بسم الله الرحمن الرحیم

فیزیک

دورهٔ پیش‌دانشگاهی

رشتهٔ علوم تجربی

عنوان و نام پدیدآور : فیزیک دورهٔ پیش‌دانشگاهی رشتهٔ علوم تجربی [کتاب‌های درسی] : ۲۸۸/۱/ برنامه‌ریزی محتوا و نظارت بر تألیف : دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری؛ شورای برنامه‌ریزی و مؤلفان : احمد احمدی ... [و دیگران].
مشخصات نشر : تهران : شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۵.
مشخصات ظاهری : ۲۱۹ ص. : مصور (رنگی)، جدول (رنگی)، نمودار
شابک : ۹۶۴ـ۰۵ـ۱۱۷۷ـ۳
وضعیت فهرست‌نویسی : فیپا
یادداشت : کتابنامه : ص. ۲۱۹
یادداشت : شورای برنامه‌ریزی و مؤلفان احمد احمدی،... [و دیگران]
موضوع : فیزیک
شناسهٔ افزوده : احمدی، احمد، ۱۳۴۷–
شناسهٔ افزوده : سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی. دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری. ادارهٔ کلّ نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی.
رده‌بندی دیویی : ۲۸۸/۱ ک ۳۷۳
شمارهٔ کتابشناسی ملی : ۱۱۱۷۳۸۸

۱۳۹۶

وزارت آموزش و پرورش
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

نام کتاب :	**فیزیک دورهٔ پیش‌دانشگاهی ـ ۲۸۸/۱**
پدیدآورنده :	**سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی**
مدیریت برنامه‌ریزی درسی و تألیف :	**دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری**
شناسه افزوده برنامه‌ریزی و تألیف :	**احمد احمدی، اعظم پورقاضی، روح‌اللّه خلیلی‌بروجنی، ابوالقاسم زال‌پور، سیّدمهدی شیوایی، شیرین فراهانی، حسن عزیزی و غلامعلی محمودزاده (اعضای شورای برنامه‌ریزی و تألیف) ـ محمدکاظم بهنیا(ویراستار)**
مدیریت آماده‌سازی هنری :	**ادارهٔ کلّ نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی**
شناسه افزوده آماده‌سازی :	**لیدا نیک‌روش (مدیر امور فنی و چاپ) ـ طاهره حسن‌زاده (طراح جلد) ـ راحله زادفتح‌اله، خدیجه محمدی (صفحه‌آرا) ـ فاطمه رئیسیان فیروزآباد، مریم دهقان‌زاده(رسام) ـ فاطمه باقری مهر، آذر روستایی فیروزآباد، فرشته ارجمند، سپیده ملک‌ایزدی، حمید ثابت کلاچاهی، ناهید خیام‌باشی (امور آماده‌سازی)**
نشانی سازمان :	**تهران : خیابان ایرانشهر شمالی ـ ساختمان شمارهٔ ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)** **تلفن : ۹ـ ۸۸۸۳۱۱۶۱، دورنگار : ۸۸۳۰۹۲۶۶، کد پستی : ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹**
ناشر :	**شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران : تهران ـ کیلومتر ۱۷ جادهٔ مخصوص کرج ـ خیابان ۶۱(داروپخش)** **تلفن : ۵ ـ ۴۴۹۸۵۱۶۱، دورنگار : ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی : ۱۳۹ـ۳۷۵۱۵**
چاپخانه :	**شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»**
سال انتشار و نوبت چاپ :	**چاپ شانزدهم ۱۳۹۶**

برای دریافت فایل pdf کتاب‌های درسی به پایگاه کتاب‌های درسی به نشانی www.chap.sch.ir و برای خرید کتاب‌های درسی به سامانه فروش و توزیع مواد آموزشی به نشانی www.irtextbook.ir یا www.irtextbook.com مراجعه نمایید.

کلیه حقوق مادی و معنوی این کتاب متعلق به سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی وزارت آموزش و پرورش است و هرگونه استفاده از کتاب و اجزای آن به‌صورت چاپی و الکترونیکی و ارائه در پایگاه‌های مجازی، نمایش، اقتباس، تلخیص، تبدیل، ترجمه، عکس‌برداری، نقاشی، تهیه فیلم و تکثیر به هر شکل و نوع بدون کسب مجوز ممنوع است و متخلفان تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

شابک ۳-۱۱۷۷-۰۵-۹۶۴ ISBN 964-05-1177-3

هرکاری را که انسان باورش این است که نسبت به آن کار ضعیف است، نمی‌تواند آن کار را انجام بدهد. ... هر کشوری که اعتقادش این باشد که نمی‌تواند خودش صنعتی را ایجاد کند این ملت محکوم به این است که تا آخر نتواند، و این اساس نقشه‌هایی بوده است که برای ملل ضعیف دنیا قدرت‌های بزرگ کشیده‌اند.

امام خمینی رحمة‌الله علیه

فهرست

فصل ۱: حرکت‌شناسی در دو بعد ۱

۱ــ۱ــ حرکت در یک بعد ۲
۱ــ۲ــ حرکت در دو بُعد یا حرکت در صفحه ۱۹
تمرین‌های فصل اول ۲۸

فصل ۲: دینامیک ۳۱

۲ــ۱ــ قانون‌های نیوتون ۳۲
۲ــ۲ــ چگونگی استفاده از قانون‌های نیوتون در حرکت یک جسم ۳۵
۲ــ۳ــ تکانه (اندازه حرکت) ۳۸
۲ــ۴ــ حرکت دایره‌ای ۴۲
۲ــ۵ــ حرکت دایره‌ای یکنواخت ۴۴
۲ــ۶ــ دینامیک حرکت دایره‌ای یکنواخت ۴۹
تمرین‌های فصل دوم ۵۳

فصل ۳: حرکت نوسانی ۵۶

۳ــ۱ــ حرکت هماهنگ ساده ۵۷
۳ــ۲ــ معادلهٔ حرکت هماهنگ ساده ۶۱
۳ــ۳ــ معادله‌های سرعت و شتاب در حرکت هماهنگ ساده ۶۷
۳ــ۴ــ انرژی مکانیکی نوسانگر (دستگاه جرم ــ فنر) ۶۹
۳ــ۵ــ آونگ ساده ۷۱
۳ــ۶ــ تشدید ۷۴
تمرین‌های فصل سوم ۷۶

فصل ۴: موج‌های مکانیکی ۷۸

۴ـ۱ـ موج ۷۹
۴ـ۲ـ موج‌های عرضی ـ موج‌های طولی ۸۸
۴ـ۳ـ تابع موج ۸۹
۴ـ۴ـ انتشار موج در دو و سه بُعد ۹۷
۴ـ۵ـ اصل برهم نهی موج‌ها ۱۰۲
۴ـ۶ـ برهم نهی موج‌ها در دو بُعد ـ تداخل موج‌ها در سطح آب ۱۰۹
تمرین‌های فصل چهارم ۱۱۱

فصل ۵: موج‌های صوتی ۱۱۳

۵ـ۱ـ موج صوتی ۱۱۴
۵ـ۲ـ سرعت صوت ۱۱۷
۵ـ۳ـ لوله‌های صوتی ۱۲۱
۵ـ۴ـ شدت صوت ۱۲۷
تمرین‌های فصل پنجم ۱۳۲

