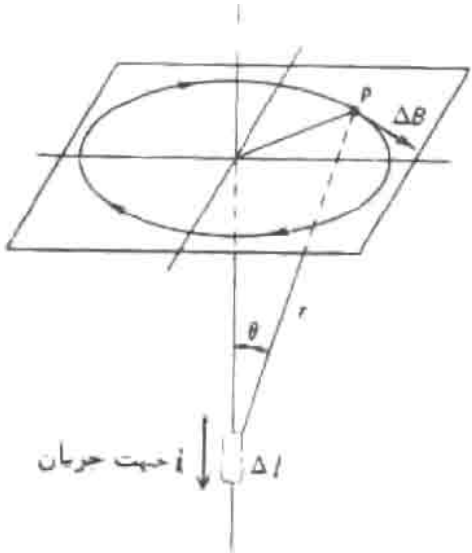
بنا به‌قانون بیو ـ ساوار، اندازه القای مغناطیسی هرجزء Δl هادی، از رابطهٔ زیر حساب

---

۱ ـ J.B. Biot فیزیك‌دان ومنجم فرانسوی (۱۷۷۴-۱۸۶۲ م)که درالکترومانیتیك مطالعاتی دارد . با نام ساوار نیز درمبحث صوت آشنا شده‌اید.



شکل ۸-۱- هر جزء از یك هادی که از آن جریان می‌گذرد در ایجاد القای مغناطیسی در یك نقطه مانند P سهیم است.



شکل ۸-۲- طرح ساده‌ای برای محاسبه القای مغناطیسی

می‌شود:

$$\Delta B = k\frac{i\sin\theta \cdot \Delta l}{r^2} \qquad (۱-۸)$$

در این رابطه، r فاصله جزء Δl از نقطه P و i شدت جریان و θ زاویه بین راستاهای r و l (راستای سیم) است. (به‌شکل ۸-۲ مراجعه‌شود)

k ضریب ثابتی است که بستگی به‌واحدهای انتخاب شده دارد: اگر l و r برحسب متر و i برحسب آمپر و B برحسب تسلا باشد:

$k = 10^{-7}\frac{T \cdot m}{A}$ است.

دراین جاهم مانندآن‌چه درفرمول کولن‌بیان شد برای سهولت محاسبه القای مغناطیسی حاصل از مدارهای دایره‌ای شکل k را به صورت زیر می‌نویسند:

$$k = \frac{\mu_0}{4\pi} \qquad (۲-۸)$$

ضریب μ_0 که بدین‌ترتیب وارد می‌شودثابت دیگری است که «قابلیت نفوذ مغناطیسی خلأ» نامیده می‌شود وبرابر است با:

$$\mu_0 = 4\pi k \simeq 12/56 \times 10^{-7}\frac{T \cdot m}{A} \qquad (۳-۸)$$

دراین صورت رابطه (۸-۱) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\sin\theta \cdot \Delta l}{r^2} \qquad (۴-۸)$$

برای محاسبه اندازه القای مغناطیسی کل، باید ΔB های حاصل از تمام جزءهای Δl را باهم جمع کرد و برای این منظور معمولا روش محاسبه خاصی لازم است که «حساب انتگرال» نامیده شود. به‌وسیله حساب انتگرال، اندازه B را دربسیاری‌از موارد می‌توان به آسانی به‌دست آورد ولی بدون استفاده ازاین روش، تعیین اندازه B به جز حالت ساده زیرمشکل است.

محاسبهٔ القای مغناطیسی درمرکز یک مدار دایره‌ای شکل ـ درنظر بگیریم که از مدار دایره‌ای شکلی به‌شعاع r جریانی به‌شدت i می‌گذرد (شکل ۸ ـ ۳) می‌خواهیم القاء مغناطیسی یا به‌عبارت دیگر شدت میدان را درمرکز این مدار حساب کنیم. هر جزء کوچک Δl برشعاع r عمود است، بنابراین $\theta = 90^\circ$ و $\sin\theta = 1$ و r برای همه Δlها یکی است و داریم:

$$\Delta B_1 = k\frac{i}{r^2}\Delta l_1$$

$$\Delta B_2 = k\frac{i}{r^2}\Delta l_2$$

$$\Delta B_3 = k\frac{i}{r^2}\Delta l_3$$

و .....

چون ΔB ها همه در یک راستا هستند برای محاسبهٔ B کل، باید روابط بالا را باهم جمع کنید:

$$B = k\frac{i}{r^2}(\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 + \dots)$$

باتوجه به‌این که جمع تمام Δlها برای یک دور دایره برابر $2\pi r$ است خواهیم داشت:

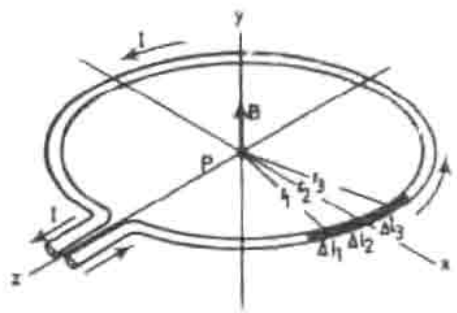
$$B = k\frac{i}{r^2} \cdot 2\pi r$$

$$\boxed{B = 2\pi k\frac{i}{r}} \qquad (۵-۸)$$

به‌ازاء $k = 10^{-7}$ رابطه $B = 2\pi \times 10^{-7}\frac{i}{r}$ به‌دست می‌آید که درسال گذشته با آن آشنا شده‌اید

باتوجه به‌رابطه $k = \frac{\mu_0}{4\pi}$ داریم:

$$\boxed{B = \mu_0\frac{i}{2r}} \qquad (۶-۸)$$

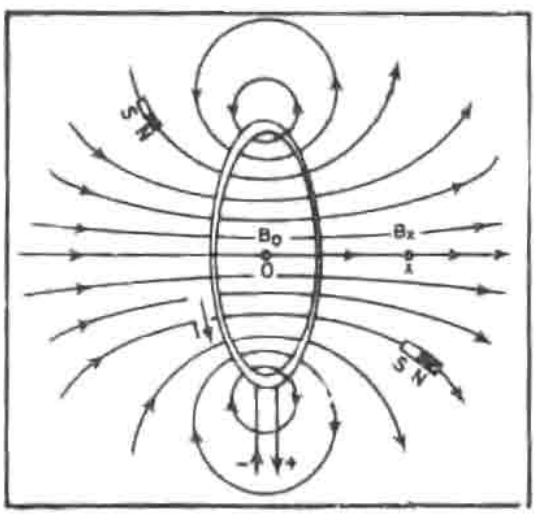


شکل ۸ ـ ۲ ـ کاربرد قانون بیو ـ ساوار برای محاسبه میدان حاصل ازجریان دایره‌ای شکل

اگر مدار شامل N حلقه باشد شدت جریان N‌برابر ودرنتیجه القای مغناطیسی N‌برابرمی‌شود یعنی:

$$\boxed{B = \mu_0\frac{Ni}{2r}} \qquad (۷-۸)$$

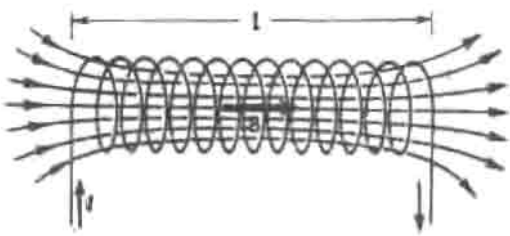
شکل ۸ ـ ۴ وضع خطوط میدان‌مغناطیسی و بردار $\vec{B}$ را درداخل وخارج یک‌مدار دایره‌ای‌شکل که ازآن جریان ثابتی می‌گذرد نشان می‌دهد.



شکل ۸ ـ ۴ ـ میدان مغناطیسی درداخل وخارج مدار دایره‌ای شکل

پرسش ۸-۱ ـ باتوجه به مطالبی که سال گذشته در باره میدانهای مغناطیسی آموخته‌اید بگوئید چگونه راستا وسوی بردار القای مغناطیسی B معین می‌شود؟

پرسش ۸-۲ ـ بردار القای مغناطیسی در اطراف سیم راست و طویلی که از آن جریان ثابتی می‌گذرد چه‌وضعی دارد واندازه آن چیست؟



شکل ۸ـ میدان در حجم بزرگی از وسط یك سولنوئید دراز یکنواخت است

میدان مغناطیسی یکنواخت ـ اگر بردارهای القای مغناطیسی درنقاط مختلف یك میدان مساوی وموازی وهم‌سو باشند چنین میدانی را «میدان یکنواخت» گویند. یکی از روشهای ایجاد میدان مغناطیسی تقریباً یکنواخت، استفاده از یك سیم‌پیچ با «سولنوئید» است (شکل ۸-۵) وقتی که از یك سولنوئید دراز جریان ثابتی می‌گذرد درحجم نسبتاً بزرگی در وسط آن، میدان یکنواخت به وجود می‌آید. اندازه شدت‌میدان در روی محورسولنوئید ودر وسط‌آن ازرابطه زیر حساب می‌شود:

$$B=\mu_0\frac{Ni}{l} \qquad (۸-۸)$$

در این رابطه N تعداد حلقه‌های سیم پیچ، i شدت جریان برحسب آمپر و l طول سولنوئید بر حسب متر است. خارج قسمت $\frac{N}{l}$، تعداددورهای سیم‌پیچ در واحدطول سولنوئید است که اگر آن‌را به n نمایش دهیم رابطه (۸ - ۱۱) به‌صورت ساده زیر درمی‌آید:

$$B=\mu_0 ni \qquad (۸-۸)$$

ویا

$$B=۱۲/۵۶\times۱۰^{-۷}ni \qquad (۸-۹)$$

مثال ـ شدت میدان مغناطیسی درمرکز یك سولنوئید به‌قطر ۱۰ سانتیمترو به‌طول ۶۰سانتیمتر وقتی‌که ازآن جریانی به‌شدت ۵آمپر می‌گذردبرابر ۴×۱۰^{-۲} تسلا است. تعداد حلقه‌های آن را حساب کنید.

ـ داریم $B=\mu_0\frac{Ni}{l}$

یا: $N=\frac{B\cdot l}{\mu_0 i}$

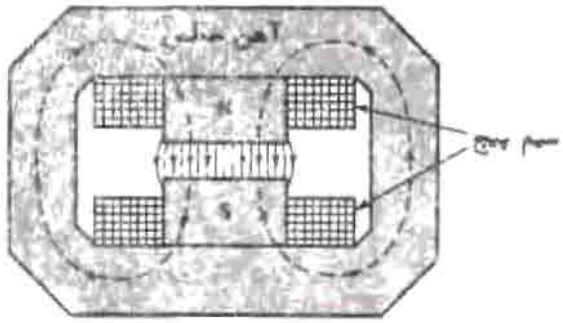
به‌ازاء $i=۵A$ و $l=۰/۶۰m$ و $B=۴\times۱۰^{-۲}T$ و $\mu_0=۱۲/۵۶\times۱۰^{-۷}\frac{T\cdot m}{A}$

خواهیم داشت:

$$N=\frac{۴\times۱۰^{-۲}\times۰/۶۰}{۱۲/۵۶\times۱۰^{-۷}\times۵}\simeq۳۸۱۹$$ دور

توجه: قطر سیم پیچ (۱۰cm) ازمشخصات سولنوئید است و درمحاسبه N نقشی ندارد.

برای تولیدمیدان مغناطیسی یکنواخت‌وقوی



شکل ۸ـ۶ـ آهن‌ربای الکتریکی برای تولید میدان یکنواخت قوی

از آهن‌ربـای الکتریکـی استفادم می‌شود در شکل (۸ـ۶) طرح ساده‌ای از آهن‌ربای الکتریکی نشان داده شده است. وجـود هسته آهنی درون سیم پیچ سبب می‌شود که شدت میدان مغناطیسی درون آن، چندهزار برابر شدت میدان در سیم‌پیچ بدون هسته آهنی باشد.

شار مغناطیسی

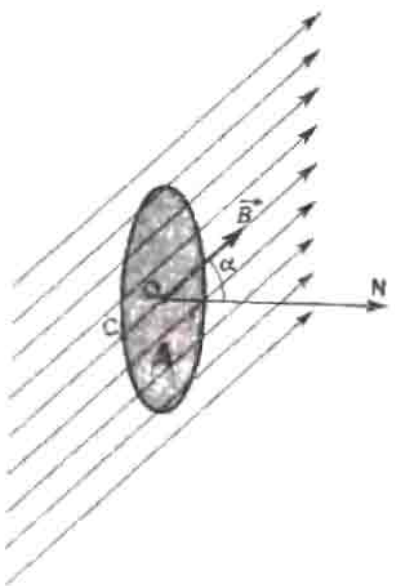
دیدیم که میدان مغناطیـسی موجوددرناحیه‌ای از فضارا بـا خطوط نیروی میدان مغناطیسی نشان می‌دهند. چون خطوط نیروی میدان را برای نشان دادن تغییرات القای مغناطیسی $\vec{B}$ ازیـک نقطه به نقطه دیگر اغلب نیز به‌کار می‌برند این خطوط را «خطوط القاء نیز می‌نامند.

راستای بـردار القای مغناطیسی $\vec{B}$ در هـر نقطه از میدان مماس برخط‌القاء(یا خط نیروی) مغناطیسی است‌که ازآن نقطه می‌گذرد واندازه B (یعنی شدت میدان) با تعداد خطوط نیرویی که از واحـد سطح می‌گذرد مشخص می‌شود. سطح‌واحد طوری‌انتخاب می‌شود که علاوه بر عمود بودن بر خطوط نیروی میدان، از نقطه مورد‌نظر نیز بگذرد.

مجموع خطوط القایی را کـه از یـک سطح محدود می‌گذرد شار یا فلوی مغناطیسی می‌نامندآن را با φ نمایش می‌دهند. اگـر میدان مـغـناطیسی یکنواخت باشدوسطح A عمود برخطوط نیروگرفته شود شار مغناطیسی‌که ازاین سطح می‌گذرد برابر است با:

$$\varphi = B \cdot A \qquad (۸ـ۱۰)$$

دراین رابطه B معرف تعداد خطوط نیرویی است‌که از واحد سطح می‌گـذرد و «شدت میدان» نامیده می‌شود، بنابراین‌می‌توان گفت شدت‌میدان مغناطیسی (یا اندازه القای مغناطیسی B) عبارتست از شار مغناطیسی‌که از واحد سطح عمود بر راستای خطوط نیروی میدان (یاخطوط القا) می‌گذرد و آن را چگالی شار مغناطیسی نیزنامیده‌اند.



شکل ۸ـ۷ـ فلوی مغناطیسی‌که ازیک‌سطح می‌گذرد برابراست با

$$\varphi = B \cdot A\cos\alpha$$

بدیهی است اگر سطح A بر راستای خطوط نیروی میدان عمود نباشد شار کمتری از آن می‌گذرد در این حالت اگر α زاویه بین راستای بردار القای مغناطیسی $\vec{B}$ و خط عمود بر سطح $(\vec{ON})$ باشد (شکل ۸ ـ ۷) شار مغناطیسی که از سطح A می‌گذرد برابر است با:

$$\varphi = B \cdot A\cos\alpha \qquad (۸-۱۱)$$

واحد B در دستگاه بین‌المللی واحدها، چنان که دیدیم تسلا (یا نیوتن بر متر آمپر[۱]) است بنابراین φ برحسب $\frac{\text{نیوتن متر}}{\text{آمپر}}$ بیان می‌شود که آن را وبر[۲] (با علامت اختصاری Wb) می‌نامند. هرگاه تعداد خطوط نیرویی را که از واحد سطح می‌گذرد، چنان که در بالا گفته شد، برابر B بگیریم هر خط نیرو معرف یک وبر است، بنابراین شار مغناطیسی کلی که از یک سطح می‌گذرد برابر تعداد خطوط نیرویی است که از آن سطح عبور می‌کند.

تعریف واحد القای مغناطیسی ـ در رابطه (۸ـ۱۰) φ برحسب وبر، B برحسب تسلا و A برحسب مترمربع است و براساس همین رابطه است که تسلا، واحد القای مغناطیسی تعریف می‌شود:

$$1(T) = \frac{1(Wb)}{1(m^2)} \qquad (۸-۱۲)$$

یعنی: تسلا القای مغناطیسی یکنواختی است که اگر در صفحه‌ای به مساحت یک مترمربع و در راستای عمود بر صفحه توزیع گردد، شار مغناطیسی که از آن سطح می‌گذرد برابر یک وبر باشد.

در دستگاه واحدهای قدیمی سانتیمتر ـ گرم ـ ثانیه (cgs) که در بخش ۲ به آن اشاره کردیم، واحد شار مغناطیسی ماکسول است و B در این دستگاه برحسب $\frac{\text{ماکسول}}{\text{سانتیمتر مربع}}$ یا «گوس[۳]» بیان می‌شود

برای مقایسه واحدهای دستگاه جدید SI با واحدهای cgs که در کتابهای فیزیک قدیم نوشته شده است یادآور می‌شویم که:

$$\text{گوس } 1 = 1 \frac{\text{ماکسول}}{\text{سانتیمتر مربع}}$$

و

$$\text{تسلا } 1 = 1 \frac{\text{وبر}}{\text{مترمربع}}$$

پس

$$\text{گوس } 10^4 = 1 \text{ تسلا}$$

و

$$\text{ماکسول } 10^8 = 1 \text{ وبر}$$

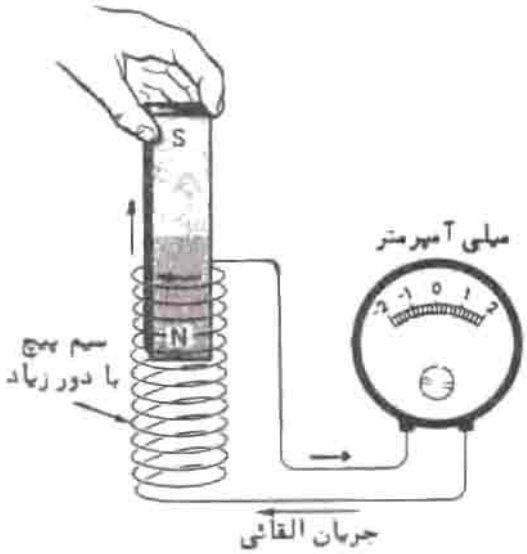
جریانهای القائی

در سال پیش ضمن بیان آزمایشهای فارادی برای تولید جریان الکتریسیته به وسیله مغناطیس دیدیم هرگاه شار یافلوی مغناطیسی که از یک سیم‌پیچ می‌گذرد تغییر کند در سیم‌پیچ جریان الکتریکی به

۱ـ نیوتن بر متر آمپر از رابطه $F = qVB$ که در فیزیک سال سوم با آن آشنا شده‌اید نتیجه می‌شود زیرا $B = \frac{F(N)}{q(C).V\left(\frac{m}{s}\right)}$ و $\left(\frac{C}{s}\right)$ برابر آمپر است.

۲ـ به افتخار Wilhelm Weber (۱۸۹۰ـ۱۸۰۴ میلادی)

۳ـ Gauss



شکل ۸-۸- نمونه آزمایش فارادی برای ایجاد جریان‌القائی

نام جریان القائی تولید می‌شود. نمونه‌ای از آزمایش فارادی‌درشکل (۸ ـ۸) به‌منظوریادآوری نمایش دادەشده است:

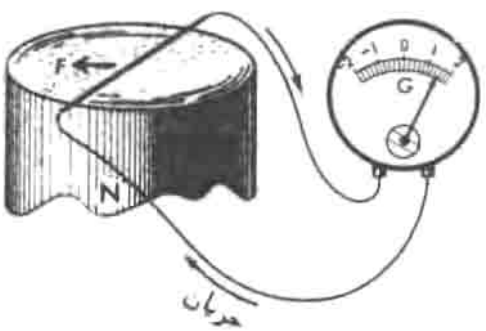
وقتی‌که قطب N آهن‌ربا مطابق شکل،وارد سیم‌پیچ می‌شود عقربه میلی‌آمپرمتر به یك طرف (مثلا به‌طرف راست) منحرف می‌گردد وهنگامی‌که قطب N آهن‌ربا از آن خارج می‌شود، عقربه میلی‌آمپر متر به طرف دیگر (طرف چپ) منحرف می‌گردد.

پرسش ۸-۳- اگربه‌جای قطب N آهن‌ربا قطب S آن‌را درسیم‌پیچ وارد وسپس خارج سازیم انحراف عقربه میلی‌آمپرمتر چگونه خواهد بود.

بدیهی است اگر آهن‌ربا را ثابت نگاهداشته و سیم‌پیچ‌را به‌آن نزدیك یا ازآن دورکنیم بازهم جریان القائی تولیدمی‌شود. دراین آزمایش،جریان القائی درائر حرکت نسبی سیم‌پیچ وآهن‌ربابه‌وجود می‌آید وهنگامی‌که این دونسبت به‌هم ساکن باشند جریان القائی تولید نمی‌شود.

ازنظر علمی می‌توان گفت: هرگاه شارمغناطیسی مغناطیسی‌که ازیك‌مدار بسته الکتریکی می‌گذردتغییر کند درمدار نیروی محرکه القائی ایجاد می‌شود واین نیروی محرکه، سبب برقرار شدن جریان القائی‌درمدار می‌گردد.

این کیفیت‌را می‌توان بایك آزمایش ساده که درشکل (۸ ـ۹) مجسم شده است نشان داد[1]: یك تکه‌سیم راست راکه ازدوسر توسط سیمهای رابط‌به یك میلی‌آمپرمتر حساس متصل است با دست گرفته وبالای قطب N یا قطب S یك آهن‌ربای قوی در جهتهای‌مختلف‌حرکت‌می‌دهیم. اگر سیم‌رادرراستای افقی ازراست به‌چپ حرکت دهیم جریان القائی در مدار درجهتی خواهد بودکه روی‌شکل نشان داده شده است، واگر سیم‌را ازچپ به راست (در خلاف جهت حرکت نخست) به حرکت درآوریم جهت جریان درمدار معکوس خواهدشد، ولی اگرسیم را



شکل ۸-۹- آزمایش دیگری برای ایجاد جریان القائی

۱- نظیر این آزمایش را درکتاب‌فیزیك سال‌سوم به‌صورت حرکت یك سیم بین دوقطب N و S دیده‌اید

در راستای قائم موازی با خطوط نیروی میدان مغناطیسی به‌طرف بالا یاپائین‌حرکت دهیم جریانی در مدار تولید نمی‌شود. به عبارت دیگر، نیروی محرکه القائی وقتی به‌وجود می‌آیدکه تعدادخطوط القایی‌که ازمدار بسته می‌گذرند تغییر کند.

پرسش ۸-۴ - بااستفاده ازدستورسه‌انگشت دست راست فلمینگ (که با آن آشنایی دارید) چگونه می‌توان دراین آزمایش جهت جریان القائی را درسیم معین‌کرد؟

پرسش ۸-۵ - ایجاد نیروی محرکه القائی معرف این است‌که یك مقدار انرژی الکتریکی در مدار تولید می‌شود. منبع تولید این‌انرژی چیست؟

نیروی محرکه القائی

می‌دانیم هرگاه بار الکتریکی q با تندی ثابت v در یك میدان مغناطیسی‌که چگالی شار مغناطیسی (القای مغناطیسی) آن B است حرکت کند براین بار الکتریکی نیرویی وارد می‌شودکه‌آن را ازمسیر اولیه خود منحرف می‌کند. اندازه این نیرو هنگامی‌که بار q عمود برراستای خطوط‌القای مغناطیسی حرکت می‌کند از رابطه زیر حساب می‌شود:[1]

$$F = Bqv \qquad (۱۳-۸)$$

و راستای نیروی $\vec{F}$ نیز عمود بر راستاهای $\vec{B}$ و $\vec{v}$ است.

وقتی‌که یك سیم منفرد، در میدان مغناطیسی طوری حرکت می‌کندکه خطوط نیروی میدان قطع می‌شوند، هریك ازبارهای الکتریکی درون اتمهای سیم‌تحت‌تأثیر یك نیروی F قرارمی‌گیردکه موازی باسیم است. چون دریك جسم هادی، فقط‌الکترون‌های آزادمی‌توانندحرکت‌کنند، بنابراین‌الکترونهای آزاد سیم‌که دارای بارمنفی هستند تحت‌تأثیرنیروی F، حاصل از حرکت بار در میدان، به یك سر سیم منتقل شده درآنجا پتانسیل منفی به‌وجودمی‌آورند و درنتیجه در سر دیگر سیم پتانسیل مثبت به‌وجود می‌آید ومیان دو سرسیم اختلاف پتانسیل برقرار می‌شود. اگر جسم هادی به جای سیم فلزی، یك مایع یاگاز یونیزه باشد، یونهای منفی آن به یك طرف و یونهای مثبت آن به طرف دیگر حرکت می‌کنند.

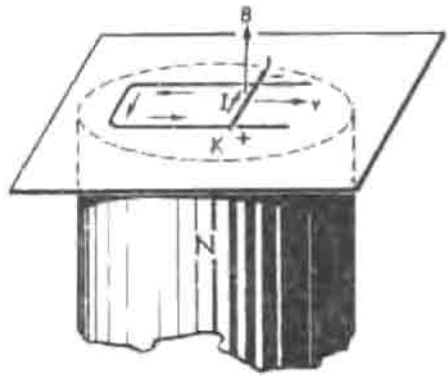
اینك درنظر بگیریم که یك قطعه سیم راست روی یك‌سیم دیگر به شکل U قرارگرفته است وبه آسانی می‌تواند روی‌آن بلغزد و این مجموعه مدار بسته‌ای‌را تشکیل می‌دهد[2] اگراین مجموعه‌رامطابق شکل (۸-۱۰) درمیدان مغناطیسی B قرار دهیم وقطعه سیم راست‌را درجهتی‌که درشکل نشان داده شده است روی هادی U تغییر مکان دهیم اختلاف پتانسیلی‌که در دوسرآن ایجاد می‌شود الکترونها را درمدار به‌حرکت در می‌آورد و بدین‌ترتیب جریان القائی تولید می‌شود. به عبارت دیگر، هادی متحرك درمیدان مغناطیسی به صورت یك منبع نیروی محرکه درمی‌آید.

جهت جریانی‌که درشکل نشان داده‌شده‌است

---

۱ - به‌بخش ۶ کتاب فیزیك سال‌سوم مراجعه‌کنید.

۲ - بدیهی است سیمها بدون روپوش هستند به‌طوری‌که بین‌آنها تماس الکتریکی برقرار است.



شکل ۸ـ۱۵ـ ایجاد جریان القائی در اثر حرکت یك هادی درمیدان مغناطیسی دراین شکل جهت حرکت الکترونها درمدار نشان دادهشده است.

جهت حرکت الکترونهاست که در خلاف جهت قراردادی جریان است.

نیروی محرکهای که بدینسان در یك هادی بهطول l ایجاد میشود معرف مقدار کاری است که واحد بارالکتریکی هنگام جریانازیكسر هادیبهسر دیگرآن انجام میدهد. چون کار، برابر حاصلضرب نیرو درتغییرمکان است بنابراین کار نیروی:
$F=Bqv$ درتغییر مکان l برابراست با:

$$W=Bqvl$$

اگر دو طرف این رابطه رابر q تقسیم کنیم خواهیم داشت:

$$\frac{W}{q}=Bvl$$

$\frac{W}{q}$ چنانکه گفتیم کار انجام یافته برایواحد بار الکتریکی، یعنی نیروی محرکه القائی است، بنابراین:

$$E=Bvl \qquad (۸-۱۲)$$

E نیروی محرکه القائی است که با اختلاف پتانسیل دوسرقطعه سیم متحرك برابر است.

در دستگاه واحدهای بینالمللی (SI)، E برحسب ولت و B بر حسب تسلا و v برحسب متر برثانیه و l برحسب متر بیان میشود.

پرسش ۸ ـ۶ـ آیامیتوانبرای تولیدجریان القائی، سیمرا ثابتنگاه داشت وآهنرباراابهحرکت درآورد؟

مثال ـ اگر سیم راستی بهطول ۲۵ سانتیمتر باتندی ثابت ۴۵متر برثانیه دریك میدانمغناطیسی یکنواخت به شدت ۰/۲۰ تسلا، عمود بر راستای خطوط نیروی میدان حرکت کند نیروی‌محرکه القائی که درآن تولید میشود چندولت خواهدبود؟

داریم: $E=Bvl$

به‌ازاء $B=۰/۲۰T$ و $v=۴۵\frac{m}{s}$

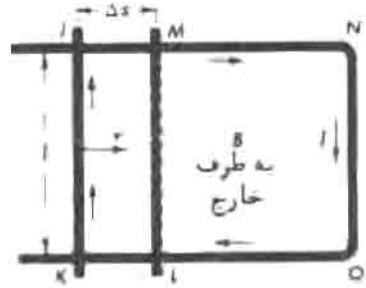
و $l=۰/۲۵m$

$$E=۰/۲۰\times۴۵\times۰/۲۵=۲/۲۵V$$

قانون فارادی ـقانون فارادیدربارهٔ نیروی‌محرکه القائی‌چنین‌بیان‌می‌شود[1]: **نیروی محرکه القائی که در اثر تغییرشار مغناطیسی در یك مدار تولید می‌شود برابر است با اندازه تغییر شار مغناطیسی در واحد زمان.**

برای توضیح این قانون، دوباره حرکت یك هادیرا درمیدان مغناطیسی مطابق شکل(۸ـ۱۱)

۱ـ به‌بخش ۵ کتاب فیزیك سال سوم‌مراجعه شود.



شکل ۸-۱۱- تغییر شار مغناطیسی سبب ایجاد جریان القائی می‌شود.

در این شکل جهت حرکت الکترونها نسبت داده شده است و جهت جریان قراردادی خلاف جهت حرکت الکترونهاست

روی سیمی به شکل JL جداگانه درنظر می‌گیریم. فرض کنیم قطعه سیم متحرك با سرعت v مطابق شکل حرکت کند. درلحظه‌ای که این قطعه سیم در وضع JK است سطحی که شار مغناطیسی از آن می‌گذرد JKON است. اگر مساحت این سطح را به A_1 نمایش دهیم شار مغناطیسی φ_1 که در این لحظه ازآن می‌گذرد برابر $B . A_1$ است.

پس از گذشت زمان کوتاه Δt، قطعه سیم متحرك به‌وضع ML می‌رسد و در این لحظه، شار مغناطیسی φ_2 که از مدار بسته MLNO می‌گذرد برابر $B . A_2$ است. بنابراین تغییر شار مغناطیسی درمدت Δt برابر است با:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$$

ونیروی‌محرکه‌القائی طبق‌قانون فارادی‌برابر است با:

$$E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad \frac{(\text{وبر})}{\text{ثانیه}} \quad (\text{ولت}) \qquad (۸-۱۵)$$

پرسش ۸-۷- چگونه‌می‌توان رابطه‌اخیررا مستقیماً از فرمول $E = Bvl$ بدست آورد؟

یادآوری ۱ - تعریف «وبر» (واحد شار مغناطیسی در دستگاه بین‌المللی واحدها) از رابطه (۸-۱۵) نتیجه گرفته می‌شود. زیرا داریم: $\Delta\varphi = E . \Delta t$ ، به ازاء $E = 1$ ولت و $\Delta t = 1$ ثانیه $\Delta\varphi = 1$ وبر خواهدشد. بنابراین وبر واحد شار مغناطیسی چنین تعریف می‌شود:

وبر شار مغناطیسی است‌که چون از مداری که فقط شامل یك‌حلقه است بگذرد وبه‌طور یکنواخت‌کم شود تا درمدت یك ثانیه به صفر برسد نیروی الکترو-موتوری حاصل از تغییر شار در آن مدار معادل یك ولت باشد.