فصل ۶: موج‌های الکترومغناطیسی ۱۳۴

۶ـ۱ـ چگونگی تشکیل موج‌های الکترومغناطیس توسط یک آنتن ۱۳۶
۶ـ۲ـ سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی ۱۴۱
۶ـ۳ـ طیف موج‌های الکترومغناطیسی ۱۴۲
۶ـ۴ـ تداخل موج‌های نوری ۱۴۵
تمرین‌های فصل ششم ۱۵۰

فصل ۷: آشنایی با فیزیک اتمی ۱۵۲

۷ـ۱ـ نظریهٔ کوانتومی ۱۵۴
۷ـ۲ـ فوتون و پدیدهٔ فوتوالکتریک ۱۶۰
۷ـ۳ـ طیف اتمی ۱۶۵
۷ـ۴ـ الگوهای اتمی ۱۷۳
۷ـ۵ـ آشنایی با لیزر ۱۸۰
تمرین‌های فصل هفتم ۱۸۴

فصل ۸: آشنایی با ساختار هسته ۱۸۷

۸ـ۱ـ ساختار هستهٔ اتم ۱۸۸
۸ـ۲ـ پرتوزایی ۱۹۷
۸ـ۳ـ انرژی هسته‌ای ۲۰۳
تمرین‌های فصل هشتم ۲۱۰

واژه‌نامهٔ فارسی ـ انگلیسی ۲۱۳
فهرست منابع ۲۱۸

پیشگفتار

سخنی با دانش‌آموزان

کتابی که پیش رو دارید، چهارمین و آخرین کتاب در دورهٔ آموزش متوسطه است که شما را با برخی دیگر از مفاهیم و کاربردهای علم فیزیک آشنا می‌سازد. انتظار می‌رود با مفاهیم کتاب‌های پیشین به‌خوبی آشنا شده باشید، چرا که هر علم بر مبنای پیش‌نیازهای آن پی‌ریزی می‌شود. امیدواریم تاکنون به اهمیت فیزیک که یکی از بنیادی‌ترین دانش‌هاست پی برده و از مطالعهٔ آن لذّت برده باشید. فیزیک شالودهٔ تمام علوم مهندسی و فنّاوری دیروز، امروز و فردای بشر بوده و خواهد بود. دانش فیزیک که تجلی هوشمندی و تفکر بشر در طبیعت پیرامون است، شما را یاری می‌دهد تا با درک عمیق مفاهیم آن، پاسخی در خور برای بیشتر پرسش‌ها و کنجکاوی‌های هر روزهٔ خود بیابید.

افزون بر آنچه گفته شد، فیزیک علمی تجربی است و هیچ نظریه‌ای در فیزیک تاکنون به‌عنوان حقیقت پایانی و غایی اثبات نشده است. این امکان همواره وجود دارد که مشاهده‌ها و آزمایش‌های جدید ایجاب کنند که یک نظریهٔ فیزیکی بازنگری و یا حتی رد شود؛ و این همان چیزی است که مطالعهٔ فیزیک را هیجان‌انگیز می‌کند تا افراد خلاق بتوانند روزنه‌ها و مسیرهای جدیدی را در پیشبرد فیزیک بگشایند. پیش از ورود به قلمروهایی از فیزیک که برای شما جذاب‌اند، باید در چیزهایی مهارت پیدا کنید که شاید جذابیت کمتری دارند، ولی بسیار اساسی‌اند و بدون آنها نمی‌توانید به‌راحتی فیزیک را بفهمید و آن را به‌کار گیرید.

در آموزش این کتاب دو هدف دنبال می‌شود. نخست، شما با شماری از قوانین بنیادی و اصولی آشنا می‌شوید که علم فیزیک را تشکیل می‌دهند. دوم، توانایی شما باید در به‌کار بستن این نظریات در وضعیت‌های مشخص و مثال‌های عینی افزایش یابد. برای رسیدن به هدف دوم، مثال‌های حل شدهٔ زیادی در لابه‌لای متن اصلی و همچنین مسائلی در پایان هر فصل آمده است. سفارش فراوان می‌کنیم که نخست متن اصلی را به‌خوبی درک کنید و سپس به مطالعهٔ مثال‌های حل شده و مسئله‌ها بپردازید.

سخنی با همکاران ارجمند

به تبع تغییرات انجام شده در آخرین سال تحصیلی، کتاب فیزیک (۱) و (۲) دورهٔ پیش‌دانشگاهی نظام ترمی واحدی، با عنوان فیزیک پیش‌دانشگاهی دورهٔ متوسطه نظری و در قالب ۸ فصل تغییر یافته و محتوای آن مورد بازنگری کلی قرار گرفته است. در این بازنگری تلاش شده است که محتوای کتاب برای ارائه در یک سال تحصیلی مناسب باشد. توجه کنید که هدف، ارائهٔ دیدی واحد از فیزیک به دانش‌آموز است و این کار با تجزیه و تحلیل اصول اساسی انجام می‌شود نه با درگیر کردن دانش‌آموزان با جزئیات. همزمان با سال تحصیلی ۹۲ـ۹۱ کتاب راهنمای معلم فیزیک دورهٔ پیش‌دانشگاهی به همراه لوحی فشرده در اختیار همکاران عزیز قرار می‌گیرد تا مواد آموزشی بیشتری را جهت ارائهٔ تدریس کارآمد در دست داشته باشید. امید است همکاران محترم نیز از هر کوششی که موجب شوق‌انگیزتر شدن یادگیری و مشارکت دانش‌آموزان در فرایند آموزش این درس می‌شود، دریغ نورزند.

قدردانی

گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری از همکاران عزیزی که طی سال‌های گذشته، نظرهای اصلاحی و پیشنهادهای سازندهٔ خود را برای این گروه فرستاده‌اند، سپاس فراوان دارد. پس از این نیز می‌توانید از طریق physics-dept@talif.sch.ir یا نشانی تهران ــ صندوق پستی ۱۵۸۷۵/۴۸۷۴ گروه فیزیک، نظرهای اصلاحی خود را برای ما بفرستید.

اعضای گروه فیزیک همچنین از خانم‌ها **سمیرا بهرامی**، **معصومه شاهسواری** و **بتول فرنوش**، و آقایان **سیامک خادمی**، **محمدرضا خوش‌بین‌خوش‌نظر**، **محمدرضا شریف‌زاده اکباتانی**، **حیدر شکری** و **مجید فلاح** که ما را در بازنگری این کتاب یاری نمودند صمیمانه تشکر می‌کند.

گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب‌های
درسی عمومی و متوسطه نظری

حرکت‌شناسی در دو بعد

فصل ۱

حرکت‌شناسی در دو بعد

نگاهی به فصل : دربارهٔ حرکت‌هایی که در اطراف ما رخ می‌دهد، اغلب پرسش‌های زیادی برای ما مطرح می‌شود. پرسش‌هایی چون : سیاره‌ها در چه مسیرهایی به دور خورشید حرکت می‌کنند؟ چرا هنگامی که فنری را می‌کشیم و رها می‌کنیم نوسان می‌کند؟ ماهواره‌ها را چگونه در مدار زمین قرار می‌دهند؟ و... . پاسخ این پرسش‌ها را باید در علم **مکانیک** جست‌وجو کرد. علمی که در آن حرکت اجسام مورد بررسی قرار می‌گیرد. هنگامی که چگونگی حرکت را توصیف می‌کنیم، با بخشی از علم مکانیک سروکار داریم که **حرکت‌شناسی** نامیده می‌شود. بخش دیگری از علم مکانیک **دینامیک** است که به بررسی رابطهٔ بین حرکت و نیرو می‌پردازد. به این موضوع در فصل بعد خواهیم پرداخت.