یادآوری۲- دررابطه $E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ اگر زمان Δt بزرگ باشد E نیروی محرکه القائی متوسط بین دولحظه t و $t + \Delta t$ است یعنی:

$$\overline{E} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

($\overline{E}$ نمایش نیروی محرکه القائی متوسط است). اگر زمان Δt کوچك وکوچکتر شود به‌طوری‌که‌به صفر میل‌کند تغییرشار $\Delta\varphi$ نیز به سمت صفر میل می‌کند و نسبت $\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ به‌سمت‌حدی‌میل‌می‌نماید که بنا به تعریف مشتق شار مغناطیسی نسبت به زمان است. این‌حدکه آن را به $\frac{d\varphi}{dt}$ نمایش می‌دهیم معرف قدر مطلق نیروی محرکه القائی در لحظه t است یعنی:

$$E = \frac{d\varphi}{dt} \qquad (۸-۱۶)$$

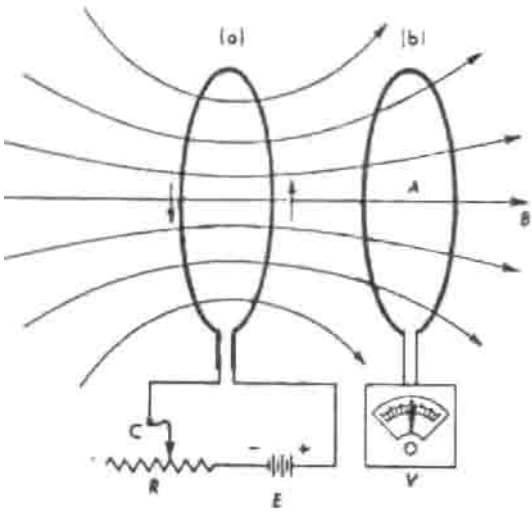
جهت نیروی محرکهٔ القائیـ نیروی محرکه القائی هم‌جهت باجریان القائی است وجهت آن، چنان‌که می‌دانیم، همواره چنان است که مانع تغییر شار مغناطیسی می‌شود (قانون لنز[1]). جهت نیروی محرکه القائی دریك سیم راست ازدستور سه‌انگشت دست راست معین می‌شود. معمولا برای نشان‌دادن قانون لنز ، نیروی‌محرکه القائی را به صورت زیر نمایش می‌دهند.

$$E=-\frac{d\varphi}{dt} \qquad (۱۷-۸)$$

علامت منها که جلو $\frac{d\varphi}{dt}$ آمده‌است‌دراندازه E مؤثر نیست وفقط معرف قانون لنز است.

پرسش ۸ـ۸ ـ اگر مداری‌که درآن جریان القائی تولید می‌شود دارای مقاومت الکتریکی R باشد شدت جریان‌دراین مدار ازچه رابطه‌ای‌حساب می‌شود؟

تولید جریان القائی به‌روشهای دیگر ـ رابطه $\varphi=B\,.\,A$ نشان‌میدهدکه‌اگرهریك‌ازدوعامل‌Aیا‌B تغییرکند شارمغناطیسی نیزتغییرمی‌نماید وتغییرشار طبق قانون‌فارادی‌سبب ایجاد جریان‌القائی‌می‌شود. در مثالی‌که بیان شد، حالت خاصی‌را درنظرگرفتیم که شار مغناطیسی در اثر حرکت یك سیم در میدان مغناطیسی یا به‌عبارت دیگر دراثر تغییر سطح مدار تغییر می‌کند. مواردی هم هست که تغییر شار مغناطیسی دراثرتغییرشدت میدان حاصل می‌شود و قانون فارادی دراین موارد نیزصادق است:



شکل ۸ـ۱۲ـ وقتی‌که شدت جریاد در مدار (a) تغییر می‌کند میدان مغناطیسی اطراف (a) و در نتیجه قلوی مغناطیسی که از سطح حلقه (b) می‌گذرد تغییر می‌کند و در مدار این حلقه جریاد القائی تولید می‌شود

شکل(۸ـ۱۲)دومدارحلقه‌ای‌شکل(a)و(b) را نشان می‌دهدکه روبه‌روی هم‌قرارگرفته‌اند حلقه (a) متصل به‌باتری E و رئوستای R است و حلقه (b)وصل به‌یك میلی‌ولتمتر می‌باشد وقتی‌که ازمدار (a) جریانی به‌شدت I می‌گذرد دراطراف آن‌میدان مغناطیسی به‌وجود می‌آیدکه شدت آن در هرنقطه ازمیدان متناسب باشدت جریان I است و مقداری از این شار مغناطیسی از سطح حلقه (b) می‌گذرد. هرگاه باکم کردن مقاومت رئوستا شدت جریان در مدار(a) افزایش یابد، شار مغناطیسی حاصل از(a) وشار مغناطیسی که از سطح (b) می‌گذرد افزایش می‌یابد ودرمدتی‌که شار تغییرمی‌کند نیروی‌محرکه القائی درمدار (b) به‌وجود می‌آید که میلی‌ولتمتر

۱ـ به‌بخش ۵ کتاب فیزیك سال‌سوم مراجعه‌شود.

آن را نشان می‌دهد. اگر با تغییر مقاومت رئوستا شدت جریان درمدار (a) کاهش یابد، شارمغناطیسی نیز کاهش می‌یابد و در مدار (b) جریان القائی در خلاف جهت حالت نخست تولید می‌گردد.

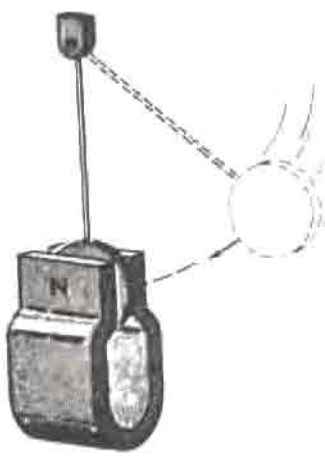
اگر مدار (b) فقط شامل یك حلقه باشد نیروی محرکه القائی در آن $E=-\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ است، ولی اگراین مدار شامل N حلقه باشد وهمان‌تغییر شار $\Delta\varphi$ در آن صورت‌گیرد نیروی محرکه القائی حاصل از این تغییر شار برابر است با:

$$E=-N\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \qquad (۸-۱۸)$$

می‌توان‌به‌جای حلقه اولی، سیم پیچ روپوش‌داری انتخاب کرد و به‌جای حلقه دوم، سیم پیچ روپوش‌دار دیگری را روی سیم‌پیچ اولی پیچید و به‌جای رئوستا یك کلید قطع و وصل خودکار قرار داد. وقتی‌که‌کلید قطع و وصل می‌شود در سیم‌پیچ دومی نیروی محرکه القائی به‌وجود می‌آیدکه هر چه تعداد حلقه‌های آن بیشتر و زمان قطع و وصل جریان کوتاه‌تر باشد اندازه این نیروی محرکه بیشتر است. چنین دستگاهی «بوبین القاء نامیده می‌شود[1].

پرسش ۸-۹- در دینامهای مولد جریان الکتریسیته(متناوب‌یایك طرفه) تغییر شارمغناطیسی در اثر تغییرچه عاملی حاصل می‌شود؟

جریانهای گردابی یا جریانهای فوکو - تا این‌جا فقط‌ایجادجریان‌القائی‌را دریك سیم متحرك درمیدان مغناطیسی بررسی کردیم. درپاره‌ای از دستگاههای الکتریکی مانند دینامویك قطعه فلزی در میدان مغناطیسی حرکت می‌کند و در پاره‌ای دیگر مانند ترانسفورماتوریك‌قطعه‌فلزی‌درمیدان‌مغناطیسی‌متغیر قرار دارد و در هر حال درون این قطعه‌های فلزی هم جریان القائی در مسیرهای بستهٔ دایره‌ای شکل به وجود می‌آید که آنها را جریانهای گردابی یا جریانهای فوکونامیده‌اند. جهت‌این جریانهاطوری است که میدانهای مغناطیسی حاصل از آنها بر میدانهای مغناطیسی اصلی طبق قانون لنز اثر می‌کند و مانع حرکت آنها می‌شود. این کیفیت را می‌توان با آزمایش ساده‌ای که در شکل ۸-۱۳ نشان داده شده است مجسم کرد. یك قرص مسی با

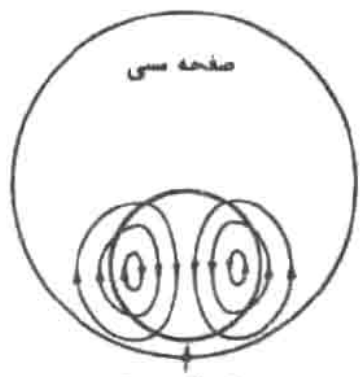


شکل ۸-۱۳- القاء جریان الکتریکی در قرص مسی که مانند یك پاندول در میدان مغناطیسی نوسان می‌کند سبب می‌شود که حرکت پاندول تسریع کند شود و متوقف گردد.

۱- نمونه بوبین القا معمولا درآزمایشگاه فیزیك موجود است. اگر دراختیار دارید از نزدیك با طرز کار آن آشنا شوید.

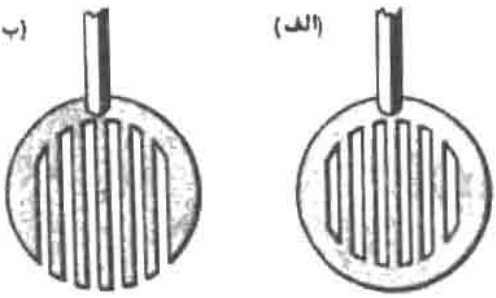
آلومینیومی که به‌صورت آونگ نوسان می‌کند وقتی وارد میدان مغناطیسی یك آهن ربا (معمولی یا الکتریکی) می‌شود حرکتش کند می‌شود و می‌ایستد.

علت این کیفیت چنان‌که گفتیم این است که در قرص متحرك مطابق شکل (۸ ـ ۱۴) جریانهای گردابی به وجود می‌آید و میدان مغناطیسی حاصل از این جریانها در خلاف جهت میدان مغناطیسی اصلی اثر می‌کند.



شکل ۸ـ۱۴ـ ایجاد جریانهای گردابی در یك قرص مسی متحرك در میدان مغناطیسی

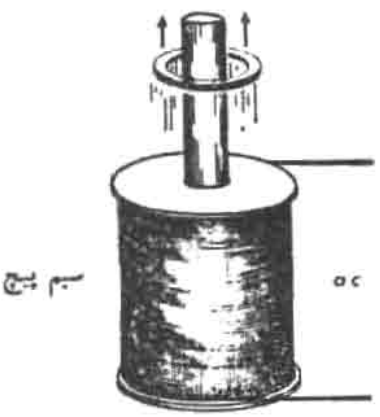
اگر قرص مسی مطابق شکل (۸ ـ ۱۵ـالف) شکاف‌دار ساخته شود، وقتی که قرص ضمن حرکت آونگی خود وارد میدان مغناطیسی می‌شود در تیغه‌های قائم بین شکافها جریانهای القائی به وجود می‌آید و میدان حاصل از این جریانها سبب می‌شود که قرص به‌آرامی و دیرتر از حالت اول بایستد ولی اگر شکافها مانند شکل (۸ ـ ۱۵ـب) بازباشند، هر یك از تیغه‌ها مانند یك مدار بازعمل می‌کند و جریان القائی قوی در آن تولید نمی‌شود، در نتیجه قرص مدت درازی مانند یك آونگ به‌حرکت نوسانی خود ادامه می‌دهد.



شکل ۸ـ۱۵ـ قرص شکاف‌دار مسی برای نشان دادن جریانهای القائی گردابی

در شکل (۸ ـ ۱۶) آزمایش جالب دیگری برای نشان دادن تولید جریان القائی گردابی در اثر تغییر شار مغناطیسی نشان داده شده است که به آسانی می‌توان آن را در آزمایشگاه انجام داد.

درون یك سیم‌پیچ که ۴۰۰ یا ۶۰۰ حلقه دارد یك هسته آهنی بلند در راستای قائم قرار می‌دهیم و یك حلقه مسی یا آلومینیومی را نیزروی سیم‌پیچ می‌گذاریم به‌طوری که هسته آهنی درون حلقه نیز قرار گیرد، هرگاه سیم‌پیچ را به‌برق شهر وصل کنیم حلقه به‌طرف بالا پرتاب می‌شود و بالای



شکل ۸ـ۱۶ـ در اثر عبور جریان متناوب از سیم پیچ، حلقه مسی طبق قانون لنز به‌طرف بالا پرتاب می‌شود.

سیم‌پیچ معلق می‌ماند. در این آزمایش حلقه و سیم‌پیچ مانند یك ترانسفورماتور عمل می‌کندکه سیم‌پیچ مدار اولیه و حلقه مدار ثانویه آن را تشکیل می‌دهد و در هرلحظه جهت جریان القائی در حلقه طوری است‌که قطبهای همنام سیم‌پیچ وحلقه مقابل هم قرار می‌گیرند.

به این پرسشها پاسخ دهید

۱)- تعریف القای مغناطیسی (یا اندوکسیون مغناطیسی) چیست؟

۲)- چگونه می‌توان میدان مغناطیسی یکنواخت ایجادکرد؟ برای تولید میدان مغناطیسی یکنواخت و قوی چه بایدکرد؟

۳)- آیا بر بارالکتریکی q که دریك میدان مغناطیسی ساکن است نیرو وارد می‌شود؟ در صورتی‌که جواب منفی است چه شرطی باید باشد تا برآن نیرو وارد شود؟

۴)- جهت نیروی F وارد بریك الکترون را که دریك میدان مغناطیسی عمود بر خطوط نیروی میدان حرکت می‌کند با دستور سه انگشت دست چپ چگونه معین می‌کنند؟

۵)- اگر راستای حرکت یك ذره باردار عمود برراستای خطوط نیروی میدان مغناطیسی نباشد و این دو راستا باهم زاویه α بسازند اندازه نیروی وارد برذره باردار از چه رابطه‌ای حساب می‌شود؟

۶)- از موارد زیر کدامشان مولد جریان القائی هستند؟

الف- اتصال یك باتری به‌دوسر سیم حلقه‌ای شکلی که رو به‌روی سیم حلقه‌ای شکل دیگری قرار دارد.

ب- قطع اتصال باتری از دو سرسیم حلقه‌ای شکل مثال الف.

پ- حرکت دادن یك آهن‌ربا درون یك حلقه فلزی مسدود.

ت- حرکت دادن حلقه فلزی مسدود در میدان مغناطیسی یکنواخت به موازات خطوط نیروی میدان.

ج- نگاهداشتن حلقه فلزی در میدان آهن‌ربائی یکنواخت.

۷)- در نظر بگیرید که دو آهن‌ربای تیغه‌ای را ازیك سرشان گرفته‌ایم و آنها را در یك ارتفاع از سطح زمین در راستای قائم به‌فاصله نسبتاً دوری ازهم نگاهداشته‌ایم. هرگاه این دو آهن‌ربا را باهم رهاکنیم‌ویکی‌ازآنها به‌هنگام سقوط از درون مدارحلقه‌ای شکل بسته‌ای بگذرد کدام یك زودتر به‌سطح زمین می‌رسد، چرا؟

۸)- در نظر بگیریدکه دو رشته سیم دراز وباریك به‌طور موازی به‌فاصله r از یك دیگر

رابطه $B=\frac{\mu_0}{2\pi}\frac{i}{r}$ و $F=Bil$ نشان دهید نیرویی که هریك از این سیمهای حامل جریان بر روی یك متر از طول سیم دیگر وارد می‌سازد برابر است با:

$$\frac{F}{l}=2\times10^{-7}\frac{i_1 i_2}{r} \qquad (19-8)$$

و از روی این رابطه تعریف آمپر واحد شدت جریان راکه درسال قبل دیدید نتیجه بگیرید.

۹)- طرح ساده یك دینامو‌ی مولد جریان متناوب و یك دینامو‌ی مولد جریان یك طرفه را بکشید و طرزکار هریك را در چند سطر بنویسید و نمودارتغییرات نیروی محرکه آنها را در یك دور چرخش قاب رسم کنید.

۱۰)- چرا باآن‌که اصطکاك‌کم است، سیم‌پیچ یك دینامودرون‌آهن‌رابه‌آسانی نمی‌چرخد؟

۱۱)- یك ترانسفورماتور را طرح ریزی‌کنید که ازثانویه آن بتوان چند ولتاژ مختلف گرفت.

۱۲)- چرا از ترانسفورماتور نمی‌توان در جریان پیوسته استفاده کرد؟

این مسئله‌ها را حل کنید

۱ - از یك سیم راست و طویل جریان ثابتی به‌شدت ۸/۵ آمپر می‌گذرد. شدت میدان مغناطیسی حاصل از این جریان را در دونقطه A و B که فواصل آنها از سیم به‌ترتیب ۲ سانتیمتر و ۵ سانتیمتر است باهم مقایسه‌کنید.

۲- دوسیم درازومستقیم به‌فاصله ۷سانتیمتر ازیك دیگر موازی هم قرارگرفته‌اند وشدت جریانی برابر۱۵آمپرازهریك ازآنها می‌گذرد. نقطه O در فاصله‌میان دوسیم طوری قرارگرفته است‌که فاصله‌آن ازیکی ازسیمها ۲ سانتیمتر وازدیگری ۵ سانتیمتر است شدت میدان مغناطیسی در نقطه O را در دوحالت زیر حساب کنید.

الف- جهت جریان در هر دو سیم یکی است

ب- جهت جریان در دوسیم مخالف یك دیگر است.

۳- یك رشته سیم مسی روپوش‌دار به طول ۲۸ متر را به‌صورت یك سیم‌پیچ مسطح در می‌آوریم به‌طوری که قطرآن ۸ سانتیمتر باشد. اگرجریانی به‌شدت ۴/۵ آمپر ازآن بگذرانیم شدت میدان در مرکز این سیم‌پیچ چند تسلا خواهد بود؟

جواب: تقریباً $7/9\times10^{-3}T$

۴- ازیك سولنوئیدکه ۴۵۰ حلقه دارد جریانی به شدت ۳/۷ آمپرعبور می‌دهیم. اگرطول سولنوئید۴۵ سانتیمتر باشد شدت میدان را در وسط سولنوئید حساب کنید.

۵- از یك سولنوئید به‌طول ۷۵ سانتیمتر هرگاه جریانی به‌شدت ۸ آمپربگذرد و دروسط آن میدانی به شدت $۲/۰ \times ۱۰^{-۲}$ تسلاتولید می‌شود. این سولنوئید دارای چند حلقه است؟

جواب: ۱۴۹۲ حلقه

۶- سیمی بطول ۱/۵ متر باسرعت ثابت ۲۴ متر برثانیه دریك میدان مغناطیسی به‌شدت ۵×۱۰^{-۲} تسلا درراستای عمود برخطوط میدان حرکت می‌کند اختلاف پتانسیل القایی دو سر این سیم را حساب کنید.

جواب: ۱/۸ ولت

۷- یك سیم‌پیچ مسطح به قطر ۱۴cm که دارای ۹۰ حلقه است در یك میدان مغناطیسی به شدت ۰/۲۵T با سرعت ۱۲۰۰ دور بر دقیقه حول یکی از قطرهای خود که عمود بر راستای خطوط نیرو است می‌چرخد. ماکزیمم نیروی محرکه القائی ایجاد شده در سیم پیچ را حساب کنید.

جواب: ۴۳/۵V

۸- یك قاب مستطیل شکل، به ابعاد ۱۸ در ۱۲ سانتیمتر از ۲۰۰ دور سیم روپوش‌دار تشکیل یافته است. این قاب در میدان مغناطیسی زمین که شدت آن ۵×۱۰^{-۵} تسلا است حداقل با چه سرعتی باید بچرخد تا اختلاف پتانسیل ماکزیموم دوسر آن ۸ ولت بشود؟

جواب: تقریباً $۵/۹ \times ۱۰^{۳}$ دور برثانیه

پاسخ به‌پرسشهای متن‌بخش ۸

۸-۱)- راستای بردار $\vec{B}$ بر سطح مدار عمود است و سوی‌آن چنان که می‌دانید از دو دستور زیر معین می‌شود.

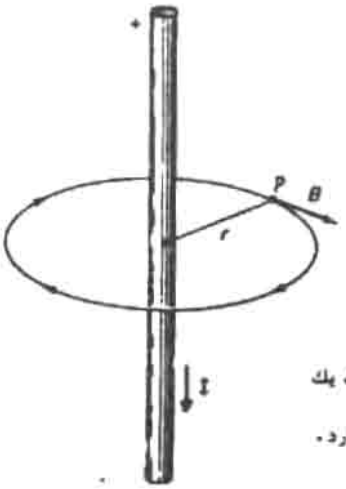
۱- اگر ناظری درجهت جریان‌قرارگیرد به‌طوری‌که مدارحامل جریان میان دوبازوی‌او باشد سوی‌بردار B از دست راست به‌طرف دست چپ او خواهد بود.

۲- دستور دست راست: اگرسیم حامل جریان طوری در دست راست قرارگیردکه‌انگشت شست در طول سیم در جهت جریان واقع شود چهار انگشت خمیده دیگر سوی بردار $\vec{B}$ را نشان می‌دهند.

۸-۲)- راستای بردار B در هرنقطه اطراف سیم مماس برخط نیرویی است که از آن

نقطه می‌گذرد و جهت آن با دستورهایی که در بالا بیان شد مشخص می‌گردد(شکل ۸-۱۷) واندازه آن در نقطه‌ای به فاصله r از یك سیم راست که از آن جریانی به‌شدت i می‌گذرد (ونزدیك به سیم) برابر است با:

$$B = 2k\frac{i}{r} = 2\times 10^{-7}\frac{i}{r}$$



شکل ۸-۱۷- القای مغناطیسی $\vec{B}$ در نقطه‌ای نزدیك یك سیم راست که از آن جریان الکتریسیته می‌گذرد.

۸-۳)- درست خلاف جهت حالتی که قطب N حرکت داده می‌شود.

۸-۴)- انگشتهای شست و نشانه و میانی دست راست خود را طوری نگاه می‌داریم که دو به دو بر هم‌عمود باشند، اگر انگشت نشانه را درجهت میدان‌وانگشت‌شست را درجهت حرکت سیم بگیریم انگشت میانی جهت‌جریان القائی را درسیم نشان می‌دهد.

۸-۵)- انرژی مکانیکی حاصل از حرکت دادن وضع سیم یا آهن‌ربا نسبت به‌یك دیگر. بدیهی است هرچه سرعت‌حرکت سیم یا شدت میدان مغناطیسی بیشتر باشد کارانجام یافته بیشتر و در نتیجه نیروی محرکه القائی ایجاد شده‌زیادتر است.

۸-۶)- بلی، زیرا جریان القائی در اثر تغییر شار مغناطیسی تولید می‌شود و تغییرشار مربوط به‌حرکت نسبی سیم و میدان است.

۸-۷)- اگر اندازه تغییر مکان سیم را در زمان Δt به Δs نمایش دهیم $v=\frac{\Delta s}{\Delta t}$ خواهد بود بنابراین $E=B\frac{\Delta s}{\Delta t}\cdot 1$. از طرف دیگر $\Delta A=\Delta s\cdot 1$ برابر تغییر سطح مداراست.

بنابراین

$$E=\frac{B\cdot\Delta A}{\Delta t}=\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

۸-۸)- از رابطه $i=\frac{E}{R}$ یا $i=\frac{1}{R}\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$

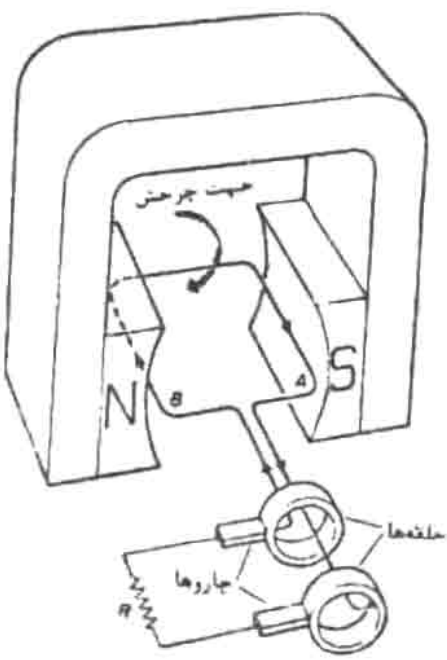
۸-۹)- در اثرتغییرزاویه α بین راستای خطوط نیروی میدان مغناطیسی وراستای خط عمود بر سطح قاب. زیرا در رابطه کلی $\varphi=B\cdot A\cos\alpha$، اندازه‌های B (شدت میدان) و A (سطح قاب مستطیل شکل حامل سیم پیچ) ثابت هستند و تنها زاویه α است‌که در اثرچرخیدن قاب تغییر می‌کند. (به‌بخش ۵ کتاب فیزیك سال سوم مراجعه شود)

۹

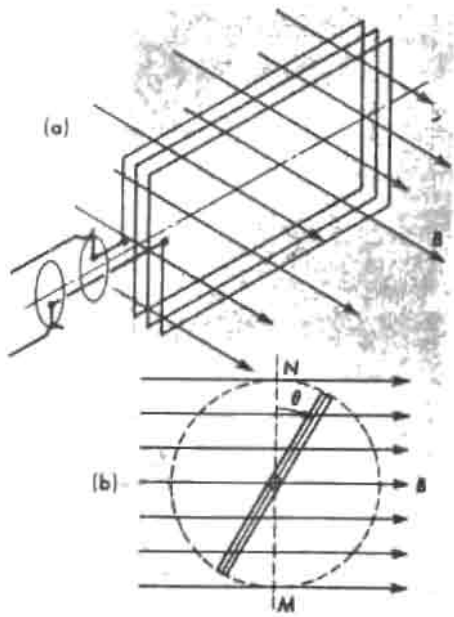
جریان متناوب

در سال پیش ضمن بحث دربارهٔ دینامو‌ی مولد جریان متناوب گفتیم که جریان متناوب جریانی است کـه اندازه و سوی نیـروی محرکه آن به طور تناوبی تغییر می‌کند. عامـل تـولید ایـن جریان چنان که می‌دانیم تغییرات متنـاوب شار مغناطیسی در سیم‌پیچهایی است که با خود در میدان مغناطیسی بکنواخت با سرعت زاویـه‌ای ثابت می‌چرخند وبا این که سیم‌پیچها ساکن هستند و قطبهای آهن‌ربا با سرعت زاویه‌ای ثابت درمقابل آنها می‌چرخند. دراین بخش نخست اساس ایجاد جریان متناوب را برپایه علمی‌تری بررسی خواهیم کرد و سپس مدارهای جریان متناوب را مورد مطالعه قرار خواهیم داد.

اساس تولید جریان متناوب. در نظـر بگیریـم که سیم پیچ قاب مانند یك دینامو‌ی ساده مولد جریان متناوب، بین دو قطب آهن‌ربـا، حـول محوری که عمودبرخطوط نیروی‌میدان است‌با سرعت زاویه‌ای ثابت ω می‌چرخد (شکل ۹ـ۱). می‌توانیم قاب را به‌صورت سطحی در نظر بگیریـم کـه در میدان مغناطیسی یکنواخت بـه دور محـور خود می‌چرخد و در اثر تغییـر شار مغنـاطیسی کـه از ایـن سطـح می‌گذرد نیروی محرکه القائی ایجادمی‌شود (شکل ۹ـ۲). برای محاسبهٔ نیروی محرکه این جریان، مبدأزمان(یعنی‌لحظه $t_0 = 0$)را لحظه‌ای‌می‌گیریم که سطح قاب بر خطوط نیـروی میدان مغناطیسی عمود است. در این حـالت شار مغنـاطیسـی که از سطح‌قاب می‌گذرد ماکزیمم است. پس از گـذشت



شکل ۹ـ۱ـ مولد ساده جریان متناوب



شکل ۹-۴- اساس تولید جریان متناوب.

زمان t قاب به‌اندازه زاویه $\theta = \omega t$ می‌چرخد و دراین حالت شارمغناطیسی‌که از سطح قاب‌می‌گذرد برابر است با:

$$\varphi = BA\cos\omega t \qquad (۱-۹)$$

که در آن B شدت میدان مغناطیسی و A مساحت سطح قاب است. این شار مغناطیسی متغیر در هر دور سیم پیچ قاب نیروی محرکه القائی تولید می‌کند که اندازه آن، چنان که دیدیم از رابطه $E_1 = -\frac{d\varphi}{dt}$ حساب می‌شود و در صورتی که قاب شامل N دور سیم پیچ باشد نیروی محرکه کل القاء شده در سیم‌پیچ‌قاب برابر است با:

$$E = -N\frac{d\varphi}{dt} = NBA\omega\sin\omega t \qquad (۲-۹)$$

رابطه بالا نشان می‌دهدکه نیروی محرکه متناوب القا شده در سیم‌پیچی‌که با سرعت زاویه‌ای ثابت ω در یك میدان مغناطیسی یکنواخت می‌چرخد یك نیروی محرکه سینوسی به‌صورت زیر است

$$\boxed{E = E_m \sin\omega t} \qquad (۳-۹)$$

که در آن $E_m = NBA\omega$ نیروی‌محرکه ماکزیمم است. نیروی محرکه درلحظه‌هائی ماکزیمم می‌شود که $\sin\omega t$ ماکزیمم یعنی برابر ۱ باشد.

مثال- یك‌سیم‌پیچ مسطح‌به‌شکل قاب به‌ابعاد ۱۰/۰ سانتیمتر در ۲۰/۰ سانتیمتر که دارای ۶۰ دور سیم است با سرعت ۱۸۰۰ دور در دقیقه دریك میدان مغناطیسی یکنواخت به‌شدت ۰/۵۰ تسلا به دور محور خود که عمود برخطوط نیروی میدان است می‌چرخد. نیروی محرکه القائی ماکزیمم را درقاب حساب کنید.

داریم $E_m = NBA\omega$ (۴-۹)

به‌ازاء $N = 60$ و $B = 0/50\,T$ و

$$\omega = 2\pi f = 2 \times 3/14 \times \frac{1800}{60} = 188/4\,\frac{rad}{s}$$

۱- در درس‌ریاضی دیده‌ایدکه مشتق تابع $y = A\cos x$ نسبت به x برابر $y' = -A\sin x$ است اگر x خود تابعی‌ازیك‌متغیر دیگرمانند t باشدمشتق‌y نسبت به t چنین‌است: $y'_{(t)} = -A\sin x \cdot x'_{(t)}$. بنابراین $\frac{d\varphi}{dt}$ برابر است با: $-NBA\sin\omega t \cdot \omega = -NBA\omega\sin\omega t$

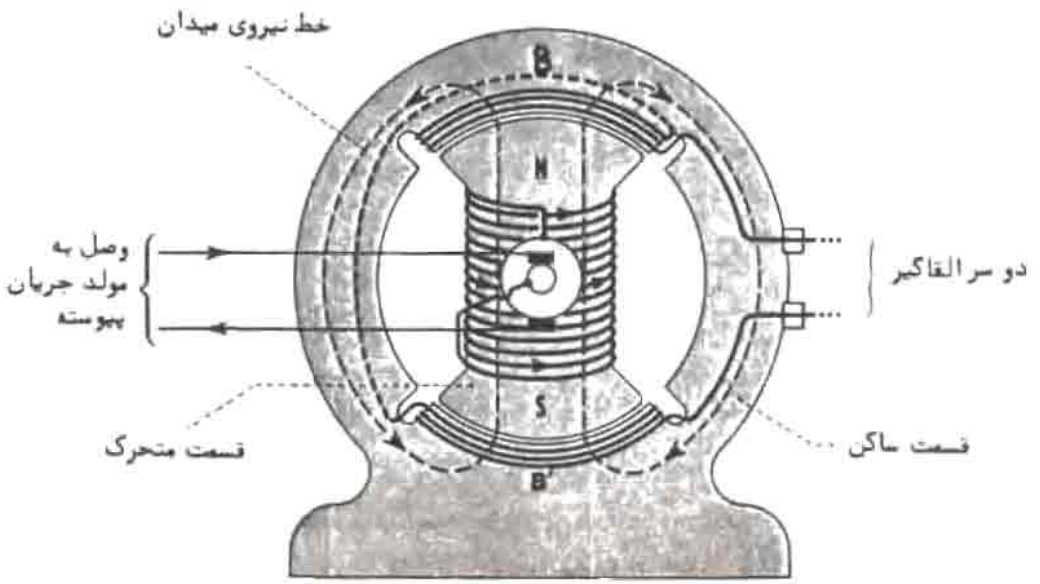
$$A = ۰/۱۰m \times ۰/۲۰m = ۰/۰۲۰m^۲$$

خواهیم داشت:

$$E_m = ۶۰ \times ۰/۵۰ \times ۰/۰۲۰ \times ۱۸۸/۴$$
$$\simeq ۱۱۳/۰V$$

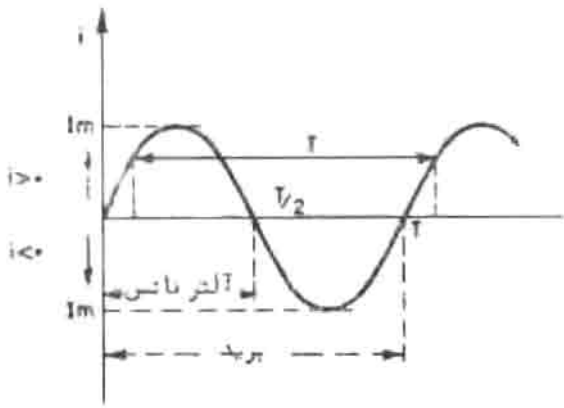
درمولدهای بزرگ جریان متناوب، یا «آلترناتور»ها، سیم‌پیچها (یا به‌عبارت دیگر القاگیر) ثابت است. و قطبهای آهنربا (القاکن) درمقابل آنها می‌چرخد. القاکن یك آهن‌ربای الکتریکی بسیار قوی است که دارای چندین جفت قطب N و S است. القاگیر نیز از چندین سیم پیچ تشکیل می‌شود که به طور متوالی (سری) به هم متصل هستند و جهت سیم پیچی آنها طوری است که نیروهای محرکه القاشده در آنها به‌هم اضافه می‌شوند. بدنه استوانه‌ای شکل آلترناتور (که سیم‌پیچها در شیارهای سطح داخلی آن پیچیده می‌شوند) از جنس آهن خالص است و مسیر خطوط نیروی میدان مغناطیسی نیز می‌باشد (به‌شکل ۹ ـ۳ مراجعه کنید). چون قابلیت نفوذ مغناطیسی آهن خیلی زیاد است شار مغناطیسی را به آسانی و به‌مقدار زیاد از خود عبور می‌دهد و درنتیجه نیروی محرکه القائی قوی تولید می‌شود. شکل (۹ ـ۳) طرح ساده‌ای از یك آلترناتور دو قطبی را نشان می‌دهد.