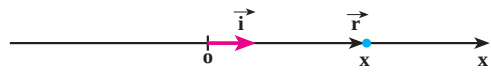
در فیزیک (۲) و آزمایشگاه تا اندازه‌ای حرکت‌شناسی در یک بُعد را مورد بررسی قرار دادیم، با کمیت‌های مکان، جابه‌جایی، سرعت متوسط و ... آشنا شدیم و حرکت یکنواخت و حرکت با شتاب ثابت برروی یک خط راست را نیز بررسی کردیم. ما در زندگی روزمره بیشتر با حرکت‌هایی که در دو بعد و سه بعد انجام می‌شوند، سروکار داریم و بررسی آنها اهمیت زیادی دارد. از این رو، در این فصل، پس از یادآوری مطالبی که در کتاب فیزیک (۲) و آزمایشگاه خوانده‌اید، به بررسی حرکت در دو بعد می‌پردازیم.

۱ــ۱ــ حرکت در یک بعد

در شکل ۱ــ۱ جسمی بر روی محور x نمایش داده شده است. مکان جسم در این شکل با بردار $\vec{r}$ مشخص شده است. بردار $\vec{r}$ را می‌توان به‌صورت زیر نوشت :

$$\vec{r} = x\,\vec{i} \qquad (۱ــ۱)$$

در این رابطه $\vec{i}$ بردارِ یکّه در جهت محور x است.



شکل ۱ــ۱

هنگامی که جسم روی محور x حرکت می‌کند، در هر لحظه بردار مکان آن تغییر می‌کند، برای توصیف حرکت جسم، یعنی برای مشخص کردن بردار مکان جسم در لحظهٔ t کافی است که x را به‌صورت تابعی از زمان داشته باشیم :

$$x = f(t) \qquad (۱ــ۲)$$

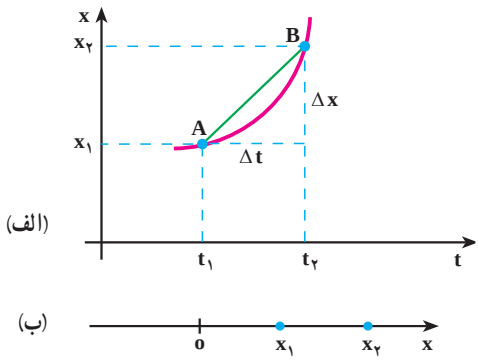
این رابطه، **معادلهٔ حرکت** جسم نامیده می‌شود.

در کتاب فیزیک (۲) و آزمایشگاه دیدیم که حرکت جسم را می‌توان به صورت نموداری در دستگاه مختصات مکان ــ زمان نمایش داد. به عبارت دیگر، این نمودار با رسم تابع $x = f(t)$ در دستگاه مختصات $x - t$ به‌دست می‌آید.

تمرین ۱ـ۱

معادلهٔ حرکت جسمی در یک بعد در SI با رابطهٔ $x = -t^2 + 6t - 8$ بیان شده است. الف) نمودار مکان ــ زمان آن را رسم کنید. ب) بردار مکان جسم را در زمان‌های $t = 0$ ، ۱ ، ۳ (s) روی محور x نمایش دهید.

سرعت متوسط : نمودار مکان ــ زمان جسمی در شکل ۱ــ۲ــ الف نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ــ۲ــ ب نشان داده شده است، متحرک در لحظهٔ t_1 در مکان x_1 (نقطهٔ A) روی نمودار مکان ــ زمان و در لحظهٔ t_2 در مکان x_2 (نقطهٔ B) قرار دارد.



شکل ۱ــ۲

در این شکل، $\Delta x = x_2 - x_1$ مقدار جابه‌جایی متحرک در بازهٔ زمانی $\Delta t = t_2 - t_1$، و نسبت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ که شیب خط AB در دستگاه مکان ــ زمان است، سرعت متوسط متحرک نامیده می‌شود؛ این کمیت را با $\overline{v}_x$ نشان دادیم :

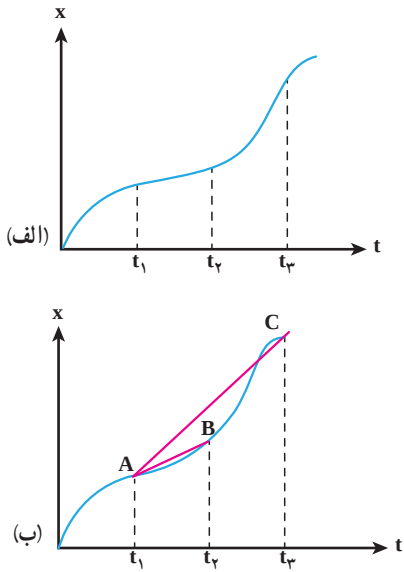
$$\overline{v}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad (۱ــ۳)$$

زیرنویس x مشخص می‌کند که حرکت در راستای محور x انجام می‌شود.

مثال ۱ـ۱

در نمودار شکل ۱ـ۳ـالف سرعت متوسط را در بازه‌های $t_۲-t_۱$ و $t_۳-t_۱$ با هم مقایسه کنید.

پاسخ : در شکل ۱ـ۳ـ ب خط‌های AB و AC به ترتیب بین دو لحظه $t_۱$ و $t_۲$ و دو لحظه $t_۱$ و $t_۳$ رسم شده‌اند. شیب پاره‌خط AB برابر سرعت متوسط در بازهٔ $t_۲-t_۱$ است و شیب پاره‌خط AC برابر سرعت متوسط در بازهٔ $t_۳-t_۱$ است. و چون شیب پاره‌خط AC بیشتر از شیب پاره‌خط AB است، بنابراین سرعت متوسط در بازهٔ $t_۳-t_۱$ بزرگ‌تر از سرعت متوسط در بازهٔ $t_۲-t_۱$ است.