شدت جریان متناوب ـ جریانی که توسط یك آلترناتور در یك مدار الکتریکی فرستاده می‌شود جریان متناوب است. درچنین مداری شدت جریان لحظه‌ای

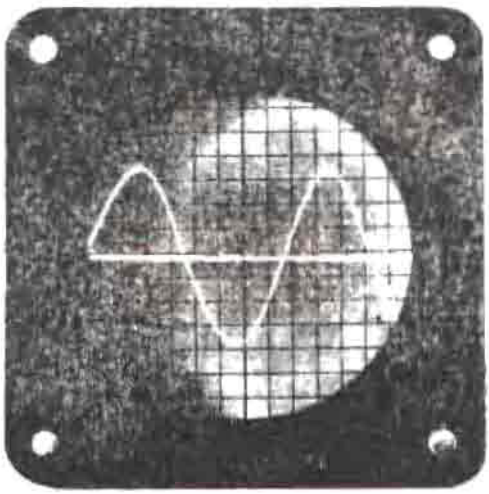


شکل ۹ ـ۳ ـ طرح ساده‌ای از یك آلترناتور دو قطبی

قسمت متحرك (القاء کن) یك آهن‌ربای الکتریکی دوقطبی است که توسط یك مولد جریان پیوسته کمکی تغذیه می‌شود و به‌وسیله یك توربین بخار یا توربین آب، یا موتور دیزل می‌چرخد. قسمت ساکن استوانه‌ای است از آهن خالص ورقه ورقه، که درون شیارهای آن دوسیم پیچ B و B' پیچیده شده است. خطوط نیروی میدان در هسته آهنی آهن‌ربای الکتریکی وبدنه آهنی آلترناتور مطابق شکل دور می‌زنند.



شکل ۹-۴- نمودار تغییرات رابطه
$i = I_m \sin\omega t$



شکل ۹-۵- نمودار تغییرات نیروی محرکه متناوب روی صفحه نوسان نگار الکترونیکی.

i، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$i = I_m \sin\omega t \qquad (۹-۴)$$

که در آن I_m شدت جریان ماکزیموم وابسته به نیروی محرکه ماکزیموم است.

رابطه (۹-۴) نشان می‌دهد که شدت جریان به صورت یك تابع سینوسی بازمان تغییر می‌کند و این تغییرات در فواصل زمانی $T = \frac{2\pi}{\omega}$ (زمان تناوب) عیناً تکرار می‌شود. بدیهی است تواتر یا فرکانس این جریان (یعنی تعداد دفعاتی که در هر ثانیه تغییرات متناوب جریان تکرار می‌شود) برابر $f = \frac{1}{T}$ است.

در شبکه برق سرتاسری کشورما، فرکانس جریان $f = ۵۰Hz$ است. شکل (۹-۴) نمودار تغییرات i را برحسب زمان t نشان می‌دهد و اگر یك دستگاه نوسان نگار الکترونیکی به‌چنین جریانی وصل شود بر روی صفحه آن نمودار سینوسی ظاهر می‌شود (شکل ۹-۵).

شکل (۹-۴) نشان می‌دهد که جریان در هر پرید دوبار تغییر جهت می‌دهد و مدتی که طول می‌کشد تا جریان تغییر جهت دهد برابر $\frac{T}{2}$ (نصف پرید) است. این مدت را آلترنانس گویند بنابراین در برق شهر که پرید آن $\frac{1}{50}$ ثانیه است، هر آلترنانس $\frac{1}{100}$ ثانیه طول می‌کشد.

پرسش ۹-۱- با توجه به رابطه (۹-۴) و شکل (۹-۴) بگوئید در چه لحظاتی از یك پرید، شدت جریان در مدار از لحاظ مقدار ماکزیموم و در چه لحظاتی صفر است؟

اثرهای جریان متناوب

در سال پیش دیدیم که جریان الکتریسیته دارای سه اثر گرمائی و شیمیائی و مغناطیسی است. در این

حا یاد آور می‌شویم که این سه اثر، خاص جریان پیوسته نیست بلکه در جریان متناوب هم ظاهر می‌شوند ولی تغییرات لحظه‌ای شدت جریان متناوب و تغییر جهت دادن دائمی آن به این اثرها کیفیت و خواص تازه‌ای می‌دهد که در جریان پیوسته دیده نمی‌شوند، به‌ویژه که جریان متناوب، چنان که خواهیم دید از مدار شامل خازن می‌گذرد درصورتی که جریان پیوسته نمی‌تواند ازچنین مداری بگذرد علاوه بر این جریان متناوب، برخلاف جریان پیوسته ثابت، می‌تواند در مدار خود یا درمدارهای مجاور این مدار، خود به‌خود نیروی محرکه القائی ایجاد کند. دراین‌جا پیش ازآن که به‌بحث در باره مدارهای جریان متناوب بپردازیم چند نتیجه از آثار سه‌گانه این جریان را یادآور می‌شویم. بدیهی است در مطالعه تجربی این آثار، از برق شهر که تواتر آن ۵۰ هرتز است استفاده می‌کنیم.

اثر شیمیایی جریان متناوبـ درسال گذشته دیدیم وقتی که جریان پیوسته ازیک الکترولیت می‌گذرد یونهای مثبت موجود در الکترولیت به طرف کاتد و یونهای منفی موجود درآن به‌طرف آند کشیده می‌شوند و در الکترودها واکنشهای شیمیایی صورت می‌گیرد که معمولاً منجر به متصاعد شدن گازها یا رسوب یک فلز در کاتد می‌شود.

پرسش ۹-۲ ـ جرم جسمی که در کاتد آزاد می‌شود با چه عواملی بستگی دارد؟

اگر جریان متناوب از الکترولیت بگذرد، الکترودی که دریک آلترنانس آند است در آلترنانس بعد کاتد می‌شود و برعکس، بنابراین:

ـ در الکترولیز آب اسیددار مخلوط قابل انفجاری از $H_2+\frac{1}{2}O_2$ در هردو الکترود ولتاژ متر حاصل می‌شود.

ـ درالکترولیز یک نمک، مانند سولفات‌مس، روی الکترودها می‌نمی‌نشیند، زیرا دریک‌آلترنانس مقداری فلز روی الکترودی که کاتد است می‌نشیند و در آلترنانس بعد که این الکترود آند می‌شود همین مقدار فلز از روی‌آن برداشته می‌شود.

پرسش ۹-۳ ـ چگونه می‌توان از جریان برق متناوب برای عمل‌الکترولیز استفاده کرد؟

اثر گرمایی جریان متناوب ـ می‌دانیم وقتی که جریان الکتریکی از یک هادی می‌گذرد قسمتی از انرژی الکتریکی با همهٔ آن در هادی به انرژی گرمائی تبدیل می‌شود. مثلاً انرژی گرمائی که در اثر عبور یک جریان پیوسته به‌شدت I در یک هادی به‌مقاومت R در زمان معین t تولید می‌شود چنان که می‌دانیم طبق قانون ژول از است با:

$$W = RI^2t \qquad (۵-۹)$$

(W برحسب ژول، R برحسب اهم و I برحسب آمپر و t برحسب ثانیه است)

چون انرژی گرمائی که بدین ترتیب در یک هادی تولید می‌شود بستگی به‌جهت جریان ندارد اگر از هادی جریان متناوب بگذرد مانند جریان پیوسته درآن گرما تولید می‌کند، به‌همین جهت تمام اسبابهای الکتریکی گرمادهنده، هم باجریان متناوب وهم باجریان پیوسته کار می‌کنند ولی قانون ژول که به‌صورت رابطه (۹-۵) خلاصه شده است به‌شرطی درمورد جریان متناوب به کار می‌رود که I «شدت جریان مؤثر» باشد و این شدت بر اساس قانون ژول به این صورت تعریف می‌شود:

شدت جریان مؤثر در جریان متناوب برابر با شدت جریان پیوسته‌ای است که در یک مقاومت الکتریکی معین ذهر پرید به‌یک اندازه گرما تولیدکند.

این شدت‌جریان مؤثر را با I_e نشان‌می‌دهند آزمایش ومحاسبه نشان می‌دهدکه شدت مؤثر یک جریان متناوب برابراست با $I_e=\frac{I_m}{\sqrt{2}}$ که در آن I_m شدت ماکزیمم است.

باید یادآور شویم که آن‌چه برای یک پرید صادق است برای تعداد کافی از پریدها هم صادق است وعملاً در مورد زمان غیرمشخص t نیزصدق می‌کند به‌شرط‌آن‌که زمان t نسبت به‌پرید T به‌قدر کفایت بزرگ باشد تا بتوان آن را محسوساً برابر مضرب کاملی از پرید درنظر گرفت.

شدت جریان مؤثر را چنان‌که می‌دانیم‌می‌توان با آمپرسنج حرارتی اندازه گرفت[1]. این آمپرسنج از ابتدا به وسیله جریان پیوسته مدرج می‌شود. با آمپرسنج با قاب متحرک که در اندازه‌گیری جریان پیوسته به‌کارمی‌رود نمی‌توان مستقیماًشدت جریان متناوب را اندازه گرفت مگر اینکه جریان توسط یک‌سوکننده‌ای‌که در خود آمپرسنج قرار داده می‌شود یک‌سوگردد.

نیروی محرکه مؤثر ـ بین نیروهای محرکه مؤثر و ماکزیموم نیز رابطه زیر برقرار است:

$$E_e=\frac{E_m}{\sqrt{2}}\approx 0/707E_m \qquad (9-6)$$

۲۲۰ ولت باشد نیروی محرکه ماکزیموم‌آن برابر است با:

$$E_m=E_e\sqrt{2}=220\times\sqrt{2}\simeq 220/0$$
$$\times 1/414\approx 311/0V$$

اثرهای مغناطیسی جریان متناوب ـ وقتی‌که‌جریان متناوب $i=I_m\sin\omega t$ از یک مدار می‌گذرد در اطراف‌آن القای مغناطیسی $\vec{B}$ به‌وجود می‌آید که اندازه وجهت‌آن مانند خود جریان به‌طور سینوسی تغییر می‌کند. مثلاً القای مغناطیسی در وسط یک سولنوئیدکه n دور سیم پیچ در واحد طول (یعنی درهرمتر) دارد. درهرلحظه t برابر است با:

$$B=4\pi\times 10^{-7}ni$$

و اندازه ماکزیمم آن برابر است با:

$$B_m=4\pi\times 10^{-7}nI_m$$

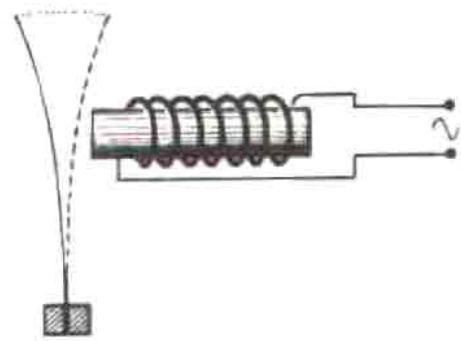
اگر هسته‌ای از آهن خالص درون سولنوئید قرار داده شود، درجهت‌میدان مغناطیسی حاصل از جریان آهن‌ربا می‌شود وقطبهای آن مرتباً همراه با جهت جریان عوض می‌شود. مثلاً اگر تواتر جریان ۵۰ هرتز باشد هریک از دوسر هسته آهنی در یک ثانیه ۵۰ بار قطب N و ۵۰ بار قطب S می‌شود. بدیهی است درلحظه‌ای یک سرهسته آهنی قطب N است سر دیگر آن قطب S می‌باشد.

اگر جلویکی ازاین‌قطبها مطابق شکل(۹-۷) تیغهٔ فولادی فنری نصب شود و طول آن طوری تنظیم گردد که تواتر ویژهٔ آن با تواتر ضربه‌های

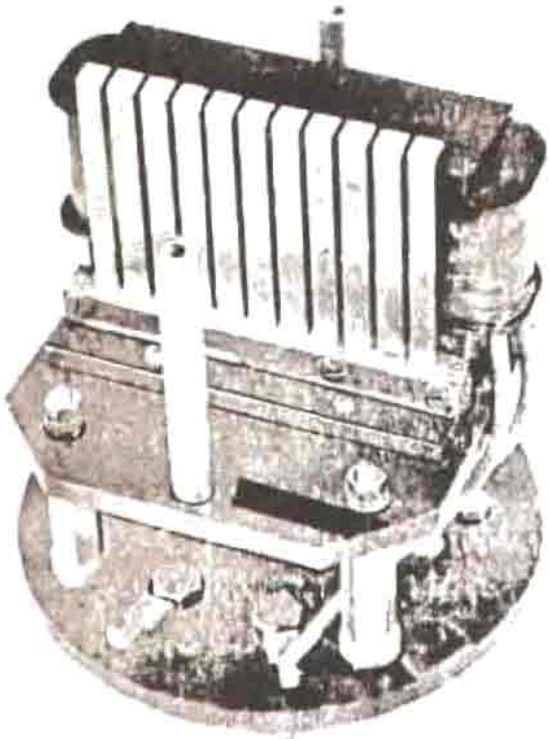
۱- به‌کتاب فیزیک سال‌سوم (بحث۴) مراجعه‌شود.

تیغه بنابه‌خاصیت رزونانس به‌شدت مرتعش می‌شود:
و بسته به‌جنس این تیغه دو حالت اتفاق می‌افتد

۱ـ اگر تیغه جلو آهن ربا از جنس فولاد نرم (یعنی فولادی‌که خاصیت آهن‌ربایی آن به‌سرعت از بین می‌رود) باشد درهر آلترناتس جذب قطب آهن‌ربا



شکل ۹-۶- ارتعاش یک تیغه فولادی به‌وسیله آهن‌ربای الکتریکی که ازآن جریان متناوب می‌گذرد.



شکل ۹-۷- نوسان سنج تیغه‌ای

می‌شود و بنابراین تواترآن درحال رزونانس برابر تعداد آلترناتسهای جریان در ثانیه (یعنی دو برابر فرکانس جریان) است. از این خاصیت در دستگاه نوسان‌سنج برای کنترل تواتر جریانهای متناوب استفاده می‌شود. شکل (۹-۷) درون یک نوسان‌سنج تیغه‌ای راکه دارای یازده تیغه مرتعش است نشان می‌دهد. وقتی که‌نوسان‌سنج به‌جریان متناوب متصل می‌شود فقط‌تیغه‌ای مرتعش می‌شود وحالت رزونانس پیدا می‌کندکه تواتر آن دوبرابر تواتر جریان برق باشد.

۲ـ اگر تیغه جلوآهن ربا از جنس فولادی باشدکه به‌شدت آهن‌ربا می‌شود، (یا به‌عبارت‌دیگر خود یک آهن‌ربا باشد) در آلترناتسهای متوالی متناوباً جذب و دفع می‌گردد. بنابراین تواتر ارتعاشات آن برابر تواتر جریان خواهد بود.

اثرمیدان مغناطیسی ثابت برجریان متناوبـدیدیم وقتی ازیک قطعه‌سیم مسی‌که دریک‌میدان‌مغناطیسی قرار دارد، جریان الکتریسه بگذرد،برآن نیرویی به‌نام نیروی الکترومانتیک وارد می‌شودکه سبب حرکت سیم درآن میدان می‌گردد. چون اندازه این نیرو متناسب با شدت جریان الکتریکی است اگر جریانی که از سیم می‌گذرد متناوب باشد نیروی الکترومانتیک وارد بر سیم نیز متناوب خواهد بود. بنابراین برقسمتی از مدار جریان متناوبکه در یک میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد، هنگام عبور

جریان، نیرویی وارد می‌شود که جهت آن در هر آنترنانس تغییر می‌کند. اگر این قسمت از مدار بتواند حرکت کند، در اطراف وضع تعادل خود با تواتری که برابر تواتر جریان است نوسان خواهد کرد. این کمیت را با آزمایشی که درشکل (۹ ـ ۸) دیده می‌شود می‌توان نشان داد: هرگاه قطب یك آهن‌ربا را به رشته بلند و قابل ارتعاش درون یك لامپ الکتریکی که با برق شهر روشن شده است نزدیك کنیم رشته ملتهب با تواتری که برابر تواتر جریان برق است مرتعش می‌شود.

پرسش ۹ ـ ۴ ـ با آشنائی که درباره نیروی الکترومانیتیك دارید، بگوئید اندازه آن وقتی که جریان متناوب است ازچه رابطه‌ای حساب می‌شود؟

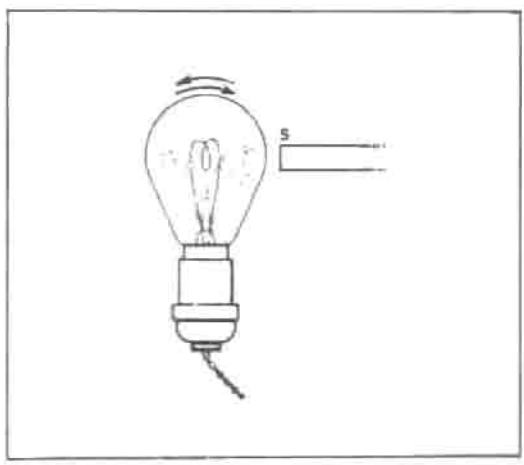
اثرخودالقائی

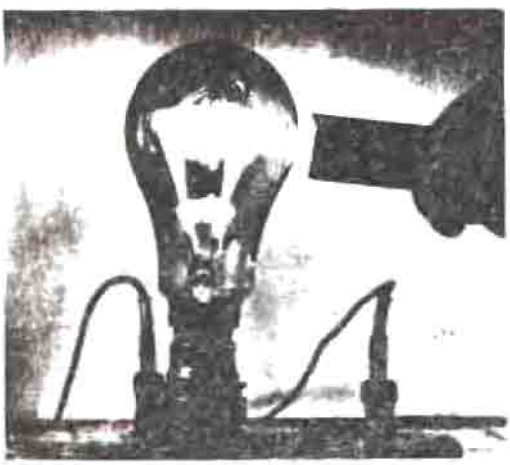
هرگاه دوسر یك سیم مسی دراز ومستقیم را به دوقطب یك باتری وصل کنیم، شدت جریان در مدار حاصل به‌سرعت بالا می‌رود در حدی که قانون اهم مشخص می‌کند ثابت میماند (شکل ۹ ـ ۹ الف.) اگر سیم را به صورت یك سیم پیچ در آوریم و به دو سر باتری وصل کنیم شدت جریان در آن کندتر بالا می‌رود (نمودار ب).

چنانچه یك هسته آهنی درون سیم پیچ قرار دهیم تا به‌صورت یك آهن‌ربای الکتریکی درآید و دو سر آن را به باتری وصل نمائیم شدت جریان مطابق نمودار پ بازهم کندتر بالا خواهد رفت.

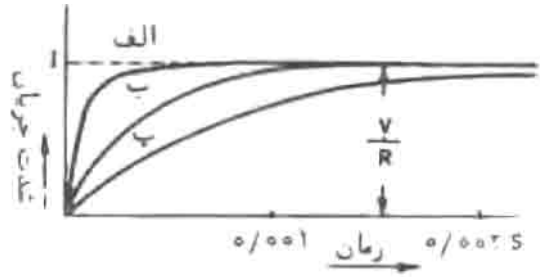
علت این که در دو حالت اخیر شدت جریان دیرتر از حالت نخست به‌حد خود می‌رسد این است که درسیم‌پیچ درلحظهٔ اتصال به‌باتری نیروی‌محرکه القائی ایجاد می‌شودکه با بالا رفتن شدت جریان مخالفت می‌کند به همین جهت آن را «نیروی ضد محرکه القائی» نیز می‌نامند. اندازه این نیرو در حالتی که سیم مستقیم است بسیارناچیزمی‌باشد ولی اندازه‌آن در یك سیم پیچ،مخصوصاً اگرهسته‌آهنی داشته باشد زیاد است.

علت پیدایش خود به خود چنین نیروی ضد





شکل ۹ ـ ۸ با نزدیك کردن یکی ازقطبهای یك آهن‌ربا به‌رشته بلند و قابل ارتعاش یك لامپ که بوسیله برق شهر روشن شده است، رشته مرتعش می‌شود.



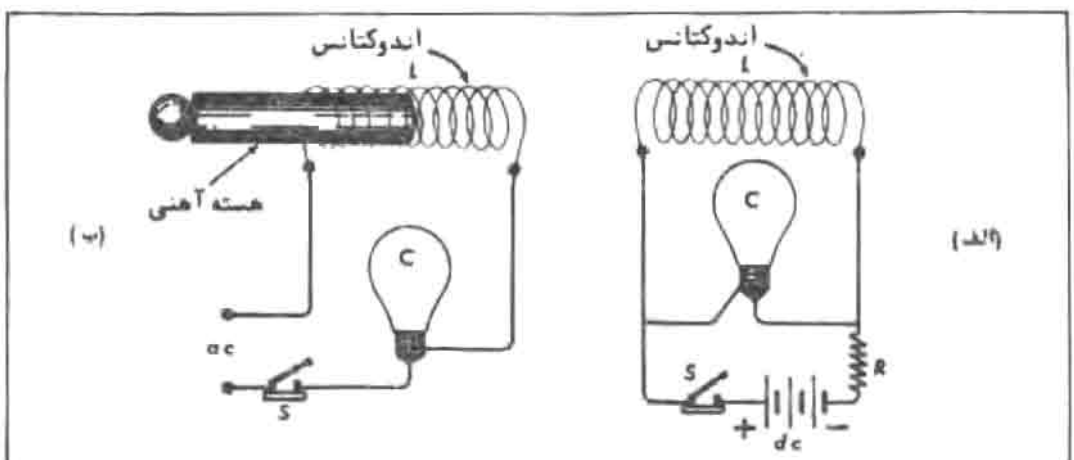
شکل ۹-۹- نمودار تغییرات شدت جریان نسبت به‌زمان در یک سیم سی در حالتی که:
الف- سیم راست است. ب- سیم به‌صورت سیم‌پیچ است.
پ- سیم به‌صورت یک سیم‌پیچ با هسته آهنی است.

محرکه القائی را می‌توان چنین بیان کرد:

وقتی که از سیم‌پیچ جریان i می‌گذرد درون آن میدان مغناطیسی به‌شدت B به‌وجود می‌آید که با i متناسب است. این میدان سبب می‌شود که شار مغناطیسی φ از درون حلقه‌های سیم‌پیچ بگذرد که متناسب با B و در نتیجه با i متناسب است. در لحظه‌ای که سیم‌پیچ به باتری متصل می‌شود شدت جریان در مدت کوتاهی از صفر به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد (شکل ۹-۹)

تغییر جریان در این مدت کوتاه سبب تغییر شار مغناطیسی درون سیم‌پیچ می‌شود و در نتیجه خود به‌خود نیروی محرکه القائی در سیم‌پیچ به وجود می‌آید که طبق قانون لنز جهت آن مخالف جهت نیروی محرکه اصلی است. به‌همین جهت این پدیده را «خود القائی» و نیروی محرکه حاصل از آن را «نیروی محرکه خودالقائی» نامیده‌اند. بدیهی است اگر شدت جریان به‌طور مداوم تغییر کند مثلاً از سیم پیچ جریان متناوب بگذرد، نیروی محرکه خود القائی نیز به‌طور مداوم ایجاد خواهد شد.

در شکل (۹-۱۰) دو آزمایش ساده یکی با جریان مستقیم و دیگری با جریان متناوب برای نشان دادن اثر خود القائی طرح ریزی شده است. در شکل الف (شبیه آن را در سال پیش نیز دیده‌اید) یک سیم‌پیچ که تعداد حلقه‌های آن خیلی زیاد است با یک لامپ به‌طور موازی بسته شده و به‌دو سر یک باتری ۱۲۰ ولت متصل است. همین که کلید S بسته می‌شود لامپ چند لحظه پرنور می‌گردد و سپس حالت عادی خود را پیدا می‌کند و در لحظه‌ای که کلید باز می‌شود، لامپ درچند لحظه دوباره پرنور می‌شود سپس خاموش می‌گردد. علت این است که در هنگام بستن کلید، نیروی ضد محرکه خودالقائی تولید شده در سیم‌پیچ مانع می‌شود که جریان به‌سرعت



شکل ۹-۱۰- آزمایش برای نشان دادن اثر خودالقائی

در سیم‌پیچ برقرار شود و اثر خودالقائی آن مانند یك مقاومت زیاد رفتارمی‌کندکه سبب می‌شودبیشتر جریان از لامپ بگذرد. پس از چند لحظه جریان‌در مدار به‌حد ثابت‌خود می‌رسد واین اثر ازبین‌می‌رود و جریان هم از لامپ وهم از سیم‌پیچ می‌گذرد و روشنائی لامپ کم می‌شود.

لحظه‌ای که کلید باز می‌شود شدت میدان مغناطیسی درون سیم‌پیچ یك‌باره صفر می‌شود وشار مغناطیسی به‌سرعت تغییرمی‌کند. درنتیجه این‌تغییر شار، جریان خودالقائی شدیدی به‌وجود می‌آید و همین جریان است که لامپ را چند لحظه پرنور می‌کند.

در آزمایش ب از مداری‌که شامل یك‌سیم پیچ و یك لامپ است جریان متناوب‌می‌گذرد وقتی که هسته‌آهنی‌درون سیم‌پیچ‌نباشد لامپ پرنوراست. اگر هسته آهنی را به تدریج داخل سیم پیچ کنیم روشنائی لامپ به تدریج کاسته می‌شود. علت این ا ت‌که وجود هسته آهنی در سیم‌پیچ سبب می‌شود که‌تغییرات‌شدت‌میدان مغناطیسی ودرنتیجه تغییرات شارمغناط ی‌که از درون سیم پیچ‌می‌گذرد شدیدتر ود ونیروی ندمحرکه القائی بیشتری تولیدگردد و ن جریان خودالقائی ه‌واره در خلاف جهت جریان اصلی است این جریان خودالقائی‌نمی‌گذارد که شدت جریان اصلی در مدار زیاد بالا رود.

پرسش ۹ ـ ۵ ـ شدت جریان متناوب راهم به وسیله سیم‌پیچ خود القا و هم به وسیله رئوستا می‌توان در یك مدار کاهش داد. به‌نظر شماکدام‌یك از این دو وسیله برای این منظور بهتر است؟ چرا؟

محاسبهٔ نیروی محرکه خود القائی ـ ضریب خود القائی ـ گفتیم‌وقتی‌که ازیك‌مدار جریان i می‌گذرد در اطراف این مدار القای مغناطیسی B به وجود می‌آید و این القای مغناطیسی سبب می‌شودکه شار مغناطیسی از درون مدار بگذردکه با شدت جریان i متناسب‌است. این تناسب را می‌توانیم به‌صورت رابطه زیر بنویسیم:

$$\varphi = Li \qquad (۷\ ۹$$

L ضریب ثابتی است که بستگی به ساختمان مدار دارد و «اندوکتانس» یا «ضریب خود القائی» مدار نامیده می‌شود.[۱]

اگر شدت جریان i تغییرکند شار مغناطیسی φ نیز تغییر می‌کند و این تغییر شار درمدار نیروی محرکه خود القائی به‌وجود می‌آورد که از رابطه

۱ـ اندوکتانس L چنان‌که دربالا بیان شد بستگی به ساختمان مدار دارد و برای یك سیم‌پیچ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$L = K\mu_0 \frac{N^2 A}{l}$$

که در آن N عده حلقه‌های سیم‌پیچ و A سطح مقطع داخل سیم‌پیچ برحسب متر مربع و l طول سیم‌پیچ برحسب متر و μ_0 ضریب قابلیت نفوذ مغناطیسی خلأ (یا هوا) و K ضریب قابلیت نفوذ مغناطیسی هسته درون سیم‌پیچ است.

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} = -L\frac{di}{dt} \qquad (۸-۹)$$

واحد ضریب خود القائی (یا اندوکتانس) L در دستگاه بین‌المللی واحدها «هانری»[۱] (با علامت اختصاری H) نام دارد و از رابطه (۱۲-۱۰) چنین تعریف می‌شود:

هانری، اندوکتانس (یا ضریب خود القائی) مداری است که اگر شدت جریان در آن به‌اندازه یک آمپر در مدت یک ثانیه به‌طور یکنواخت تغییر کند در مدار نیروی محرکهٔ القائی برابر یک ولت تولید شود

یادآوریـ انرژی الکترومانیتیکی جریان خاص سیم‌پیچ نیست بلکه هر مداری که دارای اندوکتانس باشد مقداری از انرژی الکتریکی را در میدان مغناطیسی اطراف خود ذخیره می‌کند.

اختلاف پتانسیل لحظه‌ای و اختلاف پتانسیل مؤثرـ می‌دانیم وقتی که از یک مدار جریان الکتریسیته می‌گذرد بین دو سر هریک از اجزاء مدار اختلاف پتانسیل الکتریکی برقرار می‌شود.

اگر جریانی که از مداری می‌گذرد متناوب و شدت لحظه‌ای آن به صورت تابع سینوسی $i = I_m \sin\omega t$ باشد اختلاف پتانسیل نیز تابع سینوسی با همان پریود شدت جریان است ولی معمولاً بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل یک اختلاف فاز φ[۲] وجود دارد. بنابراین معادلهٔ اختلاف پتانسیل لحظه‌ای بین دو

$$v = V_m \sin(\omega t + \varphi) \qquad (۹-۹)$$

ـ اگر $\varphi > 0$ باشد می‌گوئیم اختلاف پتانسیل نسبت به شدت جریان جلو است.

ـ اگر $\varphi < 0$ باشد می‌گوئیم اختلاف پتانسیل نسبت به شدت جریان عقب است.

ـ اگر $\varphi = 0$ باشد می‌گوئیم اختلاف پتانسیل و شدت جریان هم فاز هستند.

اختلاف فاز φ و نسبت $\frac{V_m}{I_m}$ و هم‌چنین اختلاف پتانسیل مؤثر دو سر یک مدار جریان متناوب بستگی به ویژگیهای اجزای مدار دارد. (این بستگیها را در صفحات بعد خواهیم دید)

اختلاف پتانسیل مؤثر یعنی اختلاف پتانسیلی که مستقیماً به‌وسیله ولتسنج اندازه گرفته می‌شود و بین اختلاف پتانسیل مؤثر و اختلاف پتانسیل ماکزیمم رابطه زیر برقرار است:

$$V_e = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \qquad (۱۵-۹)$$

باید توجه داشت که مقاومت الکتریکی و خازن و خودالقا هریک به‌تنهائی یا باهم نقش مؤثری در مدار جریان متناوب دارند. هر اسباب الکتریکی که با جریان متناوب کار می‌کند معمولاً در مقابل عبور جریان، مقاومتهائی به‌صورتهای زیر از خود نشان می‌دهد.

۱ـ مقاومت معمولی (یا رزیستانس) که در مقابل جریان متناوب و جریان پیوسته یکسان ظاهر

۱ـ Henry، به‌افتخار Joseph Henry (۱۷۹۷-۱۸۷۸ م) فیزیک‌دان امریکائی.

۲ـ به‌بخش ۵ مراجعه شود.

می‌شود:

۲ـ مقاومت ظاهری حاصل از پدیده خودالقائی (اندوکتانس) که خاص جریان متغیر یا متناوب است.

۳ـ مقاومت ظاهری حاصل از وجود خازن در مدار الکتریکی اسباب (کاپاسیتانس) که درمقابل عبور جریان پیوسته بینهایت است زیرا جریان پیوسته از خازن نمی‌تواند بگذرد.

اگر اثرهای خود القائی (اندوکتانس) و ظرفیت (کاپاسیتانس) مدار نسبت به مقاومت الکتریکی آن ناچیز باشد مدار درحکم یك مقاومت ساده است و برای محاسبه شدت جریان می‌توان قانون اهم را به‌کار برد. ولی اگرمدارشامل خود القاء[1] یا خازن باشد بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل اختلاف فاز به‌وجود می‌آید و برای محاسبه شدت جریان، دیگر نمی‌توان قانون اهم را به‌صورت معمولی آن به‌کار برد. اینك هریك ازحالات مختلف را جداگانه مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱ـ حالت ساده‌ای که مدار فقط شامل مقاومت است ـ در نظر بگیریم که به دو سر یك مقاومت الکتریکی R اختلاف پتانسیل متناوب $v = V_m \sin\omega t$ برقرار شده است.

شدت جریانی که در هرلحظه از این مقاومت می‌گذرد طبق قانون اهم از رابطه $v = iR$ حساب می‌شود. چون مقاومت R محسوساً ثابت است، اختلاف پتانسیل در هرلحظه متناسب باشدت جریان است در نتیجه v و i هم فاز هستند وخواهیم داشت:

$$i = \frac{v}{R} = \frac{V_m}{R}\sin\omega t = I_m \sin\omega t$$

یا

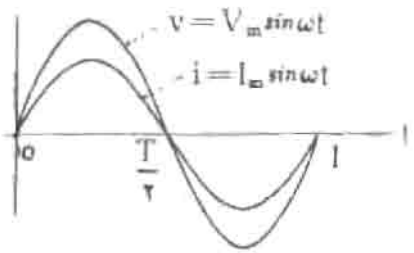
$$I_m = \frac{V_m}{R} \qquad (۹-۱۱)$$

نمودارهای شکل (۹-۱۲) هم‌فاز بودن v و i را نشان می‌دهند؛ به‌طوری که‌درشکل‌دیده‌می‌شود اختلاف پتانسیل وشدت جریان باهم صفر و یا هم ماکزیموم می‌شوند.

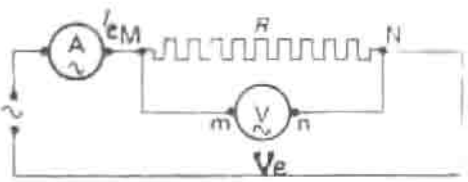
بین شدت جریان مؤثر و اختلاف پتانسیل مؤثر نیز رابطه زیر برقرار است:

$$I_e = \frac{V_e}{R} \qquad (۹-۱۲)$$

این رابطه را می‌توان مستقیماً با اندازه‌گیری شدت جریان و اختلاف پتانسیل به‌وسیله آمپرمتر و ولت‌متر، مطابق شکل (۹-۱۳) تحقیق کرد.



شکل ۹-۱۲ـ برای یك مقاومت خالص، اختلاف پتانسیل و شدت جریان هم فاز هستند



شکل ۹-۱۳ـ تحقیق تجربی رابطه

$$I_e = \frac{V_e}{R}$$

۱ـ خود القاء را سلف‌القوکسیون (Self Induction) یا به‌اختصار سلف نیز می‌نامند.

۲ـ حالتی که مدار شامل خودالقا یا خازن است ـ اینك درنظر بگیریم که بدوسر یك خودالقا (سلف) که اندوکتانس آن L و مقاومت الکتریکی آن ناچیز است (مثلاً به دوسر یك سیم پیچ بدون مقاومت که دارای هسته آهنی است) اختلاف پتانسیل متناوبی برقرار شده‌است . چون اختلاف پتانسیل دوسر یك خودالقاء برابر $L\frac{di}{dt}$ است اگر معادله جریان را به صورت $i = I_m \sin\omega t$ نمایش دهیم خواهیم داشت :

$$v = L\frac{di}{dt} = LI_m\omega\cos\omega t$$

یا: (۱۳-۹)

$$v = L\omega I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = V_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

این رابطه نشان می‌دهد که اولاً بین شدت جریان i واختلاف پتانسیل v اختلاف فاز $\frac{\pi}{2}$ وجود دارد و اختلاف پتانسیل نسبت به‌شدت جریان جلو است یعنی به‌اندازه زمان $\frac{T}{4}$ زودتر از شدت‌جریان ماکزیمم یا صفر می‌شود (به شکل ۹-۱۸-ب مراجعه شود).

ثانیاً شدت جریان ماکزیمومی که می‌تواند از این خود القا بگذرد برابر است با:

$$I_m = \frac{V_m}{L\omega} \qquad (۱۴-۹)$$

از مقایسه این رابطه با رابطه معمولی قانون اهم نتیجه می‌شود که خود القا (یا سلف) در مقابل عبور جریان متناوب یك مقاومت ظاهری[1] $L\omega$ ایجاد می‌کند که هرچه اندوکتانس L بیشتر و یا فرکانس جریان زیادتر باشد اندازه این مقاومت بیشتر است. این مقاومت ظاهری را معمولاً به X_L نمایش می‌دهند و ما آن را «مقاومت القائی»[1] می‌نامیم. بنابراین:

$$X_L = L\omega = 2\pi fL \qquad (۱۵-۹)$$

که در آن L برحسب هانری و f برحسب هرتز (یا ω برحسب رادیان برثانیه) و X_L برحسب اهم است.

مثال ـ مطلوبست مقاومت القائی سولنوئیدی که ضریب خود القائی (اندوکتانس) آن $L = 2/0 \times 10^{-3} H$ است و از آن برق شهر با فرکانس ۵۰ هرتز می‌گذرد.

ـ داریم:

$$X_L = 2\pi fL = 2 \times 3/14 \times 50 \times 2/0 \times 10^{-3} \simeq 0/63\Omega$$

پرسش ۹-۶ـ این اختلاف پتانسیل مؤثر و شدت جریان مؤثر در یك خودالقا، چه رابطه‌ای برقرار است؟

اگرمدار فقط شامل خازن باشد ، خازن در برابرعبور جریان متناوب ازخود مقاومت ظاهری نشان می‌دهدکه اندازه‌آن برابر $\frac{1}{C\omega}$ است . این مقاومت را مقاومت ظرفیتی[2] می‌نامیم . بنابراین :

$$X_C = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{2\pi fC} \qquad (۱۶-۹)$$

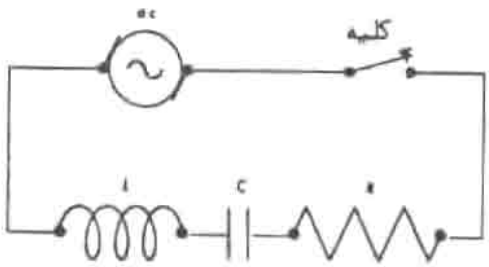
۱ـ اصطلاح فیزیکی آن در زبان انگلیسی Inductive Reactance است

۲ـ اصطلاح فیزیکی آن در زبان انگلیسی **Capacitve Reactance** است.

که درآن C برحسب فاراد و f برحسب هرتز و X_c برحسب اهم است. بدیهی است بین اختلاف پتانسیل مؤثر و شدت جریان مؤثر درمدار خازن رابطه:

$I_e = \frac{V_e}{X_c}$ برقرار است

۴ـ مدار شامل مقاومت و سلف و خازن است ـ حالت کلی ـ اینك مداری در نظر بگیریم شامل مقاومت R وخازن C وسلف L که به‌طورمتوالی به‌هم بسته شده‌اند (شکل ۹ ـ ۱۳) و بین دو سر مدار



شکل ۹ ـ ۱۳ ـ مدار جریان متناوب شامل مقاومت و خازن و سلف که به‌طورمتوالی به‌هم بسته شده‌اند.

اختلاف پتانسیل متناوبی برقرار شده است. اگر اختلاف پتانسیل مؤثر دوسر مدار V_e باشد، شدت جریان مؤثر درمدار از رابطهٔزیر حساب می‌شود[1]:

$$I_e = \frac{V_e}{\sqrt{R^2+(X_L-X_c)^2}} \quad (۹-۱۷)$$

دراین رابطه $\sqrt{R^2+(X_L-X_c)^2}$ مقاومت ظاهری کل مدار است که «امپدانس[2]» مدار نامیده می‌شود ومعمولاً آن‌را به Z نمایش می‌دهند و واحد آن اهم است. بنابراین:

$$Z=\sqrt{R^2+(X_L-X_c)^2} \quad (۹-۱۸)$$

و

$$I_e=\frac{V_e}{Z} \quad (۹-۱۹)$$

این رابطه نظیر فرمول اهم یعنی $I=\frac{V}{R}$ است که به‌جای R، مقاومت ظاهری Z قرار گرفته است. $X = X_L - X_c$ را راکتانس مدار گویند.

یادآوری ـ اگر سلف، خود نیز دارای مقاومت کوچکی باشد، مقاومت آن بامقاومت R جمع می‌شود. دراین‌صورت R مقاومت کل‌مدار خواهدبود.

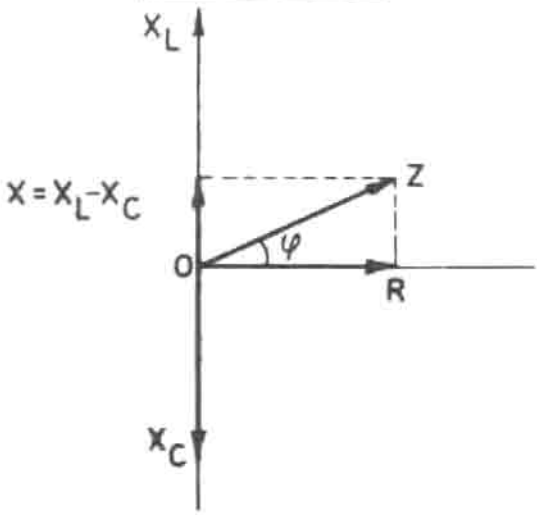
روش ترسیم برای تعیین Z ـ روابط بین R و X_L و X_c و Z را می‌توان از راه ترسیم مانند روش برداری نیز نشان داد (شکل ۹ ـ ۱۴): مقاومت R را مطابق شکل، با یك بردار که طول آن متناسب با اندازه R است با انتخاب یك‌واحد مناسب روی محور افقی ox نمایش می‌دهیم، سپس راکتانسهای X_L و X_c را با همان واحد به‌وسیله دو بردار در خلاف جهت یك‌دیگر روی محور oy عمودبر ox نمایش می‌دهیم در این صورت اندازه Z برابر طول برآیند سه‌بردار R و X_L و X_c خواهد بود.

۱ـ با محاسباتی نظیر آن‌چه گذشت می‌توان به‌آسانی این رابطه را به‌دست آورد.

۲ـ Impedance

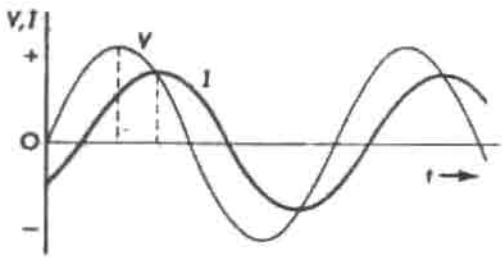
اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیلـ وجود سلف و خازن در مدار جریان متناوب سبب می‌شود که بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل اختلاف فازی به‌وجود آید. اندازهٔ این اختلاف‌فاز، به‌طوری که از شکل (۹ـ۱۴) نیز استنباط می‌شود، از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$tg\varphi = \frac{X_L - X_C}{R} \qquad (۹-۲۰)$$



شکل ۹ـ۱۴ـ روش ترسیم برای تعیین امپدانس مدار جریان متناوب.

اگر $X_L > X_C$ باشد $\varphi > 0$ است، در نتیجه اختلاف‌پتانسیل v نسبت به‌شدت i جلواست. اگر $X_L < X_C$ باشد $\varphi < 0$ است و اختلاف پتانسیل نسبت به‌شدت جریان عقب است. شکل (۹ـ۱۵) حالتی را نشان می‌دهدکه i نسبت به v به‌اندازهٔ $\frac{\pi}{4}$ عقب‌است. به‌عبارت‌دیگر شدت‌جریان به‌اندازهٔ $\frac{1}{8}$ پریود از ولتاژ عقب است.



شکل ۹ـ۱۵ـشدت جریان به‌اندازهٔ $\frac{\pi}{4}$ نسبت به‌اختلاف پتانسیل عقب‌است.

حالت رزونانسـ اگر $X_L = X_C$ باشد $\varphi = 0$ است. دراین حالت امپدانس Z کمترین مقدار خود را دارد و برابر R است. در نتیجه شدت جریان در مدار به بیشترین مقدارخود می‌رسدکه مقدار مؤثر آن‌برابر با $I_e = \frac{V_e}{R}$ است، دراین‌صورت می‌گویند مدار در حال رزونانس یا تشدید است. دراین‌حالت خواهیم داشت:

$$L\omega = \frac{1}{C\omega}$$

یا:

$$LC\omega^2 = 1 \qquad (۹-۲۱)$$

توان درمدار جریان متناوبـ **ضریب توان**ـ می‌دانیم در مدار جریان پیوسته، توان مصرف شده از رابطه $P = VI$ حساب می‌شود که واحد آن ولت‌ـآمپر یا وات است.

دریك مدار جریان متناوب توان برابرحاصل ضرب ولتاژ لحظه‌ای درشدت جریان لحظه‌ای‌است. چون هم اختلاف پتانسیل لحظه‌ای و هم شدت

لحظه‌ای تغییر می‌کنند و در لحظه‌هائی هم صفر می‌شوند بنابراین توان مصرف شده در هر پریود مقدار ثابتی نیست و باید اندازه متوسط آن حساب شود محاسبه نشان می‌دهد[1] که این توان متوسط برابر است با:

$$\boxed{\bar{P} = V_e I_e \cos\varphi} \qquad (۲۲-۹)$$

یعنی توان متوسط مصرف‌شده دریک مدار جریان متناوب برابر است با حاصل ضرب اختلاف پتانسیل مؤثر دوسر مدار در شدت جریان مؤثر در کسینوس زاویه اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل.

مقدار $\cos\varphi$ را «ضریب توان» مدار گویند. این ضریب، به‌طوری‌که از شکل (۹-۱۴) نیز استنباط می‌شود برابر $\frac{R}{Z}$ است. حاصل ضرب $V_e I_e$ را توان ظاهری مدار گویند ومعمولاً برحسب ولت-آمپر بیان می‌شود. چنانچه رابطه (۹-۲۲) را به‌صورت:

$$\cos\varphi = \frac{P}{V_e I_e} \qquad (۲۳-۹)$$

بنویسیم، این رابطه نشان می‌دهد که ضریب توان برابر خارج قسمت توان متوسط برتوان ظاهری است.

مصرف توان درحالات مختلف

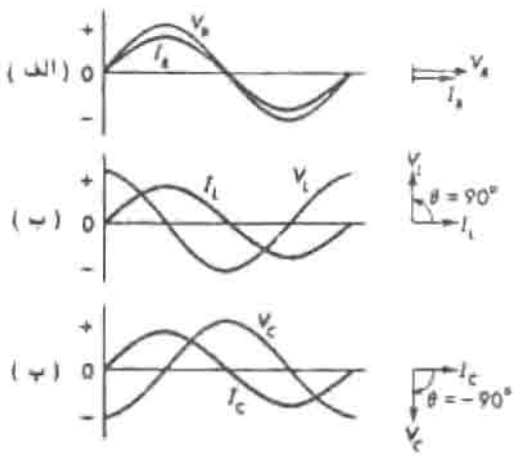
الف- در حالتی که مدار تنها شامل مقاومت R است، اختلاف فاز بین شدت و اختلاف پتانسیل صفر است. درنتیجه شدت جریان واختلاف پتانسیل هم‌فاز هستند (شکل ۹-۱۶-الف).

درنتیجه:

$$\cos\varphi = 1$$

و $$\bar{P} = V_e I_e = R I_e^2$$

دراین حالت روابط جریان پیوسته عیناً در جریان متناوب به‌کار می‌روند.



شکل ۹-۱۶- نمودارهای نمایش اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل بین اجزاء جداگانه یکمدار جریان متناوب.

ب- درحالتی که مدار فقط شامل اندوکتانس L است. در این حالت اختلاف فاز بین اختلاف پتانسیل و شدت جریان چنان که دیدیم $\frac{\pi}{2}$ است (شکل ۹-۱۶-ب).

درنتیجه:

$$P = 0 \quad \text{و} \quad \cos\varphi = 0$$

یعنی توان متوسط مصرفی مدار صفر است.

پ- درحالتی که مدار فقط شامل خازن است.

۱- روش محاسبه شبیه به‌محاسبه شدت جریان مؤثر است که درهمین بخش بیان شده است.

درحالت $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ است یعنی پتانسیل دست به شدت جریان $\frac{\pi}{2}$ عقب است (شکل ۹-۱۶-ب) و داریم:

$$\cos\varphi = ۰ \quad \text{و} \quad \bar{P} = ۰$$

یعنی درخازن‌هم توان‌الکتریکی به‌مصرف نمی‌رسد.

پرسش ۹-۷- پس انرژی الکتریکی داده شده به‌خازن چه‌می‌شود؟

ت- در حالتی مدار شامل مقاومت و سلف و خازن است (مدار R.L.C). در این حالت:

$\cos\varphi = \frac{R}{Z}$ است که اندازه آن بستگی به R و Z دارد و توان مصرف‌شده برابر است با:

$$\bar{P} = V_e I_e \cos\varphi = V_e I_e \frac{R}{Z}$$

و چون $Z = \frac{V_e}{I_e}$ است، پس:

$$\boxed{\bar{P} = V_e I_e \frac{R}{V_e/I_e} = R I_e^{۲}}$$

یعنی توان الکتریکی در مدار R.L.C به صورت گرما به‌مصرف می‌رسد.

درحالت رزونانس داریم:

$$\varphi = ۰ \quad \text{و} \quad \cos\varphi = ۱ \quad \text{و} \quad \bar{P} = V_e I_e$$

دراین‌حالت‌توان‌مصرف‌شده درمدارماکزیموم است.

توان مصرف‌شده دریك مدار جریان متناوب مستقیماً با اسیابی به‌نام واتمتر اندازه‌گرفته می‌شود در مدرج کردن این اسباب، هم اختلاف پتانسیل و هم شدت جریان وهم ضریب توان ($\cos\varphi$) در نظر گرفته می‌شود، بنابراین عقربه این دستگاه مستقیماً اندازه $V_e I_e \cos\varphi$ را نشان می‌دهد. برای تعیین ضریب توان یك مدار کافی است کمیتهای $\bar{P}$ و V_e و I_e را مستقیماً با واتمتر و ولتمتر وآمپرمتر اندازه بگیرند سپس از رابطه $\cos\varphi = \frac{P}{V_e I_e}$ ضریب توان را حساب کنند.

مثال- مداری ازیك مقاومت $R = ۶۰/۰\Omega$ و یك سلف $L = ۰/۲۵۰H$ و یك خازن $C = ۵۰/۰\mu F$ تشکیل یافته‌است که به‌طورمتوالی به‌هم‌بسته‌شده‌اند واین‌مدار به‌برق ۲۲۰/۰ ولت ۵۰/۰ هرتزمتصل است مطلوبست:

۱- راکتانس $X = X_L - X_c$ مدار

۲- مقاومت ظاهری (امپدانس) مدار

۳- شدت جریان مؤثر درمدار و اختلاف فاز بین شدت واختلاف پتانسیل.

۴- ضریب توان مدار

۵- توان مصرف‌شده در مدار

- داریم:

-(۱

$$\begin{cases} X_L = ۲\pi f L = ۲\pi \times ۵۰ \times ۰/۲۵ = ۲۵\pi \text{ اهم} \\ X_c = \frac{۱}{۲\pi f C} = \frac{۱}{۲\pi \times ۵۰ \times ۵۰ \times ۱۰^{-۶}} = \\ \qquad \frac{۱۰^{۴}}{۵\pi} = \frac{۲۰۰}{\pi} \text{ اهم} \\ X = ۲۵\pi - \frac{۲۰۰}{\pi} \simeq ۷۸/۵ - ۶۳/۷ = \\ \qquad ۱۴/۸ \text{ اهم} \end{cases}$$

۲)-

$$Z=\sqrt{R^2+X^2}=\sqrt{(۶۰)^2+(۱۴/۸)^2}\simeq$$

اهم ۶۱/۸

۳)-

$$I_e=\frac{V_e}{Z}=\frac{۲۲۰}{۶۱/۸}\simeq ۳/۵۶ \text{ آمپر}$$

$$tg\varphi=\frac{X}{R}=\frac{۱۴/۸}{۶۰}=۰/۲۴۶۶ \quad \varphi\simeq ۱۳^\circ/۵$$

۴)-ضریب توان:

$$\cos\varphi=\frac{R}{Z}=\frac{۶۰}{۶۱/۸}\simeq ۰/۹۷$$

یا:

$$\cos\varphi=\cos ۱۳^\circ/۵\simeq ۰/۹۷$$

۵)- توان مصرف شده درمدار:

$$P=V_eI_e\cos\varphi=۲۲۰\times ۳/۵۶\times ۰/۹۷\simeq ۷۶۰W$$

یا:

$$P=RI_e^2=۶۰\times(۳/۵۶)^2\simeq ۷۶۰W$$

اختلاف پتانسیل بین اجزاء یك مدار جریان متناوب- **فاز شدت جریان در تمام قسمتهای یك مدار جریان** متناوب که اجزاء مدار به‌طور متوالی بسته شده‌اند یکی است مثلاً اگر در یك لحظه شدت جریان در سلف ماکزیموم است در همان لحظه در مقاومت و خازن هم ماکزیمم است. یا اگر درسلف شدت جریان صفر است در مقاومت و خازن هم صفر است. ولی فاز اختلاف پتانسیلهای بین اجزاء مدار درهر لحظه یکی نیست. مثلاً اگر اختلاف‌پتانسیل دوسر سلف دریك‌لحظه ماکزیموم یا صفر باشد اختلاف‌پتانسیل دوسر مقاومت یا خازن در آن لحظه ماکزیموم یا صفر نیست بلکه بین اختلاف پتانسیلهای اجزاءیك مدار اختلاف فاز وجود دارد.

برای محاسبه اختلاف پتانسیل مؤثر دو سر هرجزء از مدار کافی است‌که مقاومت ظاهری (یا امیدانس) آن جزء را در شدت جریان مؤثری‌که از مدار می‌گذرد ضرب‌کنیم یعنی:

$$V_i=I_eZ_i \qquad (۲۴-۹)$$

(V_i و Z_i به‌ترتیب‌نمایش اختلاف پتانسیل مؤثر و امیدانس هرجزء مدار است). اختلاف فاز بین شدت واختلاف پتانسیل نیز از رابطه‌زیرحساب می‌شود:

$$tg\varphi=\frac{X_i}{R_i} \qquad (۲۵-۹)$$

مثلاً دومدارشکل (۱۰-۱۵)که یك‌مقاومت بدون اندوکتانس R و یك سلف بدون مقاومت L و یك خازن C به‌طور متوالی به‌هم بسته شده‌اند اختلاف پتانسیل مؤثر دوسر هرجزء و اختلاف فاز آن باشدت جریان به‌ترتیب زیر حساب می‌شود:

۱)- برای مقاومت R داریم:

$$\boxed{V_e=I_eR} \quad \text{و} \quad \boxed{\varphi=۰} \qquad (۲۶-۹)$$

زیرا $Z_i=R$ و $X_i=۰$ است.

بنابراین اختلاف پتانسیل دوسر یك‌مقاومت خالص با شدت جریانی‌که از آن می‌گذرد هم‌فاز است.

۲)- برای سلف L بدون مقاومت داریم:

(۲۷-۹)

$$\boxed{V_L=I_eX_L=I_eL\omega} \quad \text{و} \quad \boxed{\varphi=+\frac{\pi}{۲}}$$

زیرا $Z_L = X_L$ و $R_L = 0$ است. بنابراین اختلاف پتانسیل به‌اندازه ربع پرید از شدت جریان جلو است.

پرسش ۹-۸- اگر خودسلف‌دارای‌مقاومت R_L باشد اختلاف پتانسیل دوسر آن ازچه‌رابطه‌ای به‌دست می‌آید؟ دراین حالت اختلاف فاز φ چگونه حساب می‌شود؟

۳)- برای خازن C داریم:

(۲۸-۹)

$$V_c = I_e X_c = I_e \times \frac{1}{C\omega} \quad \text{و} \quad \varphi = -\frac{\pi}{2}$$

زیرا: $Z_i = X_c$ و $tg\theta = \frac{-X_c}{R=0} = -\infty$

بنابراین اختلاف پتانسیل دو سر یک خازن نسبت به‌شدت جریان به‌اندازه ربع پرید عقب‌است.

پرسش ۹-۹- در مداری‌که شامل مقاومت و سلف و خازن به‌طور متوالی است ، آیا اختلاف پتانسیل کل دو سر مدار برابر مجموع اختلاف پتانسیلهای دوسر هریک از اجزاء مدار است؟

به‌این پرسشها پاسخ دهید

۱- چه شرطی لازم است تا درمدار بسته‌ای جریان القائی تولید شود؟

۲- چه‌نوع جریانی را جریان متناوب گویند؟

۳- آیا لازم است هرجریان متناوبی جریان سینوسی باشد؟ جریان سینوسی چه ویژگی دارد؟

۴- آلترناتورها (مولدهای جریان متناوب) چه‌نوع جریان متناوبی را تولید می‌کنند؟

۵- فرق یک آلترناتور دوقطبی با یک دینامو‌ی ساده مولد جریان‌متناوب در چیست؟

۶- به‌نظر شما چرا در آلترناتورها سیم‌پیچهای القاگیر را ثابت می‌گیرند و القاکن را درمقابل آنها می‌چرخانند.

۷- اصطلاحات فرکانس و آلترناتور را درجریان متناوب تعریف‌کنید.

۸- از سه‌اثر گرمایی و شیمیایی و مغناطیسی‌کدام‌یک برای جریانهای متناوب و پیوسته یکسان ظاهر می‌شود و بستگی به‌نوع جریان ندارد؟

۹- برای این‌که از جریان متناوب درصنعت آب فلزکاری استفاده شود چه بایدکرد؟

۱۰- آمپرسنجها و ولتسنجهائی که براساس خاصیت مغناطیسی برای جریان الکتریسیته پیوسته ساخته شده‌اند مستقیماً برای جریان متناوب قابل استفاده نیستند چگونه می‌توان آنها را برای جریان متناوب نیز قابل‌استفاده‌کرد؟

۱۱- اثر خود القائی یعنی چه؟

۱۲- درکدام‌یك از موارد زیر اثر خودالقائی به‌شدت ظاهر می‌شود؟

۱- لامپ روشنائی که به‌برق شهر متصل است.

۲- یك سولنوئید بدون‌هسته آهنی که به‌باتری اتومبیل متصل است.

۳- همین سولنوئیدکه به‌جریان برق متناوب متصل است.

۴- یك ترانسفورماتورکه به‌برق شهر متصل است و از آن استفاده نمی‌شود.

۱۳- آیا می‌توان یك‌سلف باهسته آهنی را به‌جای رئوستا درجریان پیوسته به‌کار برد؟ درجریان متناوب چطور؟ درصورتی‌که جواب مثبت است آیا کاربرد آن در این مورد مزیتی‌بر رئوستا دارد؟ توضیح دهید.

۱۴- برای‌این‌که یك مقاومت خالص بدون اثر خود القاء درمسیر جریان‌متناوب داشته باشیم می‌توانیم با سیم راکاملاً راست انتخاب‌کنیم یا آن را دولاکرده به‌شکل سیم‌پیچ درآوریم آیا می‌توانید علت را بیان‌کنید؟

۱۵- شدت جریان مؤثر یعنی چه؟ این اصطلاح آیا خاص جریان متناوب است یا برای جریان پیوسته نیز مصداق پیدا می‌کند.

۱۶- نقش مقاومت و سلف و خازن درجریان متناوب چیست؟ هریك را جداگانه توضیح دهید.

۱۷- مقاومت‌ظاهری (امپدانس) یك‌مدار جریان متناوب درهریك از حالتهای‌زیر چیست؟

۱- مدار شامل مقاومت R و سلف L به‌طور متوالی

۲- مدار شامل خازن C و مقاومت R به‌طور متوالی

۳- مدار شامل خازن C و سلف بدون مقاومت L به‌طور متوالی

درهریك از حالات سه‌گانه بالا اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل چیست؟

۱۸- ضریب توان چه نقشی در مدار جریان متناوب دارد؟ آیا مدار جریان پیوسته نیز ضریب توان دارد؟

۱۹- برای انتقال جریان متناوب ازمحل‌تولید به‌محل مصرف عملاً به‌وسیله ترانسفور-ماتور ولتاژ را بالا می‌برند علت‌را توضیح دهید.

۲۰- ضریب توان یك‌سلف بدون‌مقاومت وقتی‌که از آن جریان متناوب می‌گذردچیست؟

۲۱- به‌دوسر یك سیم‌پیچ اختلاف پتانسیل متناوبی برقرار است واز آن جریانی به‌شدت مؤثر I_e می‌گذرد واختلاف فاز بین شدت جریان واختلاف پتانسیل φ است. هرگاه یك هسته آهنی وارد سیم‌پیچ کنیم:

۱- I_e بیشتر و φ بزرگتر می‌شود

۲- I_e کمتر و φ کوچکتر می‌شود

۳- I_e بیشتر و φ کوچکتر می‌شود

۴- I_e کمتر و φ بزرگتر می‌شود.

درپاسخ درست بحث کنید.

۲۲- یک‌خازن متغیر (از ۱ تا ۱۰۰ میکروفاراد) ویک لامپ صدشمعی را به‌طورمتوالی به‌هم‌می‌بندیم وبرای خازن ظرفیت‌کمتر را اختیارکرده و دوسر مدار را به‌شبکه برق شهروصل می‌کنیم. هرگاه ظرفیت خازن را زیادکنیم:

۱- روشنائی چراغ زیاد می‌شود

۲- روشنائی چراغ کم می‌شود

۳- روشنائی چراغ تغییر نمی‌کند

۴- چراغ به‌کلی خاموش می‌شود. درپاسخ درست بحث کنید.

این مسئله‌ها را حل کنید

۱- ساده‌ترین صورت معادلهٔ یک جریان سینوسی، که توانرآن $۵۰Hz$ و شدت مؤثر آن ۱ آمپر است چیست؟

۲- می‌دانیم مقدارمتوسط یک تابع‌سینوسی به‌صورت $y = y_m \sin\frac{۲\pi}{T}t$ در مدت یک آلترنانس($\frac{T}{۲}$) برابر$\frac{۲y_m}{\pi}$است. براین اساس، مقدار الکتریسیته‌ای که توسط یک جریان متناوب به توانر ۵۰ هرتز و به‌شدت مؤثر۴/۴۵ آمپر درمدت یک آلترنانس انتقال می‌یابد چه اندازه است؟

جواب: تقریباً ۰/۰۴ کولن

۳- هرگاه به دوسر سیم‌پیچ یک آهنربای الکتریکی اختلاف پتانسیل پوسته ۱۲۰ ولت برقرار سازیم جریانی به‌شدت ۱۲ آمپر ازآن می‌گذرد. ولی اگر به‌دوسر همین سیم‌پیچ‌اختلاف پتانسیل متناوبی که مقدار مؤثر آن ۱۲۰ ولت و فرکانس آن ۵۰ هرتز است بدهیم شدت جریان درسیم‌پیچ ۵ آمپر می‌شود. اندوکتانس سیم‌پیچ واختلاف فازبین شدت واختلاف‌پتانسیل جریان متناوب را حساب کنید.

جواب: تقریباً ۰/۰۷ هانری و تقریباً ۶۵°

۴ـ مداری که شامل یك لامپ (به‌مقاومت ۳۰۰ اهم درحال روشن بودن) ویك خازن است به‌شبکه یك‌جریان متناوب ($V_e=۱۲۰$ ولت و $f=۵۰$ هرتز) متصل است وشدت‌جریان مؤثر درمدار ۰/۲۴ آمپر است. ظرفیت خازن را حساب‌کنید ومعادله‌شدت جریان‌راهنویسید.