شکل ۱ـ۳

مثال ۱ـ۲

معادلهٔ حرکت جسمی در SI با رابطهٔ $x = ۲t^۲ + ۱$ بیان شده است. سرعت متوسط آن را در بازه‌های زمانی الف) ۱ تا ۲ ثانیه، ب) ۱ تا ۱/۱ ثانیه، پ) ۱ تا ۱/۰۱ ثانیه و ت) ۱ تا ۱/۰۰۱ ثانیه به دست آورید. ث) از این مثال به چه نتیجه‌ای می‌رسید؟

پاسخ : الف)

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

$$\bar{v}_x = \frac{x_۲ - x_۱}{t_۲ - t_۱} = \frac{۹-۳}{۲-۱} = ۶\,m/s$$

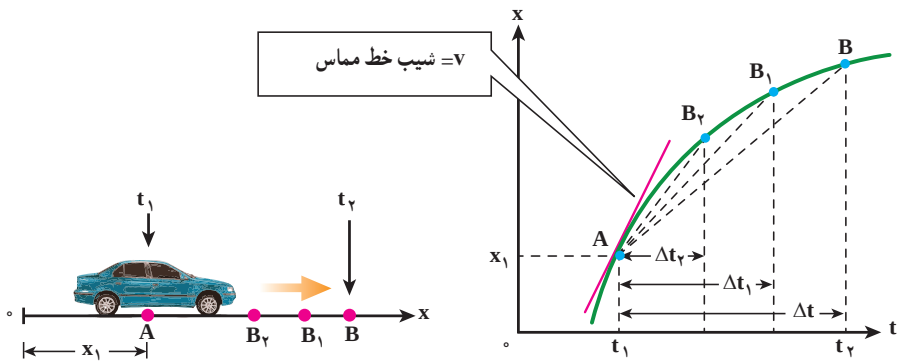
ب)
$$\bar{v}_x = \frac{۳/۴۲-۳}{۱/۱-۱} = ۴/۲\,m/s$$

پ)
$$\bar{v}_x = \frac{۳/۰۴۰۲-۳}{۱/۰۱-۱} = ۴/۰۲\,m/s$$

ت)
$$\bar{v}_x = \frac{۳/۰۰۴۰۰۲-۳}{۱/۰۰۱-۱} = ۴/۰۰۲\,m/s$$

ث) همان‌طورکه دیدیم سرعت متوسط در بازه‌های زمانی کوچک و کوچک‌تر به یک مقدار مشخص میل می‌کند.

سرعت لحظه‌ای : دیدیم که سرعت متوسط بین دو نقطه ازنمودار مکان ــ زمان، شیب خطی است که نمودار مکان ــ زمان را در آن دو نقطه قطع می‌کند. اکنون می‌خواهیم ببینیم از دید هندسی با کوچک‌شدن تدریجی Δt، سرعت متوسط به چه صورتی درمی‌آید. به این منظور نمودار مکان ــ زمان ۱ــ۴ را در نظر بگیرید. از این شکل درمی‌یابیم اگر بازهٔ زمانی Δt کوچک و کوچک‌تر شود، نقطهٔ B به نقطهٔ A نزدیک و نزدیک‌تر می‌شود و سرانجام خط AB در نقطهٔ A بر نمودار مماس می‌گردد. شیب خط مماس را در این حالت، سرعت لحظه‌ای جسم در لحظهٔ t_1 می‌نامیم.



شکل ۱ــ۴ شکل سمت چپ، اتومبیلی را نشان می‌دهد که در راستای محور x حرکت می‌کند. شکل سمت راست، نمودار مکان ــ زمان حرکت اتومبیل را نشان می‌دهد. با کوچک‌شدن Δt، B به A نزدیک شده و خط واصل در حالت $\Delta t \to 0$ تبدیل به خط مماس بر منحنی می‌شود و شیب آن، سرعت لحظه‌ای را نشان می‌دهد.

به‌عبارت دیگر، هنگامی که t_2 به t_1 نزدیک می‌شود، یعنی وقتی Δt به سمت صفر میل می‌کند، $\overline{v}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ سرعت لحظه‌ای جسم را در لحظهٔ t_1 به دست می‌دهد. پس، **سرعت لحظه‌ای حدّ سرعت متوسط است هنگامی که Δt به سمت صفر میل می‌کند**. سرعت لحظه‌ای را با v_x نمایش می‌دهیم؛ در نتیجه داریم :

$$v_x = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad (۱ــ۴)$$

در درس ریاضی دیده‌اید که این حد، برابر مشتق تابع x نسبت به زمان است که به‌صورت زیر نوشته می‌شود :

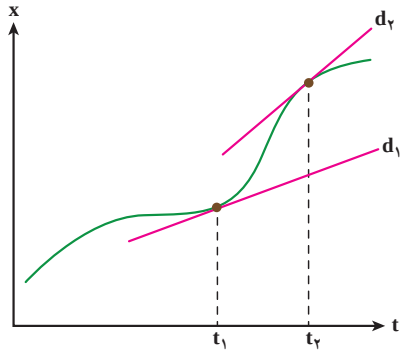
$$v_x = \frac{dx}{dt} \qquad (۱ــ۵)$$

اگر $x = f(t)$ معلوم باشد، از رابطهٔ ۱ــ۵ می‌توان v_x را به‌صورت تابعی از زمان به دست آورد، این تابع، معادلهٔ سرعت نامیده می‌شود. در حالت حدی وقتی که Δt به سمت صفر میل می‌کند، وتر AB

در نقطهٔ A بر نمودار مکان ــ زمان مماس می‌شود. این، همان تعبیر هندسی **مشتق** است که در درس ریاضی خوانده‌اید. از این به بعد، سرعت لحظه‌ای را ــ به اختصار ــ سرعت می‌نامیم.

مثال ۱ــ۳

در شکل ۱ــ۵ مماسِ d_1، در لحظهٔ t_1 و مماسِ d_2 در لحظهٔ t_2 نشان داده شده است. در کدام لحظه سرعت بیشتر است؟



شکل ۱ــ۵

پاسخ : همان‌طور که در شکل دیده می‌شود شیب d_2 بیشتر از شیب d_1 است و بنابراین $v_2 > v_1$ است (سرعت در لحظهٔ t_2 بیشتر از سرعت در لحظهٔ t_1 است).

مثال ۱ــ۴

در مثال ۱ــ۲، معادلهٔ حرکت متحرک به صورت $x = 2t^2 + 1$ است.

الف) معادلهٔ سرعت آن را به دست آورید.

ب) نمودار سرعت ــ زمان را برای آن رسم کنید.

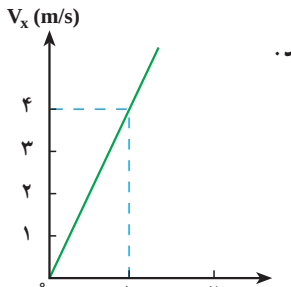
پ) سرعت متحرک را در لحظهٔ $t = 1s$ به دست آورید.

پاسخ

الف) با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۵ داریم :

$$v_x = \frac{dx}{dt} = 4t$$

ب) نمودار سرعت ــ زمان به صورت خط راستی است که از مبدأ دستگاه v - t می‌گذرد.



شکل ۱ــ۶

پ)

$$v_x = 4t$$

$$t = 1s \Rightarrow v_x = 4\,m/s$$

این نتیجه را می‌توانستیم از مثال ۱ــ۲ نیز حدس بزنیم؛ زیرا در آن مثال، با نزدیک

شدن t_2 به t_1، سرعت متوسط جسم نیز به مقدار $4\ m/s$ (سرعت جسم در لحظهٔ $t = 1s$) نزدیک می‌شود.

بردار سرعت متحرک را در حرکت یک بعدی می‌توان به صورت زیر نمایش داد.

$$\vec{v} = v_x \vec{i} \qquad (۶ــ۱)$$

هنگامی که جسم در جهت مثبت محور x حرکت می‌کند، v_x مثبت است (چرا؟) و در نتیجه بردار سرعت جسم در جهت این محور قرار می‌گیرد. هنگامی که جسم در خلاف جهت مثبت محور x حرکت می‌کند، v_x منفی است و بردار سرعت در جهت عکس این محور قرار می‌گیرد.