جواب: $C=۸\mu F$ و $i=۰/۳۴\sin(۳۱۴t+۰/۹۳)$

۵ـ یك خازن به‌ظرفیت ۵۰/۰ میکروفاراد و یك مقاومت ۴۵/۰ اهم ویك سیم‌پیچ به اندوکتانس ۰/۱۵۰ هانری‌به‌طور متوالی به‌هم بسته شده‌اند وبین دوسر این مدارجریان‌متناوبی که‌اختلاف پتانسیل مؤثر آن ۲۰۸/۰ ولت وفرکانس آن ۶۰/۰ هرتز است برقرار شده است، مطلوبست:

۱ـ مقاومت ظاهری (امپدانس) مدار

۲ـ شدت جریان مؤثر درمدار

جواب: ۴۵/۱ اهم و ۴/۶۱ آمپر

۶ـ مداری تشکیل شده است ازیك سیم‌پیچ (به‌مقاومت R و به‌ضریب خود القایی L) و یك خازن به‌ظرفیت C که به‌طور متوالی به‌هم بسته شده‌اند و از مدار جریان متناوبی که‌شدت مؤثر آن ۰/۲ آمپر است می‌گذرد. ولتسنج اختلاف پتانسیل قسمتهای مختلف مدار رابشرح زیرمعین می‌کند:

اختلاف پتانسیل دوسر مدار ۱۲۰ ولت

اختلاف پتانسیل دوسر سیم‌پیچ ۱۶۰ ولت

اختلاف پتانسیل دوسر خازن ۵۶ ولت

اولاً ـ مقاومتهای ظاهری سیم‌پیچ و خازن را جداگانه حساب‌کنید.

ثانیاً ـ مقاومت R سیم‌پیچ را معین نمائید.

ثالثاً ـ اختلاف فاز بین شدت جریان واختلاف پتانسیل‌کل دوسر مدار را حساب‌کنید.

جواب: ۱) ۸۰۰ اهم و ۲۸۰ اهم ۲) ۴۸۰ اهم ۳) تقریباً ۰/۶۳ رادیان.

پاسخ به‌پرسشهای متن بخش ۹

۹ ـ ۱)ـ اندازه شدت جریان درمدار درلحظات $\frac{T}{۴}$ و $۳\frac{T}{۴}$ ماکزیموم و درلحظات صفر و $\frac{T}{۲}$ و T صفر است.

۹ ـ ۲)ـ جرم جسمی‌که در عمل الکترولیز درکاتد آزاد می‌شود طبق قانون فارادی با

عوامل زیر متناسب است:

۱- مقدار الکتریسیته‌ای که از الکترولیت می‌گذرد.

۲- هم‌ارز الکترو شیمیائی جسم.

۹-۳)- با یکسو کردن جریان متناوب به‌وسیله لامپ دوقطبی یا به‌وسیله دیگر.

۹-۴)- از رابطه $F=BlI_m \sin\omega t$ که درآن B شدت میدان و l طول قسمت متحرک و i شدت جریان لحظه‌ای است. ماکزیموم این نیرو برابر است با: $F_m=BlI_m$

۹-۵)- به‌وسیله سیم‌پیچ خودالقا (که هسته آهنی نیز دارد). زیرا در سیم‌پیچ خودالقاء انرژی خیلی‌کم به‌صورت گرما تلف می‌شود درصورتی که در رئوستا به‌علت مقاومت الکتریکی که دارد مقدار زیادی از انرژی الکتریکی تلف می‌شود.

۹-۶)- رابطه $I_e=\frac{V_e}{X_L}=\frac{V_e}{L\omega}$

۹-۷)- دریک‌آلترنانس به‌صورت $\frac{1}{2}CV_e^2$ در خازن ذخیره و در آلترنانس بعد به‌مدار بازگردانده می‌شود.

۹-۸)- اگر مقاومت‌سلف ناچیز نباشد ($R_L\neq 0$) خواهیم داشت:

$$Z_L=\sqrt{R_L^2+X_L^2}=\sqrt{R_L^2+L^2\omega^2} \qquad (۲۹-۹)$$

بنابراین: $$V_L=I_eZ_L=I_e\sqrt{R_L^2+L^2\omega^2} \qquad (۳۰-۹)$$

دراین $0<\varphi<\frac{\pi}{2}$ است واز رابطه زیر حساب می‌شود:

$$tg\varphi=\frac{X_L}{R_L}=\frac{L\omega}{R_L} \qquad (۳۱-۹)$$

یادآوری- رابطه ۹-۲۹ را می‌توان از رابطه کلی $Z=\sqrt{R^2+(X_L-X_c)^2}$ نتیجه گرفت. کافی است قرار دهیم: $X_c=0$ و $R=R_L$.

۹-۹)- نه. اختلاف پتانسیل کل دو سر مدار معمولاً کوچکتر از مجموع اختلاف پتانسیلهای دوسر هریك از اجزاء است یعنی:

$$V_e<V_R+V_L+C_c$$

می‌توانیم مانند (شکل ۹-۱۶) اختلاف پتانسیل کل را از راه رسم به‌دست آوریم. بین اختلاف‌پتانسیل کل و اختلاف‌پتانسیلهای دوسر هریك‌ازاجزاء مدار رابطه جبری زیربرقرار است:

$$V_e^2=V_R^2+(V_L-V_c)^2$$

۱۰

نور

درقلمرو وسیع دانش فیزیك ، نور و پدیده‌های گوناگون آن همواره مورد توجه انسان بوده است . بررسی پدیده‌های نور به این جهت جلب توجه کرده است که نتایج حاصل ازآزمایشهای مربوط به‌آن ، مثلا تجزیه نور به‌رنگهای مختلف ، باچشم دیده می‌شوند. علاوه براین بررسی تکامل تدریجی فرضیه‌ها ونظریه‌های دانشمندان درباره نورکه منجربه‌کشف خواص آن ووضع قوانین مختلف گردیده است نیز به‌نوبه خود جالب و دارای اهمیت است .

درباره‌کشف و شناخت خواص نور آزمایشهای بسیاری انجام شده است‌که برخی ازآنها معرف یکی از ویژگیهای نور است . از این‌رو خواص نور ، بسته به‌چگونگی رفتارآن تحت به‌عنوان اپتیك هندسی (مشتمل بر انتشار نور به‌خط راست ، محدود بودن سرعت نور ، بازتابش و شکست نور) اپتیك‌فیزیك (شامل تفرق ، تداخل ، پلاریزاسیون وشکست مضاعف نور) و اپتیك‌کوانتیك (شامل پدیده فتوالکتریك ، تابش‌نور ازاتم و...) مورد بررسی قرارمی‌گیرد . شما درکتاب فیزیك سال دوم بارفتارنور براساس انتشار آن به‌خط راست آشنا شده‌اید ودراین‌جا نیازی به‌تکرار آن مطالب نیست . دراین بخش نخست بـا روش اندازه‌گیری سرعت‌نورآشنا خواهید شد سپس پدیده‌های تفرق وتداخل و پلاریزاسیون راکه معرف رفتار موجی نور هستند خواهید دید و مختصری هم رفتار ذره‌ای نـور را خواهید آموخت .

اندازه‌گیری سرعت نور

پیش از قرن نوزدهم میلادی درمدت دوهزار سال عقیده براین‌بودکه سرعت انتشار نور نامحدود و بی نهایت است یعنی اگردریکی‌ازستارگان دورحادثه

بزرگی رخ دهد وقوع آن حادثه درنقاط دیگرجهان هستی آناً دیده می‌شود . گالیله برای اندازه‌گیری سرعت نورتلاش‌کرد ولی موفق نشد . این دانشمند که یکی ازپایه‌گذاران فیزیك تجربی است به‌کمك همکارخود پس‌ازچندین‌بار تمرین وکسب‌مهارت‌لازم ، آزمایشی را به‌این ترتیب انجام دادکه خود بالای تپه‌ای ایستاد و فانوس روشنی را به‌دست گرفت و همکار او با یك‌فانوس روشن دیگر ، درفاصله نسبتاً دور بالای تپه دیگری ایستاد . روش‌آزمایش این‌بود که هردونفرروی فانوسهای خود را باپارچه نیره‌ای پوشانده بودند و گالیله باکنارزدن پارچه دریك‌مدت کوتاه ، یك‌علامت نوری می‌فرستاد و همکار او به محض مشاهده علامت نوری باکنارزدن پارچه از روی فانوس خود دریك‌زمان کوتاه باعلامت نوری دیگری به‌گالیله پاسخ می‌داد . گالیله باوجود انجام آزمایشهای مکرر درفواصل مختلف نتوانست‌اختلاف زمانی بین دوپیام مشاهده‌کند و نتیجه‌آزمایش خود را چنین اظهار داشت : «گوسرعت نور نامحدود نباشد بسیار زیاد است .

پرسش ۱۰-۱- چرا گالیله در این آزمایش ناموفق بود ؟

پرسش ۱۰-۲- چرا نخستین نتایجی که در بارهٔ سرعت انتشارنور بدست‌آمد ازمشاهدات‌نجومی (مثلا توسط رومر) بود نه ازمشاهدات زمینی ؟

درسال ۱۸۲۹ میلادی ، فیزو[1] فیزیك‌دان فرانسوی باروش ابداعی خود توانست سرعت نور را بدون این‌که احتیاجی به‌اندازه‌گیریهای نجومی باشد ، درسطح زمین اندازه بگیرد .

شکل(۱۰-۱) طرزآزمایش فیزو و وسایلی‌را که دراین آزمایش به‌کاررفته است نشان می‌دهد: پرتوهای نور از چشمه S به‌آینه شفاف G که هم نور را منعکس می‌کند و هم ازخود عبور می‌دهد می‌تابد وپس‌از بازتابش از روی‌آن توسط عدسی L_1 درنقطه O متمرکز می‌شود و توسط عدسی L_2 به صورت دسته پرتو موازی درمی‌آید . این‌دسته پرتو موازی‌پس ازپیمودن مسافت ۸/۶۷ کیلومتر به‌عدسی L_3 و آینه M که بالای تپه‌ای قرار داده‌شده‌است می‌تابد و پس‌از بازتابش ازروی این آینه ، دوباره برمی‌گردد و درنقطه E به‌چشم ناظر می‌رسد .

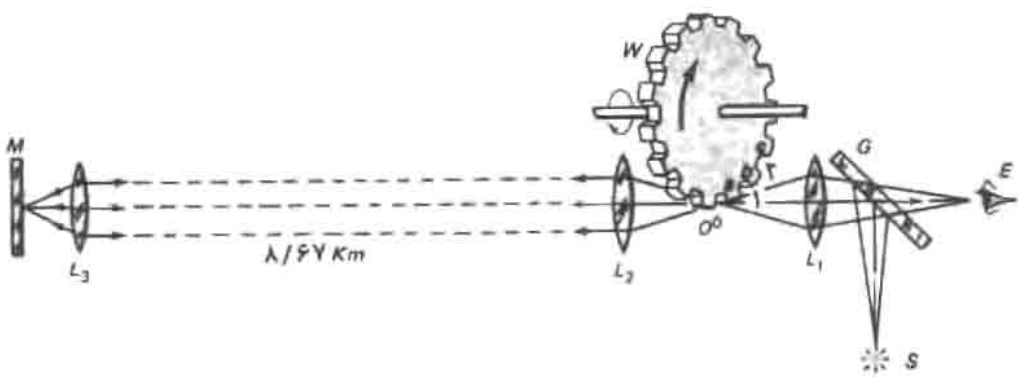
چرخ دندانه‌داری‌که میان‌دوعدسی L_1 و L_2 قرارداده شده به‌این‌منظور است‌که به‌هنگام‌چرخیدن، پرتوهای‌نوررا به‌صورت‌آذرخشهای متوالی‌وهم‌زمان به‌سوی‌آینه M گسیل دارد و به‌این وسیله‌بتوان زمان رفت و برگشت هرآذرخش را اندازه گرفت : درنظربگیریم‌که چرخ ساکن است ونور درنقطه O از فاصله میان دودندانه چرخ به‌آینه M می‌تابد . بدیهی است ناظر E تصویرچشمه نور S را درآینه می‌بیند . اگرچرخ به‌گردش درآید وسرعت دوران آن طوری باشدکه نوری‌که درنقطه O از میان دو دندانه می‌گذرد، درموقع برگشت ، درست به‌دندانه a برخوردکند ، نوری‌هم‌که ازمیان دودندانه‌بعدی می‌گذرد ،دربرگشت به‌دندانه b برخورد میکند ... دراین‌صورت نور به‌چشم ناظر نمی‌رسد وتصویرتاریك است . اگرسرعت دوران چرخ به‌تدریج افزوده‌شود

۱- Armand Fizeau (۱۸۱۹-۱۸۹۶ میلادی) ، فیزیکدان فرانسوی . این‌دانشمند ازجمله کسانی است‌که زندگی خود را وقف تحقیقات علمی‌کرده است.

روشنایی تصویر کم‌کم ظاهر می‌شود و بتدریج افزایش می‌یابد تا به‌ماکزیمم شدت خود برسد. در این حالت آذرخشهایی که به‌ترتیب از فاصله‌های ۰ و ۱ و ۲ و ۳ و . . . دندانه‌ها گسیل می‌شوند، درست در زمانی برمی‌گردند که از فاصله‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ و . . . دندانه‌ها بگذرند و به چشم ناظر برسند. چرخ دندانه‌داری که فیزو بکار برد دارای ۷۲۰ دندانه بود ($p = ۷۲۰$) و هنگامی که آنرا باسرعت ۲۵ دور در ثانیه ($n = ۲۵$) می‌چرخاند تصویر S در نقطه E به‌طور واضح دیده می‌شد. بنابراین زمان رفت و برگشت نور با توجه به‌اعداد بالا برابر $\frac{۱}{pn} = \frac{۱}{۷۲۰ \times ۲۵} = \frac{۱}{۱۸۰۰۰}$ ثانیه بود و نور دراین مدت مسافت رفت و برگشت $۸/۶۷ \times ۲ = ۱۷/۳۴$ کیلومتر را می‌پیمود، بااین مشخصات فیزو سرعت نور را در حدود ۳۱۳۰۰۰ کیلومتر برثانیه به‌دست‌آورد.

پس‌ازاعلام آزمایش فیزو، دانشمندان دیگر برای اندازه‌گیری سرعت نور و اصلاح روش فیزو آزمایشهای دقیق‌تری انجام دادند از جمله فوکو دانشمند دیگرفرانسوی که بافیزو هم‌زمان‌بودبه‌جای چرخ دندانه‌دار از آینه چرخان استفاد کرد، سپس مایکلسون[1] دانشمند امریکایی با استفاده از آینه چرخان، به‌شکل منشور هشت وجه چندین آزمایش برای تعیین سرعت نور انجام دادکه نخستین‌آنهادر سال ۱۸۸۰ میلادی وآخرین آنها درسال ۱۹۲۶ میلادی (یعنی دریک‌دوره ۴۵ساله) انجام گرفت و سرعت نوررا ۲۹۹۷۹۶ کیلومتربرثانیه اعلام‌کرد.

درچهل‌سال‌اخیر آزمایشهای زیادی‌باروشهای مختلف برای اندازه‌گیری سرعت نور انجام شده و پس‌از بررسیهای دقیق درسال ۱۹۶۴ میلادی بهترین مقدار برای‌سرعت نور درهوا برابر:



شکل ۱۰۹- طرح‌آزمایش فیزو برای اندازه‌گیری سرعت نور

۱- Albert A Michelson (۱۸۵۲-۱۹۳۱ میلادی)، مخترع دستگاهی بنام تداخل سنج (Interferometer). دیاحمین دستگاه است که می‌توان طول‌متر امتداررا برحسب طول‌موج‌نور مشخص کرد. او نخستین دانشمند امریکایی است که درسال ۱۹۰۷ میلادی موفق‌به‌دریافت جایزه نوبل‌شده است.

$$c = (۲۹۹۷۹۲٫۵ \pm ۰٫۳)\ \frac{km}{s} \qquad (۱-۱۰)$$

انتخاب گردیده است[1]. ولی عملا در محاسبات سرعت نور را در هوا یا در خلأ برابر

$$c = ۳٫۰ \times ۱۰^{۸}\ \frac{m}{s}$$

می‌گیرند.

سرعت نور درهوا اندکی کمتر از سرعت آن در خلأ است. این اختلاف درسطح تراز دریا درحدود ۷۰ کیلومتر برثانیه ودرنقاط مرتفع که هوا رقیقتر است ازاین مقدارهم کمتر است. ولی دربیشترموارد ازاین اختلاف صرف‌نظر می‌کنند و سرعت نور را درخلأ و درهوا باهم برابرمی‌گیرند.

سرعت انتشار نور درمواد شفاف ـ سرعت انتشار نور دریك ماده شفاف که ضریب شکست آن نسبت به‌خلأ یا نسبت به‌هوا n است، چنان‌که می‌دانیم[2] برابراست.

$$v = \frac{c}{n} \qquad (۲-۱۰)$$

این رابطه نشان می‌دهدکه وقتی نور ازخلأ یا ازهوا واردمحیط شفافی مانندآب یاشیشه می‌شود سرعتش کاهش می‌یابد و در نتیجه شکست حاصل می‌کند. این رابطه که براساس نظریه موجی بودن نورتوجیه می‌شود نخستین‌بار با اندازه‌گیری سرعت نوردرآب توسط فوکو به‌طور تجربی به‌اثبات رسید. آزمایش فوکو دربارهٔ اندازه‌گیری سرعت نوردرآب که درسال ۱۸۵۰ میلادی انجام شد آزمایشی قاطع وپرارزش بودکه به‌جرو بحثهای چندین‌ساله پیروان نظریه ذره‌ای نیوتن ونظریه موجی هویگنس درباره نور پایان‌داد چندسال‌بعد مایکلسون نیزسرعت نور را درآب اندازه‌گرفت و مقدار ۲۲۵۰۰۰ کیلومتر برثانیه را به‌دست‌آورد.

پرسش ۱۰-۳ـ به‌نظرشما، چرا نظریه‌ذره‌ای نیوتن در باره نور نمی‌توانست همهٔ وجوه شکست نوررا دریك‌محیط شفاف توجیه کند؟

پرسش ۱۰-۴ـ با توجه به‌رفتار موجی نور بگوئید وقتی نور ازهوا واردآب می‌شود چه‌تغییری در سرعت وطول موج و تواتر آن پدید می‌آید.

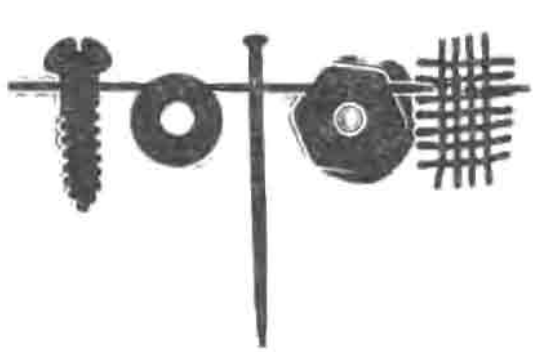
پرسش ۱۰-۵ـ چرا نور سفید در منشور به هفت‌رنگ تجزیه می‌شود؟

تفرق نور

می‌دانیم نورهنگام برخورد به‌لبه‌های اجسام ازمسیرراست خودمنحرف می‌شود. یعنی رفتار نور دربرخورد به‌لبه‌های اجسام مانند رفتارموجهای آب یا صوت است که ازگرداگرد لبه‌های مانع‌واقع در مسیرخود می‌گذرند. این پدیده را چنان که دیدیم تفرق یادیفراکسیون نور می‌نامندبرای‌مشاهده پدیده تفرق **کافی** است که دریك اطاق تاریك، درمسیر پرتوهای نوری‌که از یك‌نقطه نورانی (مثلا ازیك روزنه‌کوچك) گسیل می‌شوند جسم‌کدرکوچکی را قرار دهیم وسایه آن را روی یك پرده سفید بررسی کنیم. آثارتفرق معمولا به‌صورت آشفتگی در مرز

۱ـ سرعت نور را چنان‌که متداول است در اینجا به c نمایش داده‌ایم که حرف اول کلمهٔ Celerity است.

۲ـ به‌کتاب فیزیك سال دوم بخش شکست نور مراجعه شود.



شکل ۱۵-۲- سایه چندجسم کوچک که آثار تفرق در لبه‌های آنها به صورت نوارهای باریکی مشاهده می‌شود .

سایه ظاهر می‌گردند .

شکل (۱۵-۲) سایه‌چندجسم را که آثار تفرق در لبه‌های آنها مشاهده می‌شود نشان می‌دهد به‌طوری که در شکل دیده می‌شود اثرهای تفرق به‌صورت نوارهای باریکی در مرزهای سایه ظاهر شده است ودر وسط دوتا از این سایه‌ها نوارهای تفرق به‌صورت دایره‌های هم‌مرکز دیده می‌شود .

پدیده تفرق درزمان نیوتن با این فرض که نور از ذرات ریزی تشکیل یافته وحرکت آنها تابع قوانین معمولی مکانیک است توجیه می‌شد ، زیرا چنان‌که گفتیم نیوتن معتقد بودکه نور به صورت ذرات بسیارکوچک باسرعت بسیارزیاد ازمنبع تولید نور درتمام جهات پخش می‌شود . نظریه نیوتن درباره نور ، به‌سبب شخصیت ممتاز او ، سالها حتی تااوایل قرن نوزدهم میلادی مورد قبول بیشتر فیزیکدانان آن زمان بود . ولی با ظهور نظریه موجی نور و کشف پدیده‌هائی مانند تفرق ، تداخل و پلاریزاسیون نورکه به‌کمک این نظریه به‌طور کاملتر و دقیقتری توجیه می‌شوند لم لم نظریه ذره‌ای بودن نور رها شد و نظریه موجی بودن نور جای‌آن راگرفت و براساس این‌نظریه، پدیده‌های اصلی نورمانند بازتابش، شکست ، تفرق ، تداخل وپلاریزاسیون درآغازقرن نوزدهم میلادی به‌وسیله فرنل (فیزیک‌دان فرانسوی که با نام اوآشنایی دارید) باروشهای ریاضی نیز استدلال شد .

تئوری‌موجی‌نور نخست درسال ۱۶۶۵ میلادی به‌وسیله رابرت هوک[1] فیزیکدان انگلیسی مطرح‌شد و چندسال بعد توسط کریستیان هویگنس فیزیک‌دان و اخترشناس هلندی به‌صورت کاملتری بیان گردیده برطبق‌این تئوری ، نورمانند صوت به‌صورت‌امواج کروی منتشرمی‌شود .

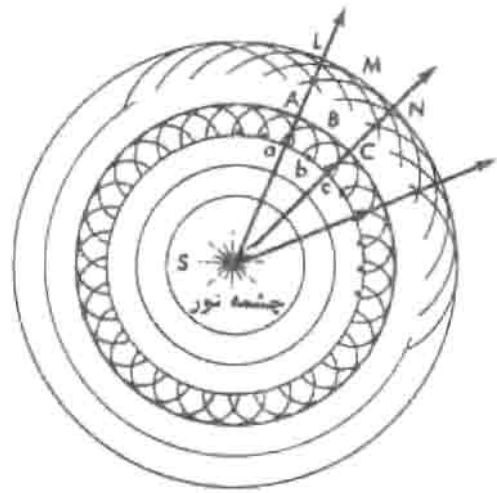
اصل هویگنس ـ تئوری موجی هویگنس را که به صورت رسم هندسی مجسم می‌شود اصل هویگنس می‌نامند و چنین بیان می‌شود :

هرنقطه‌واقع برجبهه‌یک موج(۱) می‌توان درحکم منبع جدید تولید امواج کروی دیگری در نظرگرفت . پس‌از زمان t ، جبهه جدیدموج سطح مماس براین موجهای ثانویه خواهد بود.

مثلا در شکل (۱۵-۳۰) همهٔ نقاطی مانند a و b و c و . . . که دریک لحظه برجبهه موج واقعند ممکن است مانندچشمه S رفتارکرده وامواج کروی‌کوچک ثانوی باهم تولید می‌کنند . پوش‌این موجهای‌کروی ثانویه ، یابه‌عبارت دیگرسطح‌مماس برآنها جبهه جدید موج خواهد بود . لحظه‌ای بعد ممکن است نقاط A و B و C و . . . وارد عمل

---

1 - Robert Hooke



شکل ۱۰-۳- نمایش اصل هویگنس

شوند و لحظه‌ای دیگر نقاط L و M و N و . . . تا آخر .

اصل هویگنس در نظر اول ممکن است به صورت یک‌بازی بی‌ثمر با دایره‌ها جلوه کرشود ، ولی به کمک همین اصل می‌توان بسیاری از پدیده‌های اپتیکی را توجیه وتفسیر کرد . مثلا در شکل (۱۰-۴) اصل هویگنس با یک آزمایش ساده نشان داده شده است : امواج تختی که از سمت چپ به مانع AB می‌رسند در تمام نقاط این مانع به جز نقطه S ، یا جذب می‌شوند و یا بازتابش حاصل می‌کنند ولی نقطه S بنا به اصل هویگنس مانند یک منبع تولید موج ثانویه عمل می‌کند و پدیده تفرق ظاهر می‌شود . این پدیده به‌خوبی برسطح آب دیده می‌شود .

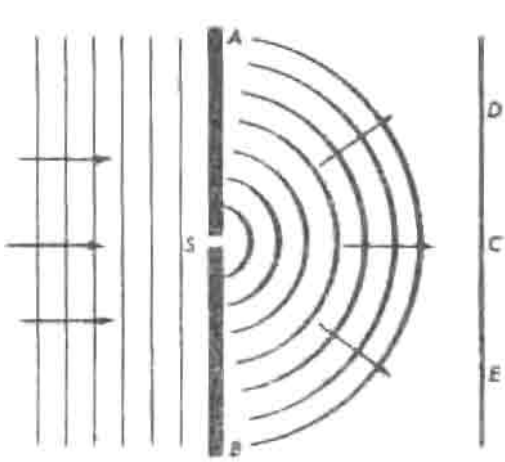
اگر مانع AB یک پرده کدر و سوراخ S ، یک روزنه خیلی کوچک (مثلا سوراخی که با سوزن سنجاق تولید می‌شود) باشد هرگاه نور به آن بتابد امواج نور به‌صورت نیمکره‌هائی که مرکز همه آنها روزنه S است از روزنه به اطراف پخش می‌شوند .

پرسش ۱۰-۶ - اگر روزنه S یک شکاف باریک و دراز (مثلاً عمود برصفحه کتاب) باشد به‌نظر شما جبهه امواج نوری که از این شکاف پخش می‌شوند چه شکلی خواهد داشت ؟

پرسش ۱۰-۷- با استفاده از اصل هویگنس بگوئید چرا لبه سایه‌ها در شکل (۱۰-۲) کاملا واضح نیست .

تداخل امواج نوری

در بخش یازدهم دیدیم هرگاه دو منبع ارتعاشی هم پرید و همدامنه در یک محیط به‌طور منظم باهم به ارتعاش درآیند امواج حاصل از ارتعاش منظم آنها ضمن انتشار درمحیط در یکدیگر داخل شده پدیده تداخل را ایجاد می‌کنند . در آن بخش متذکر شدیم که تداخل امواج یک پدیده عمومی است ، یعنی هرجا دو منبع ارتعاشی هم‌فاز و هم‌پرید وجود داشته باشد این پدیده صورت می‌گیرد. نمونه‌هایی از پدیده تداخل را درسطح آب ودرطول یک طناب (به‌صورت امواج ایستاده) وهمچنین درصوت بررسی کردیم . اینک یادآور می‌شویم که پدیده تداخل در نور هم



شکل ۱۰-۵- پدیده تفرق امواج از یک سوراخ کوچک، معرف اصل هویگنس است

مشاهده می‌شود ومؤید نظریه موجی‌بودن نوراست. باید توجه داشت که شرط این که طیف تداخلی حاصل از دومنبع‌ارتعاشی وضع ثابت ومشخصی‌داشته باشد این‌است‌که ارتعاشات حاصل از دومنبع ارتعاش هم‌پرید وهم‌فاز باشند ، دراین‌صورت می‌گوئیم دومنبع همسان (کوهرنت[1]) یا دارای خاصیت همسانی (کوهرنس[2]) هستند .

درتولید پدیده تداخل برسطح‌آب (درطشت موج‌نما) دیدیم‌که چگونه می‌توان دومنبع ارتعاشی همسان ایجاد کرد[3]. برای مشاهده پدیده تداخل درامواج نورانی نیز دوچشمه نورهمسان لازم‌است دوچشمه نورهمسان را فقط می‌توان ازیك منبع نور به‌دست‌آورد (مثلا صفحه‌کدری‌راکه درآن دوسوراخ ریز یادوشکاف موازی باریك نزدیك‌به‌هم فراهم‌شده است جلو یك‌لامپ روشن قرارداد). آزمایش نشان می‌دهدکه ایجاد پدیده تداخل در وضعی پایدار و مشخص به‌وسیله دوچشمه مستقل نور، (مثلادورشته ملتهب‌دولامپ جداگانه وپهلوی‌هم) غیرممکن‌است. علت این‌است‌که انتشار نورازیك چشمه مولد نور دارای طبیعت اتصالی‌نیست بلکه یك «پدیده‌اتفاقی» است که درآن تغییرات ناگهانی فاز در زمانهای بسیار کوتاه (درحدود ۸-۱۰ ثانیه) صورت‌می‌گیرد. گرچه ممکن است با دوچشمه مستقل‌آثارتداخل در زمانهای‌کوتاه ظاهرشود ولی شکل ووضعیت آنهادر هرلحظه تغییرمی‌کند وآنچه دیده می‌شود تغییر فاز است نه نوارهای تداخلی . بنابراین برای این‌که پدیده تداخل با وضعی پایدار در مدتی دراز حاصل شود باید اختلاف فاز بین نقاط متناظر در دوچشمه نورهمواره ثابت بماند به‌عبارت دیگر، نقاط مختلف دو چشمه نظیر به‌نظیرباهم ارتباط فاز داشته باشند . دراین‌صورت دوچشمه همسان یاکوهرنت هستند .

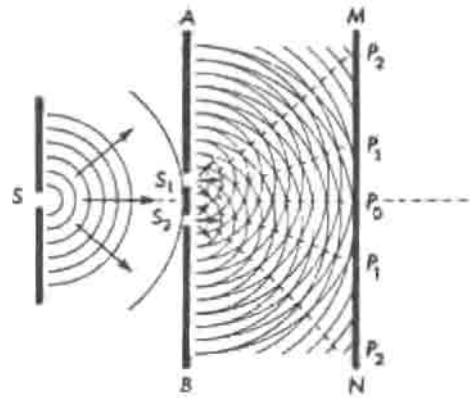
آزمایش یانگ[4] ـ تعیین طول موج نور ـ آزمایش یانگ‌که برای نشان دادن خاصیت موجی بودن‌نور طرح‌ریزی شده‌بود درسال ۱۸۰۱ میلادی بااستفاده ازنور خورشید و دوسوراخ ریز انجام شد . طرح این‌آزمایش درشکل (۱۰-۵) نمایش داده شده‌است.

نورخورشید از روزنه S می‌گذرد و به دو سوراخ ریز S_1 و S_2 می‌تابد وآنها را روشن‌می‌سازد این‌سوراخها طبق اصل هویگنس ، خود درحکم دو چشمه همسان نور هستند که دو دسته موجهای کروی‌شکل منتشر می‌سازند . این‌موجها با یکدیگر

۱- Coherent ۲- Coherence

۳- به‌بخش ۵ امواج مراجعه شود .

۴- Thomas young (۱۷۷۳-۱۸۲۹ میلادی) ـ دانشمند انگلیسی‌که درسن۱۴سالگی زبانهای لاتین، فرانسه، ایتالیائی، یونانی، عبری، عربی وفارسی را فراگرفت سپس به‌تحصیل‌پزشکی پرداخت و در ضمن تحصیل پزشکی مطالعات اساسی روی چشم به‌ویژه اثر سه رنگ قرمز و سبز و بنفش روی آن انجام‌داد . درمورد مکانیسم صدای انسان نیزمطالعاتی انجام دادکه اورابه‌آموختن صوت و امواج صوتی علاقمند ساخت . سپس متوجه اپتیك شد و نشان دادکه بسیاری ازآزمایشهای نیوتن درباره نوررامی‌توان باتئوری موجی نور به‌آسانی توجیه‌کرد . یانگ را بدون‌شك باید در ردیف دانشمندان برجسته به‌شمارآورد .