مثال ۱ــ۵

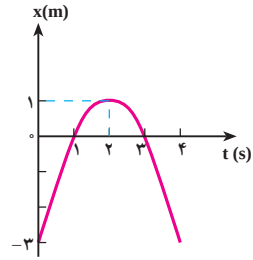
معادلهٔ حرکت جسمی در SI با رابطهٔ $x = -t^2 + 4t - 3$ بیان شده است. الف) معادلهٔ سرعت آن را به دست آورید. ب) نمودارهای مکان ــ زمان و سرعت ــ زمان متحرک را در ۴ ثانیهٔ اول رسم کنید. پ) مسیر حرکت جسم را رسم و چگونگی حرکت را توصیف کنید.

پاسخ

الف) با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۵ داریم :

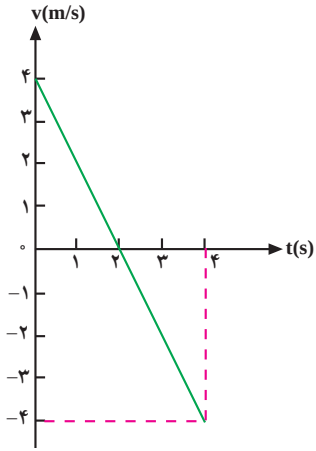
$$v_x = \frac{dx}{dt} = -2t + 4$$

ب) نمودار مکان ــ زمان متحرک به صورت یک سهمی است (شکل ۱ــ۷) که بیشینهٔ آن در لحظهٔ $t=2s$ است (چرا؟). همچنین جسم در لحظه‌های $t = 1s$ و $t=3s$ در مبدأ و در لحظهٔ $t = 0$، در نقطهٔ $x = -3m$ قرار دارد.



شکل ۱ــ۷

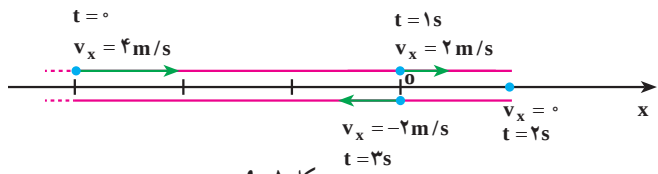
نمودار سرعت ــ زمان متحرک به صورت یک خط راست است (شکل ۱ــ۸) که در بند (الف) معادلهٔ آن را به دست آوردیم.



شکل ۱ــ۸

پ) با توجه به این نمودارها ملاحظه می‌شود که متحرک در لحظهٔ $t = ۰$ در مکان $x = -۳m$ قرار دارد و با سرعت $۴m/s$ در جهت محور x حرکت می‌کند؛ سپس سرعت آن به‌تدریج، کاهش می‌یابد (شیب مماس بر نمودار مکان ــ زمان در شکل ۱ــ۷ به‌تدریج، کم می‌شود) تا در لحظهٔ $t = ۲s$ که سرعت آن صفر می‌شود. می‌توان گفت شیب مماس بر نمودار مکان ــ زمان در این لحظه صفر می‌شود.

از لحظهٔ $t = ۲s$ به بعد متحرک برمی‌گردد و در خلاف جهت محور x شروع به حرکت می‌کند و v_x منفی می‌شود. در برگشت، اندازهٔ سرعت افزایش می‌یابد و در لحظهٔ $t = ۳s$ دوباره از مبدأ می‌گذرد. در این لحظه سرعت آن $-۲m/s$ است. مسیر حرکت جسم در شکل ۱ــ۹ رسم شده و بردار سرعت آن نیز روی شکل نمایش داده شده است.



شکل ۱ــ۹

در شکل ۱ــ۹ باید مسیر روی محور x رسم شود، ولی ما برای اینکه مسیر را بهتر مشخص کنیم، آن را در بالا و پایین این محور رسم کرده‌ایم. ملاحظه می‌شود که در تمام مسیر رفت و برگشت، معادلهٔ مکان و معادلهٔ سرعت جسم، به ترتیب به صورت زیر بیان می‌شود :

$$x = -t^۲ + ۴t - ۳$$
$$v_x = -۲t + ۴$$

مثال ۱ــ۶

متحرکی با سرعت ثابت $۵m/s$، در خلاف جهت محور x حرکت می‌کند. این متحرک در لحظهٔ $t = ۰$ از نقطهٔ $x = ۱۰m$ می‌گذرد. الف) معادلهٔ حرکت را بنویسید. ب) تعیین کنید که متحرک در چه زمانی به مبدأ مختصات می‌رسد.

پاسخ

الف) در فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که معادلهٔ حرکت یکنواخت یک جسم روی خط راست با رابطهٔ

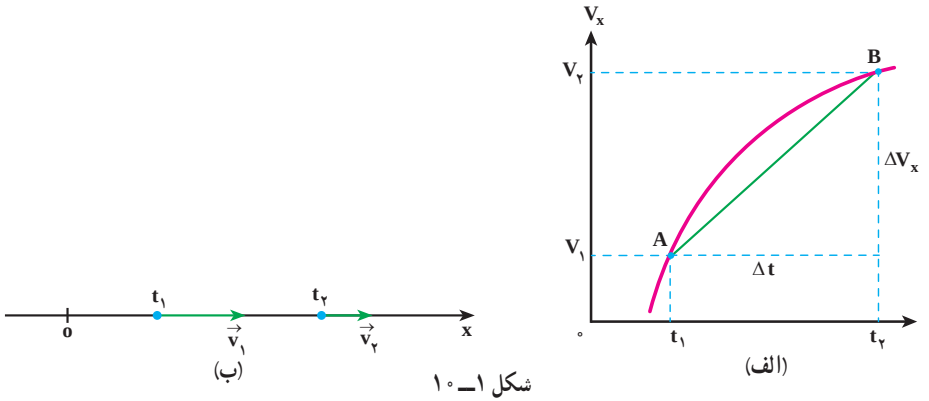
$$x = v_x t + x_\circ \qquad (۷ـ۱)$$

بیان می‌شود که در آن v_x سرعت (ثابت) جسم و $x_\circ$ مکان جسم در لحظهٔ $t = \circ$ است.

در نتیجه، چون در این مثال، $x_\circ = +۱۰\,m$ و $v_x = -۵\,m/s$ است، معادلهٔ حرکت جسم به صورت زیر خواهد بود.

ب)
$$x = -۵t + ۱۰$$
$$x = \circ \Longrightarrow \circ = -۵t + ۱۰ \Longrightarrow t = ۲s$$

شتاب متوسط و شتاب لحظه‌ای : می‌دانید هنگامی که سرعت جسم تغییر می‌کند، حرکت را **شتاب‌دار** می‌نامند. در شکل ۱ــ۱۰ــ الف نمودار سرعت ــ زمان یک حرکت شتاب‌دار و در شکل ۱ــ۱۰ــ ب بردار سرعت متحرک، در زمان‌های $t_۱$ و $t_۲$، نشان داده شده است.