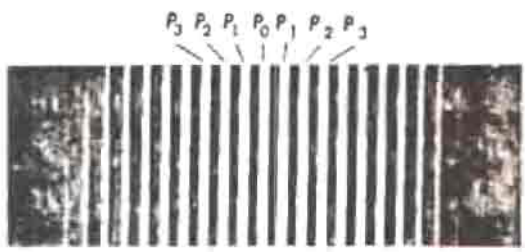


شکل۱۰-۵ آزمایش یانگ با دو شکاف برای نشان دادن پدیده تداخل امواج نور

تداخل می‌کنند و طیف تداخلی بر روی پرده MN تشکیل می‌شود .

امروزه درآزمایشگاهها به جای دو سوراخ S_1 و S_2 از دوشکاف باریك و موازی ونزدیك به‌هم استفاده می‌شود ونور نیز از یك شکاف S بر آنها می‌تابد. دراین‌صورت طیف تداخلی به‌شکل نوارهای هم‌عرض یك درمیان روشن و تاریك بر روی صفحه MN که موازی با صفحه دو شکاف S_1 و S_2 است تشکیل می‌گردد .

شکل(۱۰-۶) منظره واقعی ازیك‌طیف‌تداخلی



شکل۱۰-۶- نوارهای تداخلی حاصل ازدوشکاف در آزمایش یانگ

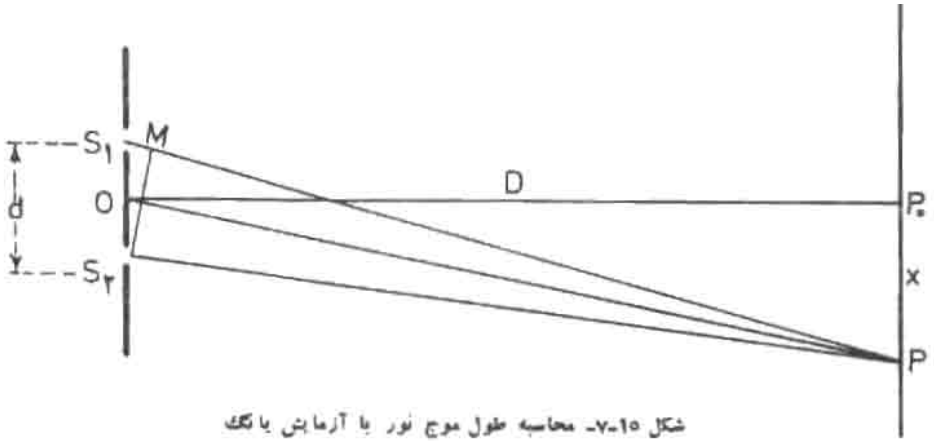
امواج نور را نشان می‌دهد که ازآزمایش‌یانگ با دوشکاف به‌دست‌آمده‌است ونوارهای روشن ، مربوط به‌نقاط P_0 و P_1 و P_2 و . . . درشکل (۱۰-۵) هستند . این‌پدیده را برطبق اصل هویگنس می‌توان چنین توجیه کرد : امواجی که ازنقاط مختلف شکافهای S_1 و S_2 باهم منتشر می‌شوند فقط درنقاط واقع برروی خطوط نقطه‌چین که درشکل (۱۰-۵) نمایش داده‌شده است یکدیگررا تلاقی می‌کنند . این خطوط در واقع معرف سطوحی هستند که هردو موج در حالتی که همفازند با هم به‌آنجا می‌رسند و درنتیجه ماکزیموم روشنائی‌را ایجاد می‌کنند ، دروسط فاصله این‌خطوط ، امواج در فاز متقابل به‌هم می‌رسند و درنتیجه اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند و تاریکی حاصل می‌شود . بنابراین تداخل امواج نورانی شبیه به‌تداخل‌امواج برسطح‌آب است که درشکلهای (۵-۸) و (۵-۱۱) در بخش ۵ دیده می‌شود . نوارهای روشن‌مکان هندسی نقاطی هستند که تفاضل فاصله‌های آنها از دوشکاف S_1 و S_2 برابر مضرب درستی ازطول موج λ است ونوارهای تاریك نیز مکان هندسی نقاطی هستند که اختلاف فاصله‌های آنها از دوشکاف S_1 و S_2 برابر مضرب فردی از نصف طول موج است .

محاسبه طول‌موج نور ـ درنظربگیریم که دوشکاف S_1 و S_2 توسط منبع نور تك‌رنگی با طول‌موج λ روشن شده‌اند و طیف تداخلی روی پرده نسبتاً دور وموازی با دوشکاف S_1 و S_2 تشکیل گردیده‌است.

اگر مطابق شکل (۱۰-۷) :

$d = S_1 S_2$ فاصله دوشکاف از یکدیگر ،

$D = O P_0$ فاصله پرده از صفحه دوشکاف،



شکل ۱۰-۷- محاسبه طول موج نور با آزمایش یانگ

$X = P_0 P$ فاصله یك نوار روشن K ام از نوار روشن وسطی P_0 باشد طبق آنچه دربخش ۵ ضمن محاسبه طول موج دیدیم خواهیم داشت :

$$\lambda = \frac{x \cdot d}{KD} \qquad (۳-۱۰)$$

با اندازه‌گیری x و d و D طول موج λ حساب می‌شود .

نوارمرکزی P_0 مکان نقاطی است که‌اختلاف راه میان موجهائی که از S_1 و S_2 به این نقاط می‌رسند صفر است.

(یعنی $S_1M = K\lambda = 0$ در نتیجه $K = 0$).

برای نخستین نوارهای روشن در دو طرف نوار مرکزی $K = 1$ است وبرای دومین و سومین و... نوار روشن K به‌ترتیب برابر ۲و۳ و ... است .

نوارهای تاریك ، چنان که بیان شد مکان نقاطی هستندکه موجهای نور از دوشکاف S_1 و S_2 با فاز متقابل به‌آن نقاط می‌رسند به‌عبارت دیگر اختلاف راه میان این موجها مضرب فردی از $\frac{\lambda}{2}$ است. مثلا برای نوار تاریکی‌که بعدازنوار روشن K ام واقع است داریم :

$$S_1M = (2K+1)\frac{\lambda}{2}$$

اگرفاصله این‌نوار تاریك را از نوار روشن مرکزی به x' نمایش دهیم با توجه به این‌که $S_1M = \frac{x'd}{D}$ است خواهیم‌داشت:

$$(2K+1)\frac{\lambda}{2} = \frac{x'd}{D} \qquad (۴-۱۰)$$

رابطه (۲-۱۰) نشان می‌دهد که فاصله هرنوار روشن از نوار مرکزی (یعنی x) با طول موج λ نسبت مستقیم وبا فاصله دوشکاف ازیکدیگر (یعنی d) نسبت معکوس دارد بنابراین هرچه طول موج بزرگتر وفاصلهٔ دوشکاف ازیکدیگرکمتر باشد x بزرگتر و درنتیجه پهنای نوارها بیشتر است .

مثال- دانش‌آموزی دریك‌آزمایشگاه آزمایش یانگ را با مشخصات زیر تکرار می‌کند :

فاصله دوشکاف ازهم ۰/۵۶۰ میلیمتر ،

فاصله میان دو نوار روشن متوالی ۰/۹۸۰ میلیمتر ،

فاصله میان صفحه دو شکاف از صفحه‌ای که نوارهای تداخلی برروی‌آن تشکیل می‌شوند ۸۲/۶ سانتیمتر .

طول موج نوری‌که در این آزمایش به‌کار رفته چه اندازه است ؟

ـ داریم :

$$d = ۵/۶۰ \times ۱۰^{-۴} m \quad و \quad D = ۰/۸۲۶ m$$

چون پهنای همه نوارها یکی است فاصله میان دو نوار روشن متوالی را می‌توان برابر فاصله وسط نوار روشن‌اول ازنوار مرکزی گرفت، دراین صورت

$$x = ۹/۸۰ \times ۱۰^{-۴} m \quad و \quad K = ۱$$

وخواهیم داشت :

$$\lambda = \frac{xd}{KD} = \frac{۹/۸ \times ۱۰^{-۴} \times ۵/۶ \times ۱۰^{-۴}}{۱ \times ۰/۸۲۶}$$

$$\simeq ۶۶/۲ \times ۱۰^{-۸} m$$

یا

$$\lambda \simeq ۶۶۲۰ \times ۱۰^{-۱۰} m$$

آنگستروم[1]، واحدطول موج‌نورـ چون طول‌موج نور خیلی‌کوتاه است فیزیك‌دانان برای بیان اندازه آن واحد خیلی‌کوچکی به‌نام آنگستروم (با علامت اختصاری Å) انتخاب کرده‌اند که اندازه آن $۱۰^{-۷}$ میلیمتر یا $۱۰^{-۱۰}$ متر است یعنی :

$$۱Å = ۱۰^{-۱۰} m \qquad (۵-۱۰)$$

درجدول زیر طول موج رنگهای طیف نور سفید تا دو رقم معنی دار برحسب آنگستروم داده شده است و این طول‌موجها مربوط به‌قسمت وسط هریك ازنوارهای رنگی طیف است . بدیهی است تواتر مربوط به‌هریك ازاین طول موجها از رابطه $c = f\lambda$ حساب می‌شود که درآن c سرعت نور (برحسب متربرثانیه) و λ طول‌موج نور (برحسب متر) و f تواترآن (برحسب هرتز) است .

حدود طول موج رنگهای طیف نور سفید برحسب آنگستروم

بنفش	۴۱۰۰Å
آبی	۴۷۰۰
سبز	۵۵۰۰
زرد	۵۸۰۰
نارنجی	۶۱۰۰
قرمز	۶۶۰۰

این‌طول‌موجها که به‌کمك‌آزمایش دوشکاف یانگ بدست آمده‌اند در واقع اندازه‌های متوسطی هستند زیرا هریك ازرنگهای طیف نور سفید شامل تعدادی طول‌موج متفاوت است‌که باهم اختلاف جزئی دارند .

پرسش ۱۰-۸ـ نوارهای تاریك و روشنی‌که ازآنها نام‌بردیم ممکن است هم دراثر پدیده تداخل و هم دراثر پدیده تفرق ایجاد شوند آیا می‌توانید فرق بین‌آنها را بیان‌کنید ؟

پرسش ۱۰- ۹ ـ یکی ازویژگیهای نور که نیوتن برای وضع تئوری ذره‌ای بودن نور به آن

1- Angstrom نام یك دانشمند سوئدی است که درسال ۱۸۶۸ میلادی نقشه طیف مرئی خورشید راتنظیم‌کرد . آنگستروم دراین‌نقشه یك‌دهمیلیونیم ($۱۰^{-۷}$) میلیمتر یایك دهزارم($۱۰^{-۴}$) میکرون را برای واحد طول موج نور به‌کار برده بود ازآن‌زمان تاکنون واحد آنگستروم برای اندازه‌گیری طول موج نور به‌کار می‌رود .

استناد می‌کرد انتشاریك دسته پرتو نور به‌خطراست است . در تئوری موجی بودن نور چگونـه این ویژگی توجیه می‌شود ؟

منابع نور و طیف‌های آن

در کتاب فیزیك سال دوم دیدیم کـه چگونه منشور نور سفید حاصل ازیك‌منبع نور را به‌نورهای ساده با طول موجهای متفاوت تجزیه می‌کند.

نورهای ساده‌ای‌که به‌شکل خطوط یانوارهای باریك‌یاگسترده‌به‌ترتیب طول‌موج‌دراسپکتروسکوپ یا در دیگر اسبابهای تجزیه نور قابل دیدن یا قابل عکسبرداری (به‌صورت رنگی یا سفید وسیاه) هستند طیف نامیده می‌شوند .

طیف نور حاصل از یك جسم جامـد ملتهب (مانند سیم تنگستن درون یك لامپ معمولی‌روشن) یا طیف مربوط به‌یك‌گاز یا بخارداغ (مانندانم‌های جیوه درون یك لامپ فلورسنت) به ماهیت مـاده پخش‌کننده نور و دمای‌آن بستگی دارد .

با آن‌که‌طیف هرعنصرشیمیائی درحالت‌گازی مشخص وقابل تمیز ازطیف عنصردیگراست مشاهده میشود که طیف حاصل از اجسام جامـد ملتهب (مانند فلزات ملتهب) تقریباً یکسان است تمـام طیف‌ها صرفنظر ازمنابع آنها به‌دسته‌های زیرتقسیم می‌شوند :

۱ـ طیف نشری اتصالی
۲ـ طیف نشری خطی
۳ـ طیف جذبی اتصالی
۴ـ طیف جذبی خطی

طیف نشری اتصالی

وقتی‌که یك قطعه فلزمانند آهن یا مس را به ملایمت‌گرما می‌دهیم تا به مرحله گداختگی برسد در دمای حدود ۱۰۰۰ درجه کلوین فلز به رنگ قرمز تیره درمی‌آید. به‌تدریج کـه دمای آن بالا می‌رود، رنگ قرمز به نارنجی سپس به زرد و درآخر به‌سفید تبدیل می‌شود.

اگر قطعه فلز را در ضمن این‌که گرم می‌شود به وسیله اسپکتروسکوپ نگاه‌کنیم نخستین رنگی که در طیف‌آن ظاهر می‌گردد رنگ قرمز است، سپس با ظاهر شدن رنگهای دیگر، رفته رفته عرض طیف‌زیاد می‌شود و با سفید شدن قطعه فلز در اثر گرمـا همه رنگهای مرئی، از قرمز تا بنفش، درطیف آن‌پدیدار می‌گردد.

وقتی‌که فلز به‌رنگ نارنجی درمی‌آید دمای آن در حدود $1500^{\circ}K$ و طیف آن شامل رنگهای قرمز و نارنجی و زرد است. موقعی‌که دما به حدود $2000^{\circ}K$ می‌رسد. رنگ سبز نیز در طیف ظاهـر می‌شود یعنی طیف شامل رنگهای قرمز و نارنجی و زرد و سبز است. در حدود $3000^{\circ}K$ فلز نور سفید تابش می‌کند و طیف آن‌کامل می‌شود. اگر دما را باز هم بـالا ببریم رنگهای طیف دیگر تغییر نمی‌کند ولی شدت نور در نواحی مختلف طیف زیادمی‌شود.

کار اسپکتروسکوپ دراین آزمایش جداکردن موجهای مختلف نـور برحسب طول موجشان است. دراین عمل بزرگترین طول موج، که در ناحیه قرمز است، دریك‌سر طیف وکوتاهترین طول موج، که‌در ناحیه بنفش است، در سردیگر طیف وبقیه امواج‌نور در فاصله میان این دو موج در جای ویژه خود ظاهر

می‌شوند. گرچه رنگها دراین‌طیف مشخص هستندولی حد فاصلی برای آنها نمی‌توان یافت و در اسپکتروسکوپ یك‌نوار اتصالی از رنگها با طول موجهای مختلف ظاهر می‌گردد که «طیف نشری اتصالی» نامیده می‌شود و این طیف از ویژگیهای جامدات است.

طیف حاصل از کمان الکتریکی

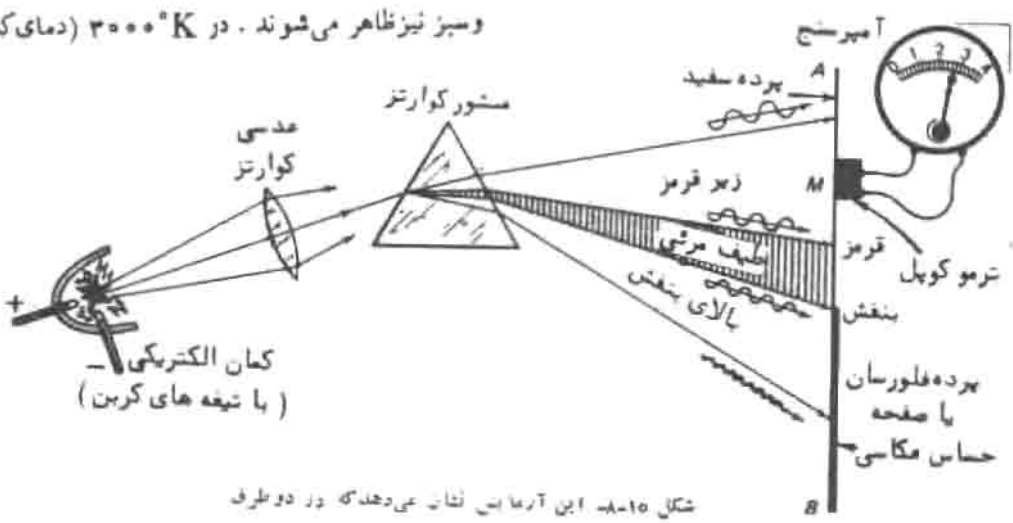
برای آنکه وجود طیف‌های بالای بنفش و زیر قرمز نشان داده شود آزمایش ساده‌ای مطابق شکل(۱۰-۸) می‌توان ترتیب داد. نورحاصل از یك کمان الکتریکی را از یك عدسی و یك منشور از جنس کوارتز عبور داده و در برابر آن پرده‌ای قرار می‌دهیم.

اگر درمنطقه‌ای‌که بعد از رنگ بنفش قرار دارد یك‌صفحه فلورسنت‌قرار دهیم این صفحه در اثر دریافت‌اشعه بالای بنفش‌شروع به‌تابش‌مرئی‌می‌کند و به‌این‌ترتیب وجود پرتوهای بالای بنفش‌ظاهرمی‌شود. اگر بجای صفحه فلورسنت یك فیلم یا یك شیشه حساس عکاسی بگذاریم و سپس‌آن را ظاهر و ثابت کنیم اثر پرتوهای بالای بنفش را برآن می‌توانیم ببینیم.

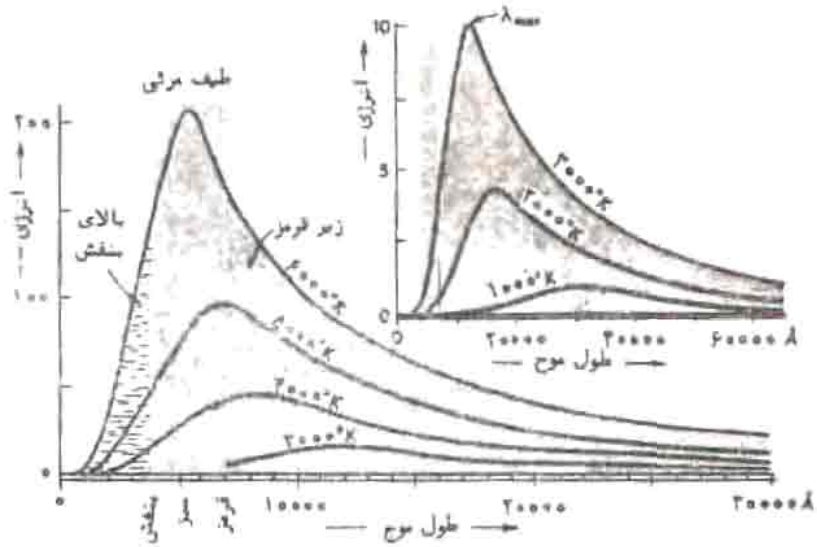
برای اثبات وجود اشعه زیر قرمز از یك ترموکوپل می‌توان استفاده کرد. قسمت حساس ترموکوپل‌را درناحیه بنفش قرارداده وآن‌رابتدریج به‌ناحیه‌قرمزوزیرقرمز می‌بریم در اینصورت‌آمپرمتر افزایش تدریجی شدت‌جریان‌را نشان می‌دهد تاآنکه دریك نقطه شدت جریان به‌ماکزیمم می‌رسد و از آن به‌بعد دوباره شدت کاهش می‌یابد و در نقطه دیگری به‌صفر می‌رسد.

درشکل (۱۰-۹) نمودار انرژی قسمت‌های مختلف‌طیف‌یك‌کمان‌الکتریکی‌دردماهای‌مختلف‌نشان داده شده است.

مطالعه این منحنی‌ها نشان می‌دهدکه دردما. های‌پائین‌شدت‌نوردرطیف‌مرئی‌ناچیزاست و دردمای ۱۰۰۰°K فقط قسمت کمی‌ازناحیه‌قرمز طیف‌مرئی دیده می‌شود ودر ۲۰۰۰°K نه‌تنهادرخشندگی ناحیه قرمز افزایش می‌یابد بلکه رنگ‌های نارنجی و زرد وسبز نیزظاهر می‌شوند. در ۳۰۰۰°K (دمای‌کمان



شکل ۱۰-۸ این آزمایش نشان می‌دهدکه در دوطرف طیف مرئی طیف بالای بنفش و زیر قرمز موجود است



شکل۱۵-۹- توزیع‌انرژی منتشر شده ازیک جسم جامد گرم در دماهای مختلف

الکتریکی با جریان ضعیف بادمای رشته تنگستن) تمام رنگهای طیف ظاهر می‌شود، ولی ماکزیمم تابش در ناحیه زیر قرمزاست. در ۶۰۰۰°K(دمای سطح خورشید) ماکزیمم‌انرژی تابشی ازناحیه سبز طیف مرئی تابش می‌شود ، و در دو طرف این طیف مرئی مقدار قابل توجهی پرتوهای زیر قرمز وبالای بنفش وجود دارد .

بطوری که درشکل دیده می‌شود در دماهای بالا (حدود ۶۰۰۰°K) طیف‌جسم ناحیه گسترده‌ای را تشکیل می‌دهد ولی آن‌چه بر چشم انسان اثر می‌کند فقط بخش کوچکی ازاین‌ناحیه گسترده‌است.

نشر وجذب نور (قانون کیرشهف)

میزان گرمائی که یک جسم جذب یا منتشر می‌کند تنها بادمای آن‌بستگی ندارد، بلکه به طبیعت سطح خارجی آن نیز مربوط است. اجسامی که بسهولت می‌توانند امواج ازخود تابش کنند، جذب کننده خوبی برای همان‌طول موجها نیز می‌باشند و یا به‌عبارت دیگر هر ماده همان نورهائی را جذب می‌کند که می‌تواند آنهارا تابش کند. این موضوع تحت عنوان «قانون تابش کیرشهف» مشهور است.

جسمی که سطح خارجی آن سیاه است بهمان ترتیب که جذب کننده خوبی است، تابش کننده خوبی خواهد بود واگرآن‌را بالایه‌نازکی‌ازفلز کروم پوشانیم، نشرکننده ضعیف وهم جذب کننده ضعیفی خواهدشد. ولی بهترین نمونه یک‌جسم سیاه که‌بتواند تمام تابشهای حرارتی‌را جذب‌کند جعبه‌ای است که درآن حفره‌ای ایجادشده است و در داخل این حفره پرتوهائی پوشیده ازدوده قراردارد و پرتوهای نوری که ازسوراخ وارد آن می‌شود دیگر خارج نخواهد شد.

سطوح فلزی صیقلی درحدود شش درصدانرژی

تابشی‌را جذب می کنند وبقیه‌را بازمی‌تابانند میزان جذب دربقیه مواد بین این دوحد است .

پرسش ۱۰-۱۰- چرا افراد در تابستان از لباس‌سفید ودر زمستان‌ازلباس سیاه استفاده‌می کنند؟

پارچه‌ابریشمی‌سیاه‌ویاسطحی که بادوده‌چراغ‌نفتی سیاه شده باشد ۹۷٪ پرتوهایی را که به‌آن می‌تابد می‌تواند جذب کند.

کوانتم نور ـ فوتون

اولین کوشش‌موفقیت‌آمیزبرای‌توضیح‌منحنی‌های‌تابش(شکل ۱۰-۹) بوسیله‌ماکس‌پلانک[1] انجام‌شد.

پلانک درسال ۱۹۰۰ میلادی‌تئوری خودرادر موردتابش نور اعلام‌کرد، او نظردادکه انرژی نور بصورت مقادیری‌منتشر می‌شود که در همه حال مضرب درستی ازیک مقدار معین می‌باشد.این‌مقدار معین کوانتم نامیده می‌شود.

پلانک برای محاسبه انرژی نور رابطه $E=nhf$ را پیشنهاد کرد. دراین رابطه E انرژی وf فرکانس‌ارتعاش‌وh عدد ثابتی‌است‌به‌نام‌ثابت‌پلانک که‌مقدارش$6/626\times10^{-34}Js$ است وn می‌تواند ۱ و ۲ و ۳ و ... باشد. در رابطه $E=nhf$ اگر $n=1$ باشد $E=hf$ خواهد بود و hf که معرف مقدار مشخصی انرژی (کوانتم) می‌باشد «فوتون» نامیده می‌شود.

هرفوتون دانه‌انرژی است‌که می‌تواندمربوط به‌امواج مرئی یاغیرمرئی بوده ورفتاری مانندموج یاذره‌داشته‌باشد. وباسرعت$3\times10^8m/s$درخلأ منتشر می‌شود. جرم فوتون ساکن صفر است.

پرسش ۱۰-۱۱- فوتون نور قرمز را با فوتون نوربنفش ازنظر انرژی مقایسه‌کنید.

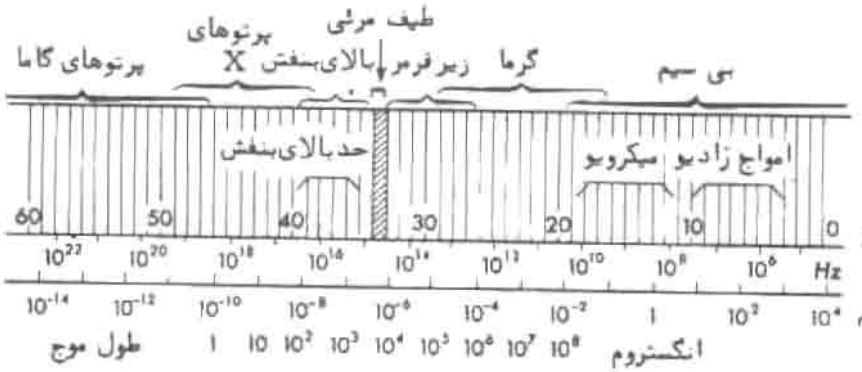
طیف‌کامل امواج الکترومانیتیک

امواج‌نور بصورت بالای بنفش ، مرئی و زیر قرمز فقط قسمت کوچکی در طیف تابشی امواج الکترومانیتیک‌راتشکیل می‌دهد ـ درشکل ۱۰-۱۰ طرح ساده‌ای از امواج الکترومانیتیک نشان داده شده.

بعداز امواج زیر قرمز بطرف طول موجهای بلند، به‌امواج گرمائی و امواج بی‌سیم میرسیم.

بعدازامواج بالای بنفش بطرف طول موجهای کوتاه ، به پرتوهای x و پرتوهای γ میرسیم . هرنوع موج الکترومانیتیک چه با طول موج خیلی دراز (مانند امواج رادیو به‌طول موج چندکیلومتر) چه‌باطول‌موج خیلی کوتاه (مانند پرتوهای γ باطول موج یک میلیون میلیونیم سانتیمتر) همه در محیط خلأ باسرعت تقریباً $3\times10^8m/s$ منتشرمی‌شوند. باآنکه سرعت همه‌آنها درخلأ یکی‌است ولی‌خواص آنهامتفاوت است. بعنوان مثال چشم انسان‌نمی‌تواند همه امواج الکترومانیتیک را ببیند ، بلکه از نوار بسیارگسترده شکل ۱۰-۱۰ فقط قسمت‌کوچکی از آن باچشم دیده می‌شود . مطلب دیگری‌که درباره امواج الکترومانیتیک باید بدانیم این است‌که هوا

۱ـ ماکس پلانک (۱۹۴۷-۱۸۵۸ میلادی) یکی از فیزیکدانان آلمانی است او چند جلدکتاب در مورد فیزیک تئوری تألیف‌کرد وبنام پدر تئوری‌کوانتم مشهور شد وبدلیل ارائه تئوری تابش اجسام سیاه در سال ۱۹۱۸ موفق به‌اخذ جایزه نوبل گردید.



شکل ۱۰ـ ۱۰ـ طیف ، طول موج و هرکدام امواج الکترومانیتیک

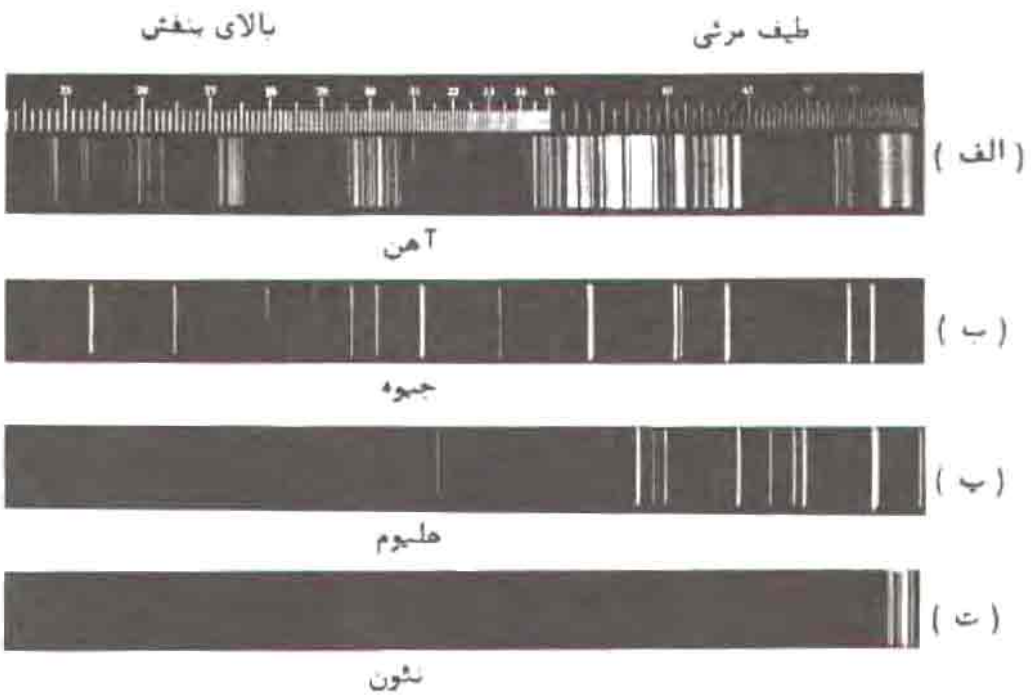
برای امواج الکترومانیتیک غیر از امواج بالای بنفش سخت (یعنی با طول موج کوتاه) شفاف است .

امواج بالای بنفش سخت در هوا جذب میشوند.

مه برای تمام امواج الکترومانیتیک به جز امواج بی‌سیم جسم کدر است .

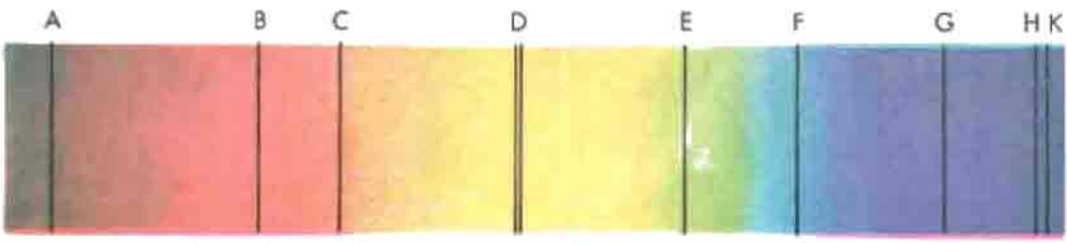
طیف نشری خطی

وقتی که شکاف یك اسپکتروسکپ با نور حاصل از یك لامپ جیوه یا یك لامپ سدیم یا یك لامپ نئون روشن شود در دوربین دستگاه بجای یك طیف پیوسته چند خط روشن دیده می‌شود. (شکل‌های ۱۰ـ ۱۱

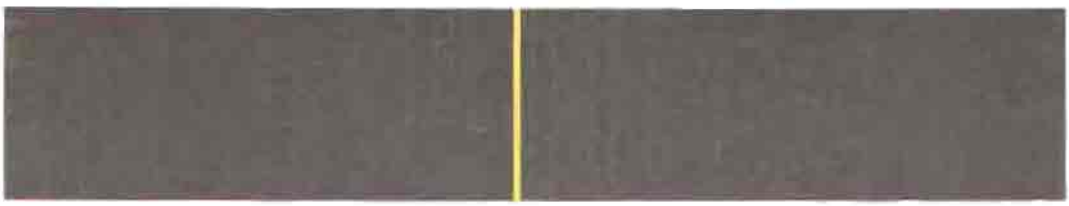


شکل ۱۰-۱۱- تصویر طیف نشری خطی چند عنصر در حالت گازی

و ۱۰-۱۲)

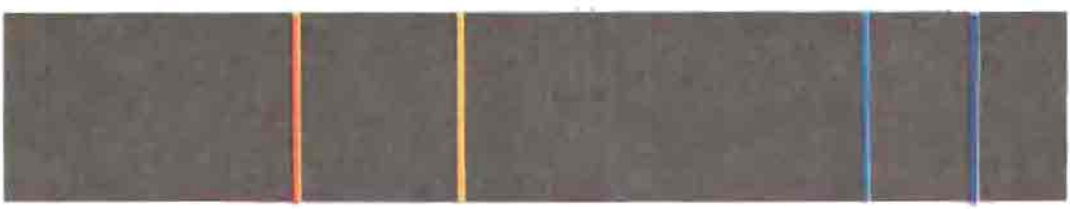


طیف خورشید



طیف بخار سدیم

طیف بخار جیوه



طیف بخار لیتیوم

طیف ئیدروژن

شکل ۱۰-۱۳

هر خط این طیف معرف یك ارتعاش سینوسی با طول موج مشخص می‌باشد که بوسیله اتم بخار یا گاز تابش می‌شود مطالعه این خطوط و طول موج آن‌ها نشان داده است که این خطوط بدسته‌هائی قابل تقسیم می‌باشند که شدت و تواتر آنها تابع نظم خاصی می‌باشد و هر یك از این دسته‌ها را یك سری طیف می‌نامند.