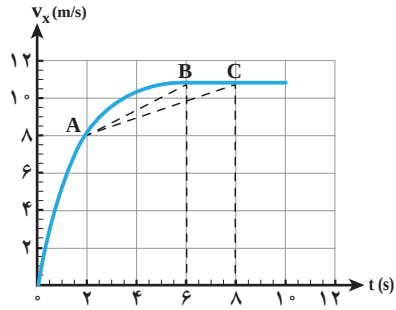
شکل ۱ــ۱۰

همچنین می‌دانید که $\Delta v_x = v_{۲x} - v_{۱x}$ را تغییر سرعت متحرک در بازهٔ زمانی Δt و نسبت $\frac{\Delta v_x}{\Delta t}$ را که شیب خط AB در نمودار سرعت ــ زمان است، شتاب متوسط متحرک در این بازهٔ زمانی می‌نامند. این کمیت را با نماد $\bar{a}$ نشان می‌دهیم؛ در نتیجه داریم :

$$\bar{a}_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} \qquad (۸ـ۱)$$

مثال ۱ـ۷

نمودار سرعت ــ زمان متحرکی که در راستای محور x حرکت می‌کند، به‌صورت شکل ۱ــ۱۱ است. شتاب متوسط این متحرک را در بازه‌های زمانی بین ۲s و ۶s، و بین ۲s و ۸s تعیین و با هم مقایسه کنید.



شکل ۱ــ ۱۱

پاسخ : شیب پاره‌خط AB برابر شتاب متوسط متحرک در بازهٔ بین ۲s و ۶s، و شیب پاره‌خط AC برابر شتاب متوسط متحرک در بازهٔ بین ۲s و ۸s است. بنابراین شتاب متوسط در بازهٔ زمانی نخست برابر است با :

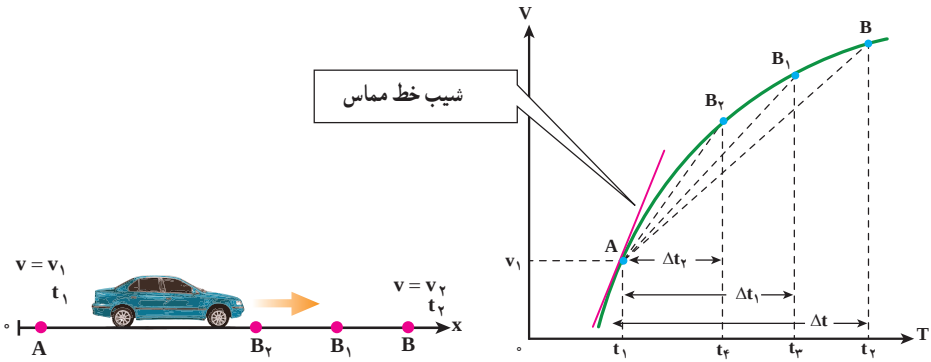
$$\bar{a}_{۱} = \text{شیب AB} \simeq \frac{۱۱-۸}{۶-۲} = \frac{۳}{۴}\ m/s^{۲}$$

و شتاب متوسط در بازهٔ زمانی دوم چنین می‌شود :

$$\bar{a}_{۲} = \text{شیب AC} \simeq \frac{۱۱-۸}{۸-۲} = \frac{۳}{۶} = \frac{۱}{۲}\ m/s^{۲}$$

بنابراین $\bar{a}_{۱} > \bar{a}_{۲}$ است.

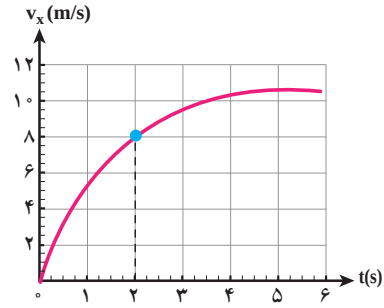
در شکل ۱ــ۱۰ هم هنگامی که Δt بسیار کوچک و کوچک‌تر می‌شود، نقطهٔ B به نقطهٔ A نزدیک و نزدیک‌تر می‌شود و سرانجام خط AB در نقطهٔ A بر نمودار سرعت ــ زمان مماس می‌گردد. شیب خط مماس بر نمودار در نقطهٔ A را شتاب لحظه‌ای جسم در لحظهٔ $t_۱$ می‌نامیم (شکل ۱ــ۱۲).



شکل ۱ــ۱۲ شکل سمت چپ اتومبیلی را نشان می‌دهد که در راستای محور x حرکت می‌کند. شکل سمت راست، نمودار سرعت ــ زمان اتومبیل را نشان می‌دهد. با کوچک‌شدن Δt ، B به A نزدیک شده و در حالت $\Delta t \to ۰$، خط واصل تبدیل به خط مماس می‌شود و شیب آن، شتاب لحظه‌ای را نشان می‌دهد.

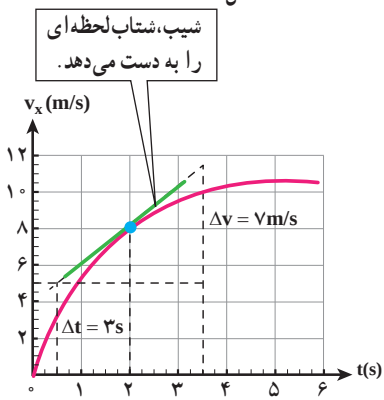
مثال ۱ـ۸

نمودار سرعت ــ زمان متحرکی که در راستای محور x حرکت می‌کند در شکل ۱ــ۱۳ نشان داده شده است. شتاب این متحرک را در t=۲s تعیین کنید.



شکل ۱ــ ۱۳

پاسخ : شتاب متحرک در t=۲s برابر شیب این منحنی در t=۲s است.



شکل ۱ــ ۱۴

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{۷ m/s}{۳} = ۲/۳ m/s^۲$$

توجه کنید که در حل این مسئله می‌توانستید از مختصات هر دو نقطهٔ دلخواه دیگری از خط مماس نیز استفاده کنید.

اکنون می‌توان شتاب لحظه‌ای را، مانند سرعت لحظه‌ای، به‌طور دقیق تعریف کرد که : هنگامی که Δt به سمت صفر میل می‌کند، $\bar{a}_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}$ شتاب لحظه‌ای جسم را در لحظهٔ $t_۱$ به دست می‌دهد. به عبارت دیگر، **شتاب لحظه‌ای حد شتاب متوسط است هنگامی که Δt به سمت صفر میل می‌کند**. شتاب لحظه‌ای را با a_x نمایش می‌دهیم. در نتیجه داریم :

$$a_x = \lim_{\Delta t \to ۰} \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{dv_x}{dt} \qquad (۹ــ۱)$$

به بیان ریاضی، شتاب لحظه‌ای مشتق سرعت نسبت به زمان است. از این به بعد برای اختصار

شتاب لحظه‌ای را شتاب می‌نامیم. اکنون با استفاده از رابطه‌های ۱ــ۵ و ۱ــ۹ شتاب را می‌توان به صورت زیر نوشت :

$$a_x = \frac{d}{dt}\left(\frac{dx}{dt}\right) = \frac{d^2x}{dt^2}$$

مثال ۱ــ۹

معادلهٔ حرکت جسمی در SI به‌صورت $x = t^3 - 6t^2 + 9t$ بیان شده است. الف) شتاب متوسط آن را در بازهٔ زمانی ۱ تا ۲ ثانیه به دست آورید. ب) شتاب آن را در لحظه‌های $t = 0$ و $t = 1$ ثانیه پیدا کنید.