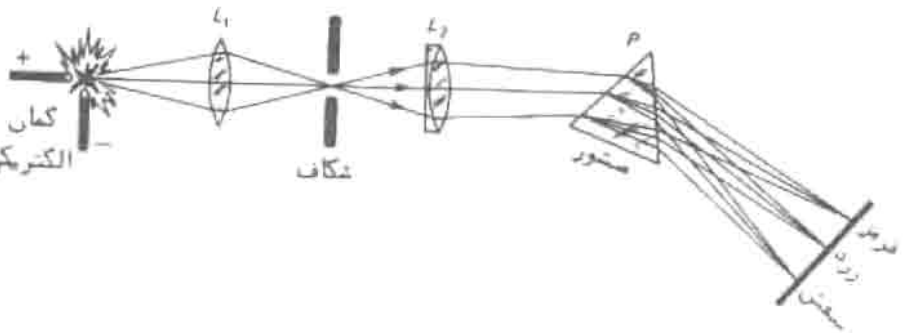
برای مشاهده خطوط طیف روی یك پرده بزرگ می‌توان آزمایشی مطابق شکل (۱۰ـ۱۳) انجام داد.

باید دانست که اجسام جامد ملتهب همیشه طیف نشری اتصالی تولید می‌کنند درصورتیکه گازها در دمای زیاد و فشار کم تولید طیف خطی می‌کنند.

تشکیل می‌شود.

طیف جذبی خطی

برای تشکیل طیف جذبی خطی نور سفید کاملی را از داخل یك گاز عبور داده سپس طیف آن را تشکیل می‌دهند. مطابق شکل (۱۰ـ۱۴) نور سفید حاصل از یك کمان الکتریکی با تیغه‌های کربن پس از عبور از عدسی L_1 وارد لولهٔ شیشه‌ای محتوی بخار سدیم میگردد. سپس این اشعه بوسیله عدسی L_2 روی شکاف C متمرکز می‌شود و نور خارج شده از شکاف پس از



شکل ۱۰ـ ۱۳ـ کمان الکتریکی با تیغه‌های کربنی یک طیف نشری خطی روی یک پرده بزرگ تشکیل می‌دهد .

طیف جذبی پیوسته

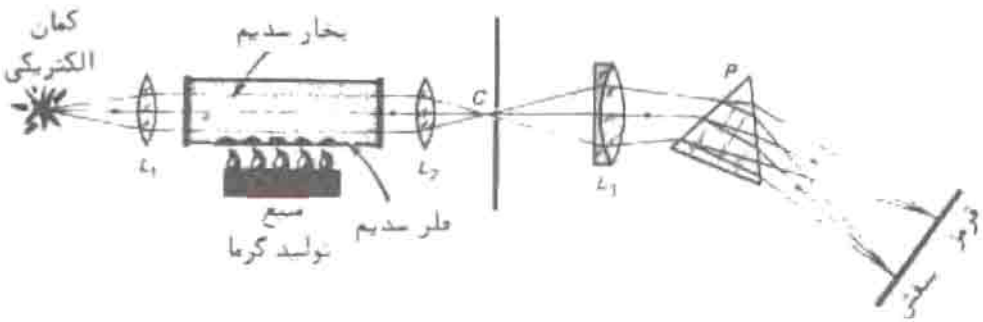
اگر نور مولد طیف نشری اتصالی را از یك جسم جامد یا مایع شفاف عبور دهیم و آنرا بر شکاف اسپکتروسکوپ بتابانیم طیف حاصل یك طیف پیوسته جذبی خواهد بود. آسانترین راه برای تشکیل دادن این قبیل طیف‌ها عبور نور سفید از شیشه‌های رنگی است. بطور مثال اگر مقابل نور سفید یك صافی قرمز قرار دهیم تمام رنگ‌ها بجز نور قرمز بوسیله شیشه جذب میشود و درنتیجه روی صفحه طیف فقط طیف ناحیه قرمز

عبور از عدسی L_2 به منشور می‌تابد، و روی صفحه پشت عدسی طیف تشکیل می‌دهد.

علت انتخاب بخار سدیم آن است که تهیه و استفاده از آن آسان می‌باشد.

برای تولید بخار سدیم کافی است مقدار کمی فلز سدیم را درون لوله شیشه‌ای که تا اندازه‌ای از هوا تخلیه شده است قرار دهیم و با استفاده از یك چراغ گاز آن را گرم کنیم. به‌محض آنکه داخل لوله از بخار سدیم پرشود روی طیف در ناحیه زرد یك خط تاریك ظاهر می‌شود.

اگر از طیف جذبی خطی فوق عکسبرداری



شکل۱۵ـ۱۴ـ آزمایشی که درآن خطوط نوری بوسیله بخار سدیم جذب شده است.

کنیم و طول فیلم یا شیشه عکاسی تا ناحیه بالای بنفش ادامه پیداکند خطوط جذبی بسیاری در قسمت نامرئی نیز ظاهر می‌شود شکل (۱۵ـ۱۵):

برای تشکیل سری‌های منظم ازخطوط جذبی مانند آنچه‌که در بالا به‌آن اشاره شد می‌توان غیر از سدیم‌از فلزات قلیائی دیگر مانند لیتیم، پتاسیم، روبیدیم ومیزیم استفاده کرد. تمام این‌عناصر درحالت گازی چند خط جذبی نیز در ناحیه بالای بنفش دارند.

طیف خورشید

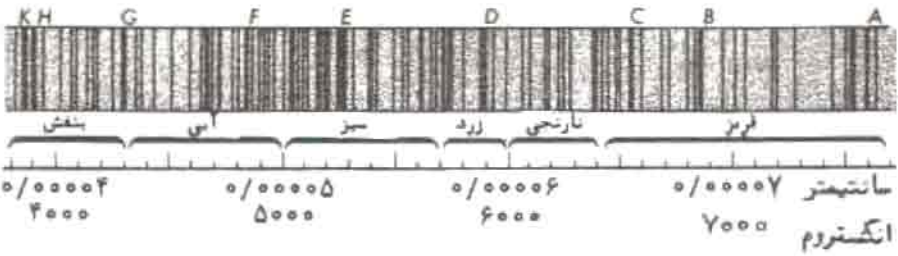
طیف خورشید که بصورت یک طیف رنگی اتصالی است بوسیله هزاران خط تاریک قطع شده است.

این طیف اولین‌بار بوسیله ولاستون[1] مشاهده شده ودرسال ۱۸۱۷ فرانهوفر[2] آنهارا موردمطالعه دقیق قرار داد و تعداد هشت خط از این مجموعه را با حروف A،B،C،D،E،F،G،H نشان داد. مشخص‌ترین‌این خطوط‌که، خطوط فرانهوفر نامیده می‌شوند درشکل(۱۵ـ۱۶) دیده می‌شود.

درسال ۱۸۸۲رولند[3] دانشمند امریکائی عکسی از طیف خورشید تهیه کرد که طول آن ۱۲ متر بود و در شکل (۱۵ـ۱۷) قسمت کوچکی از آن مشاهده می‌شود.

شکل۱۵ـ۱۵ـ طیف جذبی بخار سدیم

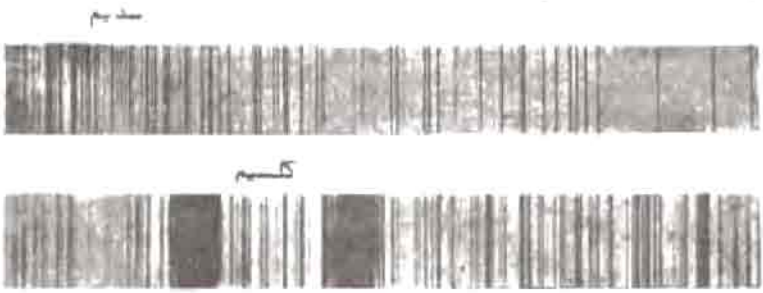
۱ـ Wollaston ۲ـ Fraunhofer ۳ـ (H_A_Rowland)



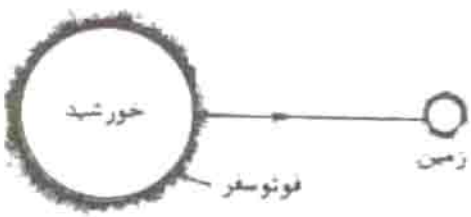
شکل ۱۵-۱۶- طیف خورشیدکه در آن خطوط فرانهوفر بوسیله حروف الفبا مشخص شده است.

باتوجه به‌آنکه دمای سطح خورشید حدود ۶۰۰۰°k می‌باشد طیف آن باید یک طیف پیوسته باشد درصورتیکه عبور نور خورشید از اتمسفر آن باعث جذب بعضی ازطول‌موجهای آن می‌شود وخطوط سیاه را درطیف نور خورشید باعث می‌گردد.

گازهائی که در مسیر نور خورشید هستند (اتمسفر زمین وخورشید) طول موجهائی را جذب می‌کنندکه طبق قانون‌کیرشهف اگرگرم شوند می‌توانند تابش نمایند، از اینرو خطوط سیاه طیف خورشید معرف عناصر شیمیائی است که در مسیر

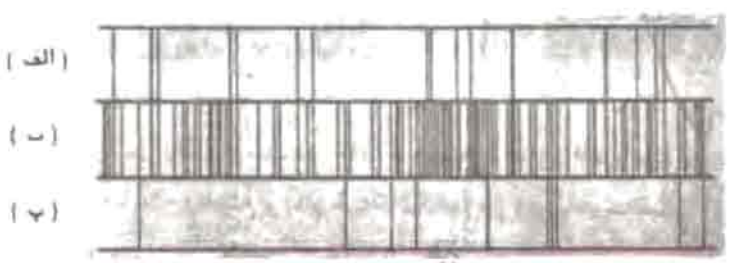


شکل۱۶-۱۷- دوتصویرکوچك ازطیف خورشیدی‌که بوسیله رولند تهیه شده است.



الف- نور خورشید قبل از رسیدن بچشم ناظر از اتمسفر خورشید وزمین می‌گذرد.

شکل۱۰-۱۸



طیف حاصل از کمان الکتریکی با تیغه های آهنی
طیف خورشید
طیف حاصل از کمان الکتریکی باتیغه های کلسیم

نور قرار گرفته است (شکل ۱۵-۱۸ الف).

بطوری که در شکل دیده می‌شود نوارهای بالا و پائین الف و پ که معرف طیف‌های خطی قوس آهن و کلسیم می‌باشد درست در برابر بعضی از خطوط سیاه طیف خورشید قرار دارد و از اینرو می‌توان نتیجه گرفت که در مسیر نور خورشید آهن و کلسیم موجود است. با این روش مقایسه‌ای می‌توان از وجود تعداد زیادی از عناصر موجود در خورشید آگاه شد.

به این پرسشها پاسخ دهید :

۱ــ سه آزمایش بیان کنید که نشان دهند نور به خط راست منتشر می‌شود .

۲ــ آیا به منظور داشتن یك پرتو نور می‌توانیم نور را از سوراخ بسیار ریزی عبور دهیم ؟ توضیح دهید .

۳ــ آیا یك پرتو نور را آنطور که مورد نظر است عملا می‌توان ایجاد کرد؟ توضیح دهید.

۴ــ نیوتن چگونه نشان داد که نور سفید یك نور مرکب است ؟

۵ــ با سابقه آشنائی که درباره اتر دارید بگوئید چرا فرض شد که برای انتشار نور سیالی به نام اتر لازم است ؟

۶ــ با توجه به این که امواج نور عرضی هستند این اتر فرضی چه خاصیتی می‌بایست داشته باشد تا محیط مکانیکی مناسبی برای انتشار موجهای نور باشد ؟

۷ــ آیا پدیده تداخل در امواج صوتی نیز اتفاق می‌افتد ؟ یادآور می‌شویم که امواج صوتی در هوا به طور طولی و امواج نوری به طور عرضی منتشر می‌شوند .

۸ــ اگر آزمایش یانگ عیناً در آب انجام گیرد چه تغییری در وضعیت نوارها نسبت به هوا حاصل می‌شود ؟ توضیح دهید .

۹ــ اگر از میان شکاف باریك انگشتان دست خود به آسمان روشن یا به یك منبع نور نگاه کنیم نوارهای تاریك و روشنی را مشاهده می‌کنیم ، این نوارها مربوط به پدیده تداخل هستند یا پدیده تفرق ؟ توضیح دهید .

۱۰ــ در آزمایش یانگ کدام یك از پدیده‌های زیر اتفاق می‌افتد ؟ تداخل ، تفرق ، هم تداخل و هم تفرق .

۱۱ــ در چه صورت دو چشمه نور را همسان (کوهرنت) گویند ؟

۱۲ــ چرا شرط لازم برای ایجاد پدیده تداخل داشتن دو چشمه همسان است ؟

۱۳ــ چگونه می‌توان دو یا چند چشمه نور همسان به دست آورد ؟

۱۴ـ آیا می‌توان دوچشمه همسان نور را دو تصویرمجازی یك منبع نور (مثلاًیك شکاف که ازآن پرتوهای نورگسیل می‌شود) در دوآینه تخت متقاطع دانست ؟ برای این‌که این دوتصویر مجازی به‌هم خیلی نزدیك باشند (به‌فاصله چندمیلیمتر) دوآینه‌نسبت به‌هم چه‌وضعی باید داشته باشند ؟ شکاف منبع نوررا موازی با فصل مشترك دوآینه بگیرید و دوتصویرمجازی آن را که خیلی به‌هم نزدیك باشند در دوآینه بارسم دقیق مسیر پرتوهاپیداکنید .

۱۵ـ درنظربگیریدکه درآزمایش یانگ دوشکاف به‌وسیله نورتك‌رنگ قرمزروشن شده‌است ونوارهای تداخلی برروی پرده‌ای موازی باسطح شکافها تشکیل گردیده است برای اینکه فاصله دونوار روشن مـوالی را زیادکنیم می‌توانیم :

۱ـ به‌جای نور تك‌رنگ قرمز ، نور تك‌رنگ بنفش به‌کار بریم .

۲ـ فاصله پرده را ازشکافها زیادترکنیم .

۳ـ دوشکاف را به‌هم‌نزدیکترکنیم.

۴ـ عرض شکافها راکمترکنیم . (درجواب درست بحث‌کنید)

۱۶ـ اگردرآزمایش یانگ شکافها با نور سفید روشن شوند ، نوارهای تداخلی چگونـه خواهند بود ؟

این مسئله‌ها را حل کنید

۱ـ طول‌موج پرتو نور تك‌رنگی درخلأ $۵/۰۰۰ \times ۱۰^{-۳}$ سانتیمتر است. مطلوب‌است:

الف) بسامد و فرکانس این پرتو .

ب) سرعت و طول موج آن در شیشه‌ای به ضریب شکست $n = ۱/۵۰$. سرعت نوررا درخلأ $۳/۰۰ \times ۱۰^{۵}$ کیلومتر برثانیه بگیرید .

جواب :

$$\lambda = ۳۳۳۰\,\text{Å} \quad , \quad v = ۲ \times ۱۰^{۵}\,\frac{\text{km}}{\text{s}} \quad , \quad f = ۶ \times ۱۰^{۱۴}\,\text{s}. \quad T \approx ۱/۶۷ \times ۱۰^{-۱۵}\,\text{s}$$

۲ـ درآزمایشی دوشکاف باریك و موازی توسط نور قرمز به‌طول موج $\lambda = ۶۴۳۸\,\text{Å}$ روشن شده است ونوارها در فاصله ۸۰/۰ سانتیمتری صفحه شکافها توسط یك‌میکروسکپ مدرج اندازه‌گیری شده است . اگر دراین آزمایش فاصله نوار روشن پانزدهم از نوار وسطی ۸/۶۲ میلیمتر باشد فاصله دوشکاف را تا سه‌رقم معنی‌دار مشخص کنید .

جواب : ۰/۸۹۶mm

یکدیگر ۳/۰ میلیمتراست روشن کرده‌ایم وتوارهای تداخلی را روی صفحه‌ای به‌فاصله ۳/۰۰ متر ازصفحه شکافها تشکیل داده‌ایم اگر از وسط نوار روشن اول تا وسط نوار روشن مرکزی ۰/۰۰ میلیمتر فاصله باشد .

الف) طول موج‌نور به‌کار رفته چه‌اندازه است ؟

ب) اگر عرض نوارهای تاریك وروشن یکی باشد اندازه عرض هرنوار چیست ؟

جواب : الف) ۶۰۰۰Å ب) ۰/۳۰mm

۲ـ انرژی وابسته به‌فوتونهای زیررا حساب‌کنید .

الف) فوتون تابش شده ازیك جسم سیاه دارای طول‌موج ۵۴۰۰ آنگستروم

ب) فوتون مربوط به پرتو گاما با طول موج ۰/۰۱ آنگستروم

پ) فوتون مربوط به‌یك پرتو گرمائی با طول موج ۱ میکرون .

پاسخ به‌پرسشهای متن بخش ۱۰

۱۰ـ۱) زیرا زمان انتقال علامت نوری از یك ناظر به‌ناظر دیگر آن‌قدر کوتاه بود که برآورد آن با روشی که به‌کار رفته بود غیرممکن بود .

۱۰ـ۲) به‌علت سرعت خیلی زیاد نور وعدم امکان اندازه‌گیری زمانهای کوتاه‌که نور برای پیمودن فواصل محدود در روی زمین لازم دارد .

۱۰ـ۳) تئوری ذره‌ای نیوتن پیش‌گوئی می‌کندکه سرعت ذرات نور دریك محیط شفاف مانند آب به‌سبب نیروی جاذبه‌ای‌کـه از طرف ملکولهای محیط برآنهـا وارد می‌شود همواره افزایش می‌یابد ولی تئوری موجی نور طبق رابطهٔ (۱۰ـ۲) پیش‌گوئی می‌کند که این سرعت کاهش می‌یابد . آزمایش نیزکاهش سرعت را نشان می‌دهد یعنی نظریه موجی را تأیید می‌کند .

۱۰ـ۴) سرعت وطول موج نور هردوکم می‌شوند ولی تواتر نور تغییر نمی‌کند .

۱۰ـ۵) نـور سفید آمیزه‌ای از رنگهـا است . سرعت هـریك از این رنگهـا درشیشه متفاوت است به‌عبارت دیگر ضریب‌شکست شیشه برای این‌رنگها یکی‌نیست . بنابراین وقتی‌که یك‌دسته پرتو نور سفید برمنشور مـی‌تابد هررنگ با زاویه شکست ویژه خودکه برای رنگهای دیگر متفاوت است شکست می‌یابد درنتیجه رنگهای تشکیل دهنده نورسفید ازهم جدا می‌شوند و به‌شکل طیف هفت رنگ ظاهرمی‌گردند . همین‌عمل در دانه‌های باران نیزصورت می‌گیرد و رنگین‌کمان‌را درآسمان به‌وجودمی‌آورد .

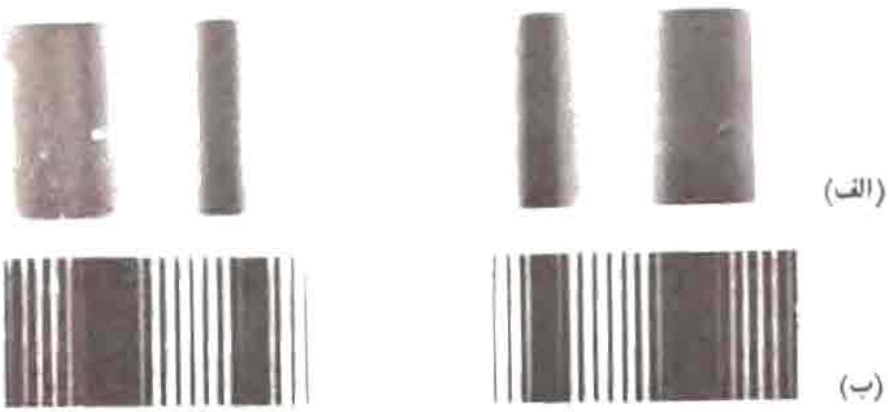
۱۰-۶) به‌شکل نیم‌استوانه

که درشکل (۱۰-۲) دیده می‌شود .

۱۰-۷) زیرا هر نقطه ازلبه هریك ازاجسام ، خود منبع ایجاد موج‌نورجداگانه می‌شود .

۱۰-۸) به طورکلی ، پدیده تداخل در اثر تلاقی تعداد محدودی امواج نـور حاصل از چشمه‌های همسان (دوموج درآزمایش دوشکاف یانگ) به‌وجود می‌آید ، درصورتی‌که پدیده تفرق ، طبق اصل هویگنس ازتلاقی امواج نور حاصل ازتعداد نامحدودی چشمه نقطه‌ای واقع برجبهه موج ، درلحظه‌ای‌که این جبهه ازسطح شکاف می‌گذرد ، تولید می‌گردد .

درشکل (۱۰-۱۹-الف) پدیده تفرق حاصل ازگسیل نور ازیك شکاف باریك‌نشان داده شده است ولی درشکل (۱۰-۱۹-ب) نوارهای تداخلی حاصل‌ازگسیل نور ازدوشکاف باریك و موازی دیده می‌شود . این‌نوارها در زمینه روشن نوارهای تفرقی شکل الف تشکیل یافته‌اند به‌طوری‌که اگریکی ازشکافها را بپوشانیم نوارهای تداخلی ازبین مـی‌روند وزمینه نوارهای تفرقی باقی می‌ماند .



شکل۱۰-۱۹- مقایسه نوارهای تداخلی و تفرقی نور

۱۰- ۹) تئوری موجی بودن نور به‌این پرسش وقتی توانست پاسخ دهدکه طول موج نور توسط یانگ حساب شد ومعلوم گردیدکه بسیار کوچك است ، به‌طوری‌که طول موج نور قرمز هم که بزرگترین مقدار را درطیف مرئی دارد از هزارم میلیمتر کوچکتر است . بنابراین یك دسته پرتو نور وقتی‌که ازیك سوراخ به‌قطر چند میلیمتر یا بزرگتر می‌گذرد به نظر می‌رسد که به خط راست منتشر می‌شود .

۱۰-۱۰) زیرا لباس سفید جذب کننده ضعیف ولباس سیاه جذب کننده قوی می‌باشد.

۱۰-۱۱) فرکانس‌نور بنفش بیشتر ازفرکانس‌نورقرمزاست‌وطبق رابطه $E=hf$ اندازه‌انرژی فوتون نوربنفش بیشتر خواهد بود.

دستگاه رسمی یکاهای اندازه‌گیری

نام یکاهای پایه این دستگاه بقرار زیر است:

الف : متر یکای درازا (طول)

ب : کیلوگرم » توده (جرم)

ج : ثانیه » زمان

د : آمپر[1] » شدت جریان‌الکتریسیته

ه : کلوین[2] » دما (درجه حرارت)

و : کاندلا[3] » شدت نور

ز : مل[4] » مقدار ماده

تعریف یکاهای پایه:

متر: درازائی‌است‌مساوی‌با ۱۶۵۰۷۶۳/۷۳ برابر طول موج در خلأ پرتو اتم کریپتون[5] ۸۶ که درانتقال بین دوتراز انرژی $2p_{10}$ و $5d_5$ ایجاد میشود.

کیلوگرم: توده استوانه‌ای است از آلیاژ پلاتین وایریدیم[6] که درسال ۱۸۸۹ میلادی‌مطابق با ۱۲۶۸ هجری‌شمسی بعنوان‌نمونه اصلی‌کیلوگرم موردقبول کنفرانس عمومی اوزان و مقیاسها واقع شده است و اکنون در دفتر بین‌المللی اوزان و مقیاسها واقع درشهرسور[7] فرانسه نگهداری‌میشود.

ثانیه: مدتی است مساوی ۹۱۹۲۶۳۱۷۷۰ برابر دوره تناوب پرتو مربوط به انتقال بین دو تراز بسیار ظریف (هیپرفن) وابسته بحالت بنیادی اتم سزیم[8] ۱۳۳.

آمپر: شدت جریان الکتریسیته ثابتی‌است‌که چون از دو هادی مستقیم متوازی بطول بسیار بلند و سطح مقطع بسیار کوچك دایره‌ای‌شکل که در خلأ بفاصله یکمتر از یکدیگر قرار گرفته باشند بگذرد نیروی الکترومغناطیسی که در نتیجه این جریان بین دوهادی ایجادمیشود برابر 2×10^{-7} نیوتن درهرمتر درازای آنها باشد.

یادآوری- نیوتن یکای نیرو است و در یکاهای فرعی تعریف میشود.

کلوین: دمای ترمودینامیکی است برابر با $\frac{1}{273/16}$ دمای ترمودینامیکی نقطه سه‌گانه آب، کلمه کلوین برای بیان اختلاف دما نیز بکار میرود.

اختلاف دما برحسب زینه سلسیوس[9] نیز بیان میشود.

هرزینه سلسیوس برابر یك‌زینه‌کلوین و صفر زینه‌بندی سلسیوس مطابق ۲۷۳/۱۵ از زینه‌بندی ترمودینامیکی است.

کاندلا: شدت نوری است که از روزنه‌ای بمساحت $\frac{1}{600000}$ متر مربع در امتداد عمود بر سطح روزنه منتشر میشود درصورتیکه این روزنه مانند تابنده کامل (جسم سیاه) در دمای انجماد پلاتین تابش‌کند.

مل (mol) یکای‌مقدارماده است وعبارتست از جرم تعداد کل‌ذرات (اعم‌ازملکول، اتم، یون، پروتون، الکترون، نوترون...) موجود در یك سیستم‌که برابر تعداد اتمهای موجود در ۱۲ گرم کربن ۱۲ (^{12}C) باشد.

۱- Ampere ۲- Kelvin ۳- Candela

۴- Mol ۵- Krypton ۶- Iridium

۷- Sevre ۸- Cesium ۹- Celsius

جدول عنصرها

Atomic number Z	*Symbol*	*Name*	*Atomic number Z*	*Symbol*	*Name*
1	H	Hydrogen	54	Xe	Xenon
2	He	Helium	55	Cs	Caesium
3	Li	Lithium	56	Ba	Barium
4	Be	Beryllium	57	La	Lanthanum
5	B	Boron	58	Ce	Cerium
6	C	Carbon	59	Pr	Praseodymium
7	N	Nitrogen	60	Nd	Neodymium
8	O	Oxygen	61	Pm	Promethium
9	F	Fluorine	62	Sm	Samarium
10	Ne	Neon	63	Eu	Europium
11	Na	Sodium	64	Gd	Gadolinium
12	Mg	Magnesium	65	Tb	Terbium
13	Al	Aluminium	66	Dy	Dysprosium
14	Si	Silicon	67	Ho	Holmium
15	P	Phosphorus	68	Er	Erbium
16	S	Sulphur	69	Tm	Thulium
17	Cl	Chlorine	70	Yb	Ytterbium
18	A	Argon	71	Lu	Lutetium
19	K	Potassium	72	Hf	Hafnium
20	Ca	Calcium	73	Ta	Tantalum
21	Sc	Scandium	74	W	Tungsten
22	Ti	Titanium	75	Re	Rhenium
23	V	Vanadium	76	Os	Osmium
24	Cr	Chromium	77	Ir	Iridium
25	Mm	Manganese	78	Pt	Platinum
26	Fe	Iron	79	Au	Gold
27	Co	Cobalt	80	Hg	Mercury
28	Ni	Nickel	81	Tl	Thallium
29	Cu	Copper	82	Pb	Lead
30	Zn	Zinc	83	Bi	Bismuth
31	Ga	Gallium	84	Po	Polonium
32	Ge	Germanium	85	At	*Astatine*
33	As	Arsenic	86	Rn	Radon
34	Se	Selenium	87	Fr	*Francium*
35	Br	Bromine	88	Ra	Radium
36	Kr	Krypton	89	Ac	Actinium
37	Rb	Rubidium	90	Th	Thorium
38	Sr	Strontium	91	Pa	Protactinium
39	Y	Yttrium	92	U	Uranium
40	Zr	Zirconium	93	Np	*Neptunium*
41	Nb	Niobium	94	Pu	*Plutonium*
42	Mo	Molybdenum	95	Am	*Americium*
43	Tc	*Technetium*	96	Cm	*Curium*
44	Ru	Ruthenium	97	Bk	*Berkelium*
45	Rh	Rhodium	98	Cf	*Californium*
46	Pd	Palladium	99	E	*Einsteinium*
47	Ag	Silver	100	Fm	*Fermium*
48	Cd	Cadmium	101	Mv	*Mendelevium*
49	In	Indium	102	No	*Nobelium*
50	Sn	Tin	103	Lw	*Lawrencium*
51	Sb	Antimony	104	Ku	*Kurchatovium*
52	Te	Tellurium	105	Ha	*Hahnium*
53	I	Iodine			

عناصری‌که با حروف ایتالیک نوشته شده‌اند درطبیعت یافت نمی‌شوند و به طورمصنوعی تهیه می گردند .

جدول سینوسها، کسینوسها و تانژانتها

زاویه	سینوس	کسینوس	تانژانت	زاویه	سینوس	کسینوس	تانژانت
0°	0.000	1.000	0.000	45°	0.707	0.707	1.000
1	0.017	1.000	0.017	46	0.719	0.695	1.036
2	0.035	0.999	0.035	47	0.731	0.682	1.072
3	0.052	0.999	0.052	48	0.743	0.669	1.111
4	0.070	0.998	0.070	49	0.755	0.656	1.150
5	0.087	0.996	0.087	50	0.766	0.643	1.192
6	0.105	0.995	0.105	51	0.777	0.629	1.235
7	0.122	0.993	0.123	52	0.788	0.616	1.280
8	0.139	0.990	0.141	53	0.799	0.602	1.327
9	0.156	0.988	0.158	54	0.809	0.588	1.376
10	0.174	0.985	0.176	55	0.819	0.574	1.428
11	0.191	0.982	0.194	56	0.829	0.559	1.483
12	0.208	0.978	0.213	57	0.839	0.545	1.540
13	0.225	0.974	0.231	58	0.848	0.530	1.600
14	0.242	0.970	0.249	59	0.857	0.515	1.664
15	0.259	0.966	0.268	60	0.866	0.500	1.732
16	0.276	0.961	0.287	61	0.875	0.485	1.804
17	0.292	0.956	0.306	62	0.883	0.469	1.881
18	0.309	0.951	0.325	63	0.891	0.454	1.963
19	0.326	0.946	0.344	64	0.899	0.438	2.050
20	0.342	0.940	0.364	65	0.906	0.423	2.145
21	0.358	0.934	0.384	66	0.914	0.407	2.246
22	0.375	0.927	0.404	67	0.921	0.391	2.356
23	0.391	0.921	0.424	68	0.927	0.375	2.475
24	0.407	0.914	0.445	69	0.934	0.358	2.605
25	0.423	0.906	0.466	70	0.940	0.342	2.747
26	0.438	0.899	0.488	71	0.946	0.326	2.904
27	0.454	0.891	0.510	72	0.951	0.309	3.078
28	0.469	0.883	0.532	73	0.956	0.292	3.271
29	0.485	0.875	0.554	74	0.961	0.276	3.487
30	0.500	0.866	0.577	75	0.966	0.259	3.732
31	0.515	0.857	0.601	76	0.970	0.242	4.011
32	0.530	0.848	0.625	77	0.974	0.225	4.331
33	0.545	0.839	0.649	78	0.978	0.208	4.705
34	0.559	0.829	0.675	79	0.982	0.191	5.145
35	0.574	0.819	0.700	80	0.985	0.174	5.671
36	0.588	0.809	0.727	81	0.988	0.156	6.314
37	0.602	0.799	0.754	82	0.990	0.139	7.115
38	0.616	0.788	0.781	83	0.993	0.122	8.144
39	0.629	0.777	0.810	84	0.995	0.105	9.514
40	0.643	0.766	0.839	85	0.996	0.087	11.43
41	0.656	0.755	0.869	86	0.998	0.070	14.30
42	0.669	0.743	0.900	87	0.999	0.052	19.08
43	0.682	0.731	0.933	88	0.999	0.035	28.64
44	0.695	0.719	0.966	89	1.000	0.017	57.29
45	0.707	0.707	1.000	90	1.000	0.000	

N	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	D
۶۰	۰۰۰۰۰	۰۰۴۳۲	۰۰۸۶۴	۰۱۲۹۶	۰۱۷۲۸	۰۲۱۶۰	۰۲۵۹۳	۰۳۰۲۵	۰۳۴۵۷	۰۳۸۸۹	۴۳۲
۵۹	۰۰۰۰۱	۰۰۴۳۳	۰۰۸۶۵	۰۱۲۹۷	۰۱۷۲۹	۰۲۱۶۱	۰۲۵۹۴	۰۳۰۲۶	۰۳۴۵۸	۰۳۸۹۰	۴۳۲
۵۸	۰۰۰۰۲	۰۰۴۳۴	۰۰۸۶۶	۰۱۲۹۸	۰۱۷۳۰	۰۲۱۶۲	۰۲۵۹۵	۰۳۰۲۷	۰۳۴۵۹	۰۳۸۹۱	۴۳۲
۵۷	۰۰۰۰۳	۰۰۴۳۵	۰۰۸۶۷	۰۱۳۰۰	۰۱۷۳۱	۰۲۱۶۳	۰۲۵۹۶	۰۳۰۲۸	۰۳۴۶۰	۰۳۸۹۲	۴۳۲
۵۶	۰۰۰۰۴	۰۰۴۳۶	۰۰۸۶۸	۰۱۳۰۱	۰۱۷۳۲	۰۲۱۶۴	۰۲۵۹۷	۰۳۰۲۹	۰۳۴۶۱	۰۳۸۹۳	۴۳۲
۵۵	۰۰۰۰۵	۰۰۴۳۷	۰۰۸۶۹	۰۱۳۰۲	۰۱۷۳۳	۰۲۱۶۵	۰۲۵۹۸	۰۳۰۳۰	۰۳۴۶۲	۰۳۸۹۴	۴۳۲
۵۴	۰۰۰۰۶	۰۰۴۳۸	۰۰۸۷۰	۰۱۳۰۳	۰۱۷۳۴	۰۲۱۶۶	۰۲۵۹۹	۰۳۰۳۱	۰۳۴۶۳	۰۳۸۹۵	۴۳۲
۵۳	۰۰۰۰۷	۰۰۴۳۹	۰۰۸۷۱	۰۱۳۰۴	۰۱۷۳۵	۰۲۱۶۷	۰۲۶۰۰	۰۳۰۳۲	۰۳۴۶۴	۰۳۸۹۶	۴۳۲
۵۲	۰۰۰۰۸	۰۰۴۴۰	۰۰۸۷۲	۰۱۳۰۵	۰۱۷۳۶	۰۲۱۶۸	۰۲۶۰۱	۰۳۰۳۳	۰۳۴۶۵	۰۳۸۹۷	۴۳۲
۵۱	۰۰۰۰۹	۰۰۴۴۱	۰۰۸۷۳	۰۱۳۰۶	۰۱۷۳۷	۰۲۱۶۹	۰۲۶۰۲	۰۳۰۳۴	۰۳۴۶۶	۰۳۸۹۸	۴۳۲
۵۰	۰۰۰۱۰	۰۰۴۴۲	۰۰۸۷۴	۰۱۳۰۷	۰۱۷۳۸	۰۲۱۷۰	۰۲۶۰۳	۰۳۰۳۵	۰۳۴۶۷	۰۳۸۹۹	۴۳۲
۴۹	۰۰۰۱۱	۰۰۴۴۳	۰۰۸۷۵	۰۱۳۰۸	۰۱۷۳۹	۰۲۱۷۱	۰۲۶۰۴	۰۳۰۳۶	۰۳۴۶۸	۰۳۹۰۰	۴۳۲
۴۸	۰۰۰۱۲	۰۰۴۴۴	۰۰۸۷۶	۰۱۳۰۹	۰۱۷۴۰	۰۲۱۷۲	۰۲۶۰۵	۰۳۰۳۷	۰۳۴۶۹	۰۳۹۰۱	۴۳۲
۴۷	۰۰۰۱۳	۰۰۴۴۵	۰۰۸۷۷	۰۱۳۱۰	۰۱۷۴۱	۰۲۱۷۳	۰۲۶۰۶	۰۳۰۳۸	۰۳۴۷۰	۰۳۹۰۲	۴۳۲
۴۶	۰۰۰۱۴	۰۰۴۴۶	۰۰۸۷۸	۰۱۳۱۱	۰۱۷۴۲	۰۲۱۷۴	۰۲۶۰۷	۰۳۰۳۹	۰۳۴۷۱	۰۳۹۰۳	۴۳۲
۴۵	۰۰۰۱۵	۰۰۴۴۷	۰۰۸۷۹	۰۱۳۱۲	۰۱۷۴۳	۰۲۱۷۵	۰۲۶۰۸	۰۳۰۴۰	۰۳۴۷۲	۰۳۹۰۴	۴۳۲
۴۴	۰۰۰۱۶	۰۰۴۴۸	۰۰۸۸۰	۰۱۳۱۳	۰۱۷۴۴	۰۲۱۷۶	۰۲۶۰۹	۰۳۰۴۱	۰۳۴۷۳	۰۳۹۰۵	۴۳۲
۴۳	۰۰۰۱۷	۰۰۴۴۹	۰۰۸۸۱	۰۱۳۱۴	۰۱۷۴۵	۰۲۱۷۷	۰۲۶۱۰	۰۳۰۴۲	۰۳۴۷۴	۰۳۹۰۶	۴۳۲
۴۲	۰۰۰۱۸	۰۰۴۵۰	۰۰۸۸۲	۰۱۳۱۵	۰۱۷۴۶	۰۲۱۷۸	۰۲۶۱۱	۰۳۰۴۳	۰۳۴۷۵	۰۳۹۰۷	۴۳۲
۴۱	۰۰۰۱۹	۰۰۴۵۱	۰۰۸۸۳	۰۱۳۱۶	۰۱۷۴۷	۰۲۱۷۹	۰۲۶۱۲	۰۳۰۴۴	۰۳۴۷۶	۰۳۹۰۸	۴۳۲
۴۰	۰۰۰۲۰	۰۰۴۵۲	۰۰۸۸۴	۰۱۳۱۷	۰۱۷۴۸	۰۲۱۸۰	۰۲۶۱۳	۰۳۰۴۵	۰۳۴۷۷	۰۳۹۰۹	۴۳۲
۳۹	۰۰۰۲۱	۰۰۴۵۳	۰۰۸۸۵	۰۱۳۱۸	۰۱۷۴۹	۰۲۱۸۱	۰۲۶۱۴	۰۳۰۴۶	۰۳۴۷۸	۰۳۹۱۰	۴۳۲
۳۸	۰۰۰۲۲	۰۰۴۵۴	۰۰۸۸۶	۰۱۳۱۹	۰۱۷۵۰	۰۲۱۸۲	۰۲۶۱۵	۰۳۰۴۷	۰۳۴۷۹	۰۳۹۱۱	۴۳۲
۳۷	۰۰۰۲۳	۰۰۴۵۵	۰۰۸۸۷	۰۱۳۲۰	۰۱۷۵۱	۰۲۱۸۳	۰۲۶۱۶	۰۳۰۴۸	۰۳۴۸۰	۰۳۹۱۲	۴۳۲
۳۶	۰۰۰۲۴	۰۰۴۵۶	۰۰۸۸۸	۰۱۳۲۱	۰۱۷۵۲	۰۲۱۸۴	۰۲۶۱۷	۰۳۰۴۹	۰۳۴۸۱	۰۳۹۱۳	۴۳۲
۳۵	۰۰۰۲۵	۰۰۴۵۷	۰۰۸۸۹	۰۱۳۲۲	۰۱۷۵۳	۰۲۱۸۵	۰۲۶۱۸	۰۳۰۵۰	۰۳۴۸۲	۰۳۹۱۴	۴۳۲
۳۴	۰۰۰۲۶	۰۰۴۵۸	۰۰۸۹۰	۰۱۳۲۳	۰۱۷۵۴	۰۲۱۸۶	۰۲۶۱۹	۰۳۰۵۱	۰۳۴۸۳	۰۳۹۱۵	۴۳۲
۳۳	۰۰۰۲۷	۰۰۴۵۹	۰۰۸۹۱	۰۱۳۲۴	۰۱۷۵۵	۰۲۱۸۷	۰۲۶۲۰	۰۳۰۵۲	۰۳۴۸۴	۰۳۹۱۶	۴۳۲
۳۲	۰۰۰۲۸	۰۰۴۶۰	۰۰۸۹۲	۰۱۳۲۵	۰۱۷۵۶	۰۲۱۸۸	۰۲۶۲۱	۰۳۰۵۳	۰۳۴۸۵	۰۳۹۱۷	۴۳۲
۳۱	۰۰۰۲۹	۰۰۴۶۱	۰۰۸۹۳	۰۱۳۲۶	۰۱۷۵۷	۰۲۱۸۹	۰۲۶۲۲	۰۳۰۵۴	۰۳۴۸۶	۰۳۹۱۸	۴۳۲
۳۰	۰۰۰۳۰	۰۰۴۶۲	۰۰۸۹۴	۰۱۳۲۷	۰۱۷۵۸	۰۲۱۹۰	۰۲۶۲۳	۰۳۰۵۵	۰۳۴۸۷	۰۳۹۱۹	۴۳۲
۲۹	۰۰۰۳۱	۰۰۴۶۳	۰۰۸۹۵	۰۱۳۲۸	۰۱۷۵۹	۰۲۱۹۱	۰۲۶۲۴	۰۳۰۵۶	۰۳۴۸۸	۰۳۹۲۰	۴۳۲
۲۸	۰۰۰۳۲	۰۰۴۶۴	۰۰۸۹۶	۰۱۳۲۹	۰۱۷۶۰	۰۲۱۹۲	۰۲۶۲۵	۰۳۰۵۷	۰۳۴۸۹	۰۳۹۲۱	۴۳۲
۲۷	۰۰۰۳۳	۰۰۴۶۵	۰۰۸۹۷	۰۱۳۳۰	۰۱۷۶۱	۰۲۱۹۳	۰۲۶۲۶	۰۳۰۵۸	۰۳۴۹۰	۰۳۹۲۲	۴۳۲
۲۶	۰۰۰۳۴	۰۰۴۶۶	۰۰۸۹۸	۰۱۳۳۱	۰۱۷۶۲	۰۲۱۹۴	۰۲۶۲۷	۰۳۰۵۹	۰۳۴۹۱	۰۳۹۲۳	۴۳۲
۲۵	۰۰۰۳۵	۰۰۴۶۷	۰۰۸۹۹	۰۱۳۳۲	۰۱۷۶۳	۰۲۱۹۵	۰۲۶۲۸	۰۳۰۶۰	۰۳۴۹۲	۰۳۹۲۴	۴۳۲
۲۴	۰۰۰۳۶	۰۰۴۶۸	۰۰۹۰۰	۰۱۳۳۳	۰۱۷۶۴	۰۲۱۹۶	۰۲۶۲۹	۰۳۰۶۱	۰۳۴۹۳	۰۳۹۲۵	۴۳۲
۲۳	۰۰۰۳۷	۰۰۴۶۹	۰۰۹۰۱	۰۱۳۳۴	۰۱۷۶۵	۰۲۱۹۷	۰۲۶۳۰	۰۳۰۶۲	۰۳۴۹۴	۰۳۹۲۶	۴۳۲
۲۲	۰۰۰۳۸	۰۰۴۷۰	۰۰۹۰۲	۰۱۳۳۵	۰۱۷۶۶	۰۲۱۹۸	۰۲۶۳۱	۰۳۰۶۳	۰۳۴۹۵	۰۳۹۲۷	۴۳۲
۲۱	۰۰۰۳۹	۰۰۴۷۱	۰۰۹۰۳	۰۱۳۳۶	۰۱۷۶۷	۰۲۱۹۹	۰۲۶۳۲	۰۳۰۶۴	۰۳۴۹۶	۰۳۹۲۸	۴۳۲
۲۰	۰۰۰۴۰	۰۰۴۷۲	۰۰۹۰۴	۰۱۳۳۷	۰۱۷۶۸	۰۲۲۰۰	۰۲۶۳۳	۰۳۰۶۵	۰۳۴۹۷	۰۳۹۲۹	۴۳۲
۱۹	۰۰۰۴۱	۰۰۴۷۳	۰۰۹۰۵	۰۱۳۳۸	۰۱۷۶۹	۰۲۲۰۱	۰۲۶۳۴	۰۳۰۶۶	۰۳۴۹۸	۰۳۹۳۰	۴۳۲
۱۸	۰۰۰۴۲	۰۰۴۷۴	۰۰۹۰۶	۰۱۳۳۹	۰۱۷۷۰	۰۲۲۰۲	۰۲۶۳۵	۰۳۰۶۷	۰۳۴۹۹	۰۳۹۳۱	۴۳۲
۱۷	۰۰۰۴۳	۰۰۴۷۵	۰۰۹۰۷	۰۱۳۴۰	۰۱۷۷۱	۰۲۲۰۳	۰۲۶۳۶	۰۳۰۶۸	۰۳۵۰۰	۰۳۹۳۲	۴۳۲
۱۶	۰۰۰۴۴	۰۰۴۷۶	۰۰۹۰۸	۰۱۳۴۱	۰۱۷۷۲	۰۲۲۰۴	۰۲۶۳۷	۰۳۰۶۹	۰۳۵۰۱	۰۳۹۳۳	۴۳۲
۱۵	۰۰۰۴۵	۰۰۴۷۷	۰۰۹۰۹	۰۱۳۴۲	۰۱۷۷۳	۰۲۲۰۵	۰۲۶۳۸	۰۳۰۷۰	۰۳۵۰۲	۰۳۹۳۴	۴۳۲
۱۴	۰۰۰۴۶	۰۰۴۷۸	۰۰۹۱۰	۰۱۳۴۳	۰۱۷۷۴	۰۲۲۰۶	۰۲۶۳۹	۰۳۰۷۱	۰۳۵۰۳	۰۳۹۳۵	۴۳۲
۱۳	۰۰۰۴۷	۰۰۴۷۹	۰۰۹۱۱	۰۱۳۴۴	۰۱۷۷۵	۰۲۲۰۷	۰۲۶۴۰	۰۳۰۷۲	۰۳۵۰۴	۰۳۹۳۶	۴۳۲
۱۲	۰۰۰۴۸	۰۰۴۸۰	۰۰۹۱۲	۰۱۳۴۵	۰۱۷۷۶	۰۲۲۰۸	۰۲۶۴۱	۰۳۰۷۳	۰۳۵۰۵	۰۳۹۳۷	۴۳۲
۱۱	۰۰۰۴۹	۰۰۴۸۱	۰۰۹۱۳	۰۱۳۴۶	۰۱۷۷۷	۰۲۲۰۹	۰۲۶۴۲	۰۳۰۷۴	۰۳۵۰۶	۰۳۹۳۸	۴۳۲
۱۰	۰۰۰۵۰	۰۰۴۸۲	۰۰۹۱۴	۰۱۳۴۷	۰۱۷۷۸	۰۲۲۱۰	۰۲۶۴۳	۰۳۰۷۵	۰۳۵۰۷	۰۳۹۳۹	۴۳۲
۹	۰۰۰۵۱	۰۰۴۸۳	۰۰۹۱۵	۰۱۳۴۸	۰۱۷۷۹	۰۲۲۱۱	۰۲۶۴۴	۰۳۰۷۶	۰۳۵۰۸	۰۳۹۴۰	۴۳۲
۸	۰۰۰۵۲	۰۰۴۸۴	۰۰۹۱۶	۰۱۳۴۹	۰۱۷۸۰	۰۲۲۱۲	۰۲۶۴۵	۰۳۰۷۷	۰۳۵۰۹	۰۳۹۴۱	۴۳۲
۷	۰۰۰۵۳	۰۰۴۸۵	۰۰۹۱۷	۰۱۳۵۰	۰۱۷۸۱	۰۲۲۱۳	۰۲۶۴۶	۰۳۰۷۸	۰۳۵۱۰	۰۳۹۴۲	۴۳۲
۶	۰۰۰۵۴	۰۰۴۸۶	۰۰۹۱۸	۰۱۳۵۱	۰۱۷۸۲	۰۲۲۱۴	۰۲۶۴۷	۰۳۰۷۹	۰۳۵۱۱	۰۳۹۴۳	۴۳۲
۵	۰۰۰۵۵	۰۰۴۸۷	۰۰۹۱۹	۰۱۳۵۲	۰۱۷۸۳	۰۲۲۱۵	۰۲۶۴۸	۰۳۰۸۰	۰۳۵۱۲	۰۳۹۴۴	۴۳۲
۴	۰۰۰۵۶	۰۰۴۸۸	۰۰۹۲۰	۰۱۳۵۳	۰۱۷۸۴	۰۲۲۱۶	۰۲۶۴۹	۰۳۰۸۱	۰۳۵۱۳	۰۳۹۴۵	۴۳۲
۳	۰۰۰۵۷	۰۰۴۸۹	۰۰۹۲۱	۰۱۳۵۴	۰۱۷۸۵	۰۲۲۱۷	۰۲۶۵۰	۰۳۰۸۲	۰۳۵۱۴	۰۳۹۴۶	۴۳۲
۲	۰۰۰۵۸	۰۰۴۹۰	۰۰۹۲۲	۰۱۳۵۵	۰۱۷۸۶	۰۲۲۱۸	۰۲۶۵۱	۰۳۰۸۳	۰۳۵۱۵	۰۳۹۴۷	۴۳۲
۱	۰۰۰۵۹	۰۰۴۹۱	۰۰۹۲۳	۰۱۳۵۶	۰۱۷۸۷	۰۲۲۱۹	۰۲۶۵۲	۰۳۰۸۴	۰۳۵۱۶	۰۳۹۴۸	۴۳۲
۰	۰۰۰۶۰	۰۰۴۹۲	۰۰۹۲۴	۰۱۳۵۷	۰۱۷۸۸	۰۲۲۲۰	۰۲۶۵۳	۰۳۰۸۵	۰۳۵۱۷	۰۳۹۴۹	۴۳۲
N	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	D

N	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	D
۵۵	۲۴۰۴	۲۴۱۱	۲۴۱۹	۲۴۲۷	۲۴۳۵	۲۴۴۳	۲۴۵۱	۲۴۵۹	۲۴۶۶	۲۴۷۴	۸
۵۴	۲۴۸۲	۲۴۹۰	۲۴۹۷	۲۵۰۵	۲۵۱۳	۲۵۲۰	۲۵۲۸	۲۵۳۶	۲۵۴۳	۲۵۵۱	۸
۵۳	۲۵۵۹	۲۵۶۶	۲۵۷۴	۲۵۸۱	۲۵۸۹	۲۵۹۷	۲۶۰۴	۲۶۱۲	۲۶۱۹	۲۶۲۷	۸
۵۲	۲۶۳۴	۲۶۴۲	۲۶۴۹	۲۶۵۷	۲۶۶۴	۲۶۷۲	۲۶۷۹	۲۶۸۶	۲۶۹۴	۲۷۰۱	۷
۵۱	۲۷۰۸	۲۷۱۶	۲۷۲۳	۲۷۳۰	۲۷۳۸	۲۷۴۵	۲۷۵۲	۲۷۶۰	۲۷۶۷	۲۷۷۴	۷
۵۰	۲۷۸۱	۲۷۸۹	۲۷۹۶	۲۸۰۳	۲۸۱۰	۲۸۱۸	۲۸۲۵	۲۸۳۲	۲۸۳۹	۲۸۴۶	۷
۴۹	۲۸۵۳	۲۸۶۰	۲۸۶۷	۲۸۷۵	۲۸۸۲	۲۸۸۹	۲۸۹۶	۲۹۰۳	۲۹۱۰	۲۹۱۷	۷
۴۸	۲۹۲۴	۲۹۳۱	۲۹۳۸	۲۹۴۵	۲۹۵۲	۲۹۵۹	۲۹۶۶	۲۹۷۳	۲۹۸۰	۲۹۸۷	۷
۴۷	۲۹۹۴	۳۰۰۰	۳۰۰۷	۳۰۱۴	۳۰۲۱	۳۰۲۸	۳۰۳۵	۳۰۴۲	۳۰۴۹	۳۰۵۵	۷
۴۶	۳۰۶۲	۳۰۶۹	۳۰۷۶	۳۰۸۳	۳۰۹۰	۳۰۹۷	۳۱۰۴	۳۱۱۱	۳۱۱۸	۳۱۲۵	۷
۴۵	۳۱۳۱	۳۱۳۸	۳۱۴۴	۳۱۵۱	۳۱۵۸	۳۱۶۵	۳۱۷۲	۳۱۷۹	۳۱۸۶	۳۱۹۲	۷
۴۴	۳۱۹۹	۳۲۰۶	۳۲۱۳	۳۲۲۰	۳۲۲۶	۳۲۳۳	۳۲۴۰	۳۲۴۷	۳۲۵۳	۳۲۶۰	۷
۴۳	۳۲۶۷	۳۲۷۳	۳۲۸۰	۳۲۸۷	۳۲۹۳	۳۳۰۰	۳۳۰۷	۳۳۱۳	۳۳۲۰	۳۳۲۷	۷
۴۲	۳۳۳۳	۳۳۴۰	۳۳۴۷	۳۳۵۳	۳۳۶۰	۳۳۶۷	۳۳۷۳	۳۳۸۰	۳۳۸۷	۳۳۹۳	۷
۴۱	۳۴۰۰	۳۴۰۶	۳۴۱۳	۳۴۱۹	۳۴۲۶	۳۴۳۳	۳۴۳۹	۳۴۴۶	۳۴۵۲	۳۴۵۹	۷
۴۰	۳۴۶۵	۳۴۷۲	۳۴۷۸	۳۴۸۵	۳۴۹۱	۳۴۹۸	۳۵۰۴	۳۵۱۱	۳۵۱۷	۳۵۲۴	۷
۳۹	۳۵۳۰	۳۵۳۶	۳۵۴۳	۳۵۴۹	۳۵۵۶	۳۵۶۲	۳۵۶۹	۳۵۷۵	۳۵۸۲	۳۵۸۸	۷
۳۸	۳۵۹۵	۳۶۰۱	۳۶۰۸	۳۶۱۴	۳۶۲۱	۳۶۲۷	۳۶۳۴	۳۶۴۰	۳۶۴۶	۳۶۵۳	۷
۳۷	۳۶۵۹	۳۶۶۶	۳۶۷۲	۳۶۷۸	۳۶۸۵	۳۶۹۱	۳۶۹۸	۳۷۰۴	۳۷۱۰	۳۷۱۷	۷
۳۶	۳۷۲۳	۳۷۲۹	۳۷۳۵	۳۷۴۲	۳۷۴۸	۳۷۵۴	۳۷۶۱	۳۷۶۷	۳۷۷۳	۳۷۷۹	۷
۳۵	۳۷۸۶	۳۷۹۲	۳۷۹۸	۳۸۰۵	۳۸۱۱	۳۸۱۷	۳۸۲۳	۳۸۳۰	۳۸۳۶	۳۸۴۲	۶
۳۴	۳۸۴۸	۳۸۵۵	۳۸۶۱	۳۸۶۷	۳۸۷۳	۳۸۷۹	۳۸۸۵	۳۸۹۱	۳۸۹۸	۳۹۰۴	۶
۳۳	۳۹۱۰	۳۹۱۶	۳۹۲۲	۳۹۲۸	۳۹۳۴	۳۹۴۰	۳۹۴۶	۳۹۵۲	۳۹۵۸	۳۹۶۴	۶
۳۲	۳۹۷۰	۳۹۷۶	۳۹۸۲	۳۹۸۸	۳۹۹۴	۴۰۰۰	۴۰۰۶	۴۰۱۲	۴۰۱۸	۴۰۲۴	۶
۳۱	۴۰۳۰	۴۰۳۶	۴۰۴۲	۴۰۴۸	۴۰۵۳	۴۰۵۹	۴۰۶۵	۴۰۷۱	۴۰۷۷	۴۰۸۳	۶
۳۰	۴۰۸۹	۴۰۹۵	۴۱۰۱	۴۱۰۷	۴۱۱۳	۴۱۱۸	۴۱۲۴	۴۱۳۰	۴۱۳۶	۴۱۴۲	۶
۲۹	۴۱۴۸	۴۱۵۳	۴۱۵۹	۴۱۶۵	۴۱۷۱	۴۱۷۷	۴۱۸۳	۴۱۸۸	۴۱۹۴	۴۲۰۰	۶
۲۸	۴۲۰۶	۴۲۱۲	۴۲۱۸	۴۲۲۳	۴۲۲۹	۴۲۳۵	۴۲۴۱	۴۲۴۷	۴۲۵۲	۴۲۵۸	۶
۲۷	۴۲۶۴	۴۲۷۰	۴۲۷۶	۴۲۸۱	۴۲۸۷	۴۲۹۳	۴۲۹۹	۴۳۰۴	۴۳۱۰	۴۳۱۶	۶
۲۶	۴۳۲۲	۴۳۲۸	۴۳۳۳	۴۳۳۹	۴۳۴۵	۴۳۵۱	۴۳۵۶	۴۳۶۲	۴۳۶۸	۴۳۷۴	۶
۲۵	۴۳۷۹	۴۳۸۵	۴۳۹۱	۴۳۹۶	۴۴۰۲	۴۴۰۸	۴۴۱۴	۴۴۱۹	۴۴۲۵	۴۴۳۱	۶
۲۴	۴۴۳۶	۴۴۴۲	۴۴۴۸	۴۴۵۳	۴۴۵۹	۴۴۶۵	۴۴۷۰	۴۴۷۶	۴۴۸۲	۴۴۸۸	۶
۲۳	۴۴۹۳	۴۴۹۹	۴۵۰۵	۴۵۱۰	۴۵۱۶	۴۵۲۲	۴۵۲۸	۴۵۳۳	۴۵۳۹	۴۵۴۵	۶
۲۲	۴۵۵۰	۴۵۵۶	۴۵۶۲	۴۵۶۷	۴۵۷۳	۴۵۷۹	۴۵۸۴	۴۵۹۰	۴۵۹۶	۴۶۰۱	۶
۲۱	۴۶۰۷	۴۶۱۳	۴۶۱۸	۴۶۲۴	۴۶۳۰	۴۶۳۵	۴۶۴۱	۴۶۴۷	۴۶۵۲	۴۶۵۸	۶
۲۰	۴۶۶۴	۴۶۶۹	۴۶۷۵	۴۶۸۱	۴۶۸۶	۴۶۹۲	۴۶۹۸	۴۷۰۳	۴۷۰۹	۴۷۱۵	۶
۱۹	۴۷۲۰	۴۷۲۶	۴۷۳۱	۴۷۳۷	۴۷۴۳	۴۷۴۸	۴۷۵۴	۴۷۵۹	۴۷۶۵	۴۷۷۱	۶
۱۸	۴۷۷۶	۴۷۸۲	۴۷۸۷	۴۷۹۳	۴۷۹۸	۴۸۰۴	۴۸۱۰	۴۸۱۵	۴۸۲۱	۴۸۲۷	۶
۱۷	۴۸۳۲	۴۸۳۸	۴۸۴۳	۴۸۴۹	۴۸۵۵	۴۸۶۰	۴۸۶۶	۴۸۷۱	۴۸۷۷	۴۸۸۳	۶
۱۶	۴۸۸۸	۴۸۹۴	۴۸۹۹	۴۹۰۵	۴۹۱۱	۴۹۱۶	۴۹۲۲	۴۹۲۸	۴۹۳۳	۴۹۳۹	۶
۱۵	۴۹۴۴	۴۹۵۰	۴۹۵۶	۴۹۶۱	۴۹۶۷	۴۹۷۲	۴۹۷۸	۴۹۸۴	۴۹۸۹	۴۹۹۵	۶
۱۴	۵۰۰۰	۵۰۰۶	۵۰۱۱	۵۰۱۷	۵۰۲۲	۵۰۲۸	۵۰۳۴	۵۰۳۹	۵۰۴۵	۵۰۵۱	۶
۱۳	۵۰۵۶	۵۰۶۲	۵۰۶۸	۵۰۷۳	۵۰۷۹	۵۰۸۵	۵۰۹۰	۵۰۹۶	۵۱۰۲	۵۱۰۷	۶
۱۲	۵۱۱۳	۵۱۱۹	۵۱۲۵	۵۱۳۰	۵۱۳۶	۵۱۴۲	۵۱۴۷	۵۱۵۳	۵۱۵۹	۵۱۶۴	۶
۱۱	۵۱۷۰	۵۱۷۶	۵۱۸۲	۵۱۸۷	۵۱۹۳	۵۱۹۹	۵۲۰۴	۵۲۱۰	۵۲۱۶	۵۲۲۱	۶
۱۰	۵۲۲۷	۵۲۳۳	۵۲۳۸	۵۲۴۴	۵۲۵۰	۵۲۵۵	۵۲۶۱	۵۲۶۷	۵۲۷۲	۵۲۷۸	۶
۹	۵۲۸۴	۵۲۸۹	۵۲۹۵	۵۳۰۱	۵۳۰۶	۵۳۱۲	۵۳۱۸	۵۳۲۳	۵۳۲۹	۵۳۳۵	۶
۸	۵۳۴۰	۵۳۴۶	۵۳۵۲	۵۳۵۷	۵۳۶۳	۵۳۶۹	۵۳۷۴	۵۳۸۰	۵۳۸۶	۵۳۹۱	۶
۷	۵۳۹۷	۵۴۰۳	۵۴۰۸	۵۴۱۴	۵۴۲۰	۵۴۲۵	۵۴۳۱	۵۴۳۷	۵۴۴۲	۵۴۴۸	۶
۶	۵۴۵۴	۵۴۵۹	۵۴۶۵	۵۴۷۱	۵۴۷۶	۵۴۸۲	۵۴۸۸	۵۴۹۳	۵۴۹۹	۵۵۰۵	۶
۵	۵۵۱۰	۵۵۱۶	۵۵۲۲	۵۵۲۷	۵۵۳۳	۵۵۳۹	۵۵۴۴	۵۵۵۰	۵۵۵۶	۵۵۶۱	۶
۴	۵۵۶۷	۵۵۷۳	۵۵۷۸	۵۵۸۴	۵۵۹۰	۵۵۹۵	۵۶۰۱	۵۶۰۷	۵۶۱۲	۵۶۱۸	۶
۳	۵۶۲۴	۵۶۲۹	۵۶۳۵	۵۶۴۱	۵۶۴۶	۵۶۵۲	۵۶۵۸	۵۶۶۳	۵۶۶۹	۵۶۷۵	۶
۲	۵۶۸۰	۵۶۸۶	۵۶۹۲	۵۶۹۷	۵۷۰۳	۵۷۰۹	۵۷۱۴	۵۷۲۰	۵۷۲۶	۵۷۳۱	۶
۱	۵۷۳۷	۵۷۴۳	۵۷۴۸	۵۷۵۴	۵۷۶۰	۵۷۶۵	۵۷۷۱	۵۷۷۷	۵۷۸۲	۵۷۸۸	۶
۰	۵۷۹۴	۵۷۹۹	۵۸۰۵	۵۸۱۱	۵۸۱۶	۵۸۲۲	۵۸۲۸	۵۸۳۳	۵۸۳۹	۵۸۴۵	۶
N	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	D

1) Contemporary Physics, Fred W. Inman and Carl E. Miller
2) A Contemporary View of Elementary Physics, Borowitz and Bornstein
3) Modern College Phyisics, Harvey e. White
4) Physics, Irwin Genzer, Philip Youngner
5) Project Physics, Texte and Hand books
6) Physics Taffel
7) The Science of Physices. Arthur Beiser
8) Mechanice, Volume 1 Berkeley Physics Course
9) Physique, Terminale C. J.Sessac, G.Tréherne
10) Electricite, et Magnétique, P.Fleury et J. P. Mathieu
11) Mecanique, P. Fleury et J.P. Mathieu
12) Image Optique, P. Fleury et J.P. Mathieu