پاسخ

الف) برای به دست آوردن شتاب متوسط در این بازهٔ زمانی لازم است سرعت متحرک را در لحظه‌های $t = 1s$ و $t = 2s$ داشته باشیم. ابتدا معادلهٔ سرعت را به‌دست می‌آوریم :

$$v_x = \frac{dx}{dt} = 3t^2 - 12t + 9$$

از این معادله در لحظه‌های $t = 1s$ و $t = 2s$ به ترتیب، مقادیر ۰ (صفر) و $-3\ m/s$ برای سرعت به دست می‌آید. در نتیجه برای شتاب متوسط خواهیم داشت :

$$\bar{a}_x = \frac{v_{2x} - v_{1x}}{t_2 - t_1} = \frac{-3 - 0}{2 - 1} = -3\ m/s^2$$

ب) ابتدا معادلهٔ شتاب متحرک را می‌نویسیم :

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = 6t - 12$$

با استفاده از این رابطه، شتاب متحرک در لحظه‌های $t = 0s$ و $t = 1s$ چنین به دست می‌آید :

$$t = 0s \rightarrow a_x = -12\ m/s^2$$

$$t = 1s \rightarrow a_x = -6\ m/s^2$$

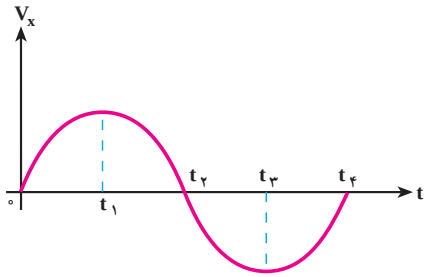
بردار شتاب را می‌توان به صورت زیر نمایش داد :

$$\vec{a} = a_x \vec{i} \qquad (۱۰ــ۱)$$

در این رابطه اگر a_x مثبت باشد، $\vec{a}$ در جهت محور x و اگر منفی باشد در خلاف جهت محور x قرار می‌گیرد.

تمرین ۱ـ۲

نمودار سرعت ــ زمان متحرکی در شکل ۱ــ ۱۵ نشان داده شده است. تعیین کنید در چه بازهٔ زمانی بردار شتاب در جهت محور x و در کدام بازهٔ زمانی در خلاف جهت محور x است.



شکل ۱ــ ۱۵

هنگامی که اندازهٔ سرعت متحرکی زیاد می‌شود حرکت را **تندشونده** و هنگامی که اندازهٔ سرعت متحرکی کاهش می‌یابد، حرکت را **کندشونده** می‌نامند.

فعالیت ۱ـ۱

در تمرین ۱ــ۲، سرعت متحرک در بازهٔ زمانی ۰ تا t_1 مثبت است. a_x نیز مثبت است؛ زیرا شیب مماس بر نمودار در این بازهٔ زمانی مثبت است و حرکت تندشونده است. حاصل‌ضرب a_xv_x نیز مثبت است. اکنون جاهای خالی را در گزاره‌های زیر پر کنید.

الف) در بازهٔ زمانی t_1 تا t_2 سرعت متحرک ..... است. a_x ..... است. حرکت ..... است. حاصل‌ضرب a_xv_x ..... است.

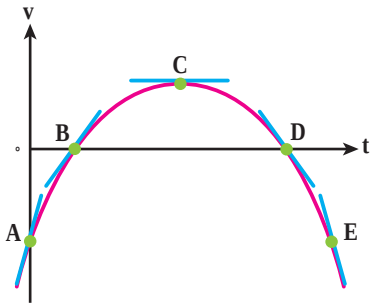
ب) در بازهٔ زمانی t_2 تا t_3 سرعت متحرک ..... است. a_x ..... است. حرکت ..... است. حاصل‌ضرب a_xv_x ..... است.

پ) در زمان‌های بزرگ‌تر از t_3، سرعت متحرک ..... است. a_x ..... است. حرکت ..... است. حاصل‌ضرب a_xv_x ..... است.

در فعالیت ۱ــ۱ ملاحظه می‌کنید که وقتی $a_xv_x > 0$ باشد حرکت تندشونده و وقتی $a_xv_x < 0$ باشد، حرکت کندشونده است.

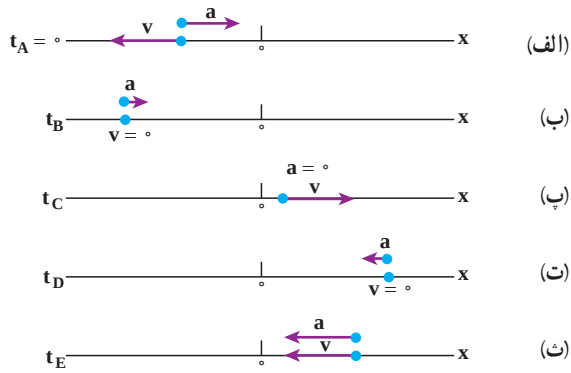
مثال ۱ـ۱۰

شکل ۱ـ۱۶ نمودار سرعت ــ زمان متحرکی است که در راستای محور x حرکت می‌کند. دربارهٔ علامت‌های شتاب و سرعت متحرک و تندشونده یا کندشونده‌بودن حرکت اظهار نظر کنید.



شکل ۱ـ۱۶

پاسخ : خط‌های مماس بر منحنی در نقاط A، B، C، D و E رسم شده که شیب این خط‌ها نشان‌دهندهٔ شتاب در آن نقطه‌ها است. از روی شکل درمی‌یابیم که شیب در نقاط B,A مثبت، در نقطهٔ C برابر صفر و در نقطه‌های E,D منفی است. بنابراین شتاب در نقطه‌های B,A مثبت، شتاب درنقطهٔ C برابر صفر و در نقطه‌های E,D منفی است. درحالی که همان‌طور که از شکل مشخص است، سرعت در نقطه‌های E,A منفی، در نقطه‌های D,B صفر، و در نقطهٔ C مثبت است. بنابراین مکان، سرعت و شتاب ذره روی محور x با شکل‌های زیر سازگارند.



شکل ۱ـ۱۷

در (الف) $v<0$ ، $a>0$ و درنتیجه $av<0$ و حرکت کندشونده است. در (ب) $a>0$، $v=0$ و متحرک در سکون لحظه‌ای و در آستانهٔ حرکت در جهت $+x$ است. در (پ) $a=0$،

$v>0$ است. در (ت) $v=0$, $a<0$ متحرک به‌طور لحظه‌ای ساکن و در آستانهٔ حرکت در جهت $-x$ است. در (ث) $v<0$, $a<0$ و درنتیجه $av>0$ و حرکت تندشونده است.

مثال ۱ـ۱۱

خودرویی با سرعت $10\,m/s$ در حال حرکت است. راننده ترمز می‌کند و سرعت خودرو با شتاب $2\,m/s^2$ کاهش می‌یابد. الف) چه زمانی طول می‌کشد تا خودرو متوقف شود؟ ب) در این بازهٔ زمانی خودرو چه مسافتی را می‌پیماید؟

پاسخ

الف) در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که در حرکت با شتاب ثابت معادلهٔ سرعت به‌صورت زیر است :

$$v_x = a_x t + v_{0x} \qquad (۱ـ۱۱)$$

که در آن a_x شتاب (ثابت) جسم و v_{0x} سرعت جسم در لحظهٔ $t = 0$ است. در شکل ۱ـ۱۸ حرکت خودرو را در جهت محور x در نظر گرفته‌ایم.

شکل ۱ـ۱۸

بنابراین $v_{0x} = +10\,m/s$ و چون حرکت کندشونده است، علامت a_x مخالف علامت v_{0x} است؛ در نتیجه $a_x = -2\,m/s^2$. با استفاده از معادلهٔ سرعت داریم :

$$v_x = -2t + 10$$

هنگامی که خودرو متوقف می‌شود $v_x = 0$ است؛ در نتیجه :

$$0 = -2t + 10 \Rightarrow t = 5s$$

ب) می‌دانیم که در حرکت با شتاب ثابت، معادلهٔ حرکت به صورت زیر است :

$$\Delta x = \frac{1}{2} a_x t^2 + v_{0x} t \qquad (۱ـ۱۲)$$

$$\Delta x = \frac{1}{2}(-2)(5)^2 + 10(5) + 0 = 25\,m$$

این نتیجه را می‌توانستیم از رابطهٔ مستقل از زمان زیر نیز به دست آوریم :

$$v_x^2 - v_{0x}^2 = 2a_x (x - x_0) \qquad (۱ـ۱۳)$$

$$0 - (10)^2 = 2(-2)(\Delta x) \Rightarrow \Delta x = 25\,m$$

سقوط آزاد

سقوط آزاد نمونه‌ای طبیعی ازحرکت یک‌بُعدی با شتاب ثابت است. اگر جسمی را در امتداد قائم رو به بالا یا رو به پایین پرتاب کنید، درصورتی که بتوان از تأثیرات هوا چشم‌پوشی کرد، سرعت جسم با آهنگ ثابت و معینی تغییر می‌کند. در واقع گالیله نخستین کسی بود که استدلال کرد تمام اجسام در نبود مقاومت هوا با شتاب ثابتی سقوط می‌کنند.

این شتاب برای همهٔ اجسام یکسان و بزرگی آن در نزدیکی سطح زمین تقریباً برابر $۹/۸ m/s^۲$ است. شکل ۱ــ۱۹ نشان می‌دهد که پر و یک سیب در شرایط خلأ نسبی با شتاب یکسانی سقوط می‌کنند.

شکل ۱ــ۱۹ــ یک پر و یک سیب در شرایط خلأ نسبی با شتاب یکسانی سقوط می‌کنند. این شتاب، فاصلهٔ میان عکس‌های متوالی را افزایش داده است.

همان‌طورکه گفتیم در سقوط آزاد، جابه‌جایی در راستای قائم (محور y) است و بنابراین مکان متحرک با y نشان داده می‌شود. به این ترتیب معادله‌های حرکت شتاب ثابت که در فیزیک ۲ و آزمایشگاه با آنها آشنا شدیم برای سقوط آزاد در نزدیکی سطح زمین نیز به‌کار می‌آیند. یعنی کافی است حرکت را به جای محور x در راستای محور قائم (y) در نظر بگیریم، به‌طوری که جهت +y رو به بالا باشد. با این انتخاب، شتاب سقوط آزاد همواره منفی است (یعنی در خلاف جهت مثبت محور y است). بنابراین ذره چه رو به بالا و چه رو به پایین حرکت کند $a=-g=-۹/۸ m/s^۲$ است. به این ترتیب، کافی است در معادله‌های حرکت شتاب ثابت x را به y و a را به g− تبدیل کنیم تا معادله‌های سقوط آزاد به‌دست آیند :

$$v = -gt + v_۰ \qquad (۱۴ــ۱)$$

$$y = -\frac{۱}{۲}gt^۲ + v_۰t + y_۰ \qquad (۱۵ــ۱)$$

$$v^۲ - v_۰^۲ = -۲g(y - y_۰) \qquad (۱۶ــ۱)$$

همان‌طورکه گفتیم شتاب همواره منفی و رو به پایین است، ولی سرعت می‌تواند مثبت یا منفی باشد. در حین بالا رفتن، سرعت مثبت است ولی این سرعتِ مثبت کاهش می‌یابد تا اینکه به‌طور لحظه‌ای صفر شود. در حین پایین‌آمدن، سرعت منفی است ولی بزرگی آن افزایش می‌یابد.

مثال ۱ـ۱۲

سنگی را از بالای ساختمان بلندی به ارتفاع ۴۵m رها می‌کنیم، الف) سنگ پس از چه زمانی به زمین می‌رسد؟ ب) سرعت آن، هنگام رسیدن به زمین چقدر است؟ $(g = ۱۰ m/s^۲)$

پاسخ

الف) برای بررسی حرکت سقوط آزاد اجسام، محور y را در راستای قائم و رو به بالا و مبدأ آن را نقطهٔ رها کردن جسم در نظر می‌گیریم. در این صورت، معادلهٔ حرکت با شتاب ثابت ۱ــ۱۵ به صورت زیر به دست می‌آید :

$$y = -\frac{۱}{۲}gt^۲$$

$$-۴۵ = -\frac{۱}{۲}(۱۰)t^۲ \Rightarrow t = ۳s$$

ب) با استفاده از معادلهٔ سرعت ۱ــ۱۱ داریم :

$$v = -gt$$

$$v = -۱۰ \times ۳ = -۳۰ m/s$$

فعالیت ۱ـ۲

از دوست خود بخواهید، مطابق شکل ۱ــ۲۰، خط‌کش مدرّج بلندی را بین انگشتان شما نگه دارد و در یک لحظه آن را رها کند. چگونه می‌توانید زمان واکنش خود را (یعنی زمانی که طول می‌کشد تا پس از مشاهدهٔ رها شدن خط‌کش، آن را بگیرید) اندازه‌گیری کنید؟

شکل ۱ــ۲۰

مثال ۱ـ۱۳

سنگی را با سرعت $۲۰\,m/s$ در راستای قائم به طرف بالا پرتاب می‌کنیم. الف) چه زمانی طول می‌کشد تا سنگ به بالاترین ارتفاع برسد؟ ب) سنگ تا چه ارتفاعی بالا می‌رود؟ پ) چه زمانی طول می‌کشد تا سنگ به نقطهٔ پرتاب برگردد؟ ت) سرعت سنگ در این نقطه چقدر است؟ ($g = ۱۰\,m/s^۲$)

پاسخ

الف) محور y را روبه بالا و مبدأ آن را در نقطهٔ پرتاب فرض می‌کنیم. درنتیجه، در لحظهٔ پرتاب داریم $v_{۰y} = +۲۰\,m/s$ و $y_۰ = ۰$. در شروع حرکت، جسم در جهت محور y حرکت می‌کند، با استفاده از رابطه‌های ۱ـ۱۵ و ۱ـ۱۴ داریم :

$$y = -۵t^۲ + ۲۰t$$

$$v_y = -۱۰t + ۲۰$$

در بالاترین نقطه، $v_y = ۰\,m/s$، در نتیجه :

$$۰ = -۱۰t + ۲۰ \Longrightarrow t = ۲s$$

$$t = ۲s$$

ب) بالاترین ارتفاعی که سنگ به آن می‌رسد از معادلهٔ حرکت به دست می‌آید :

$$y = -۵\,(۲)^۲ + ۲۰\,(۲) = ۲۰m$$

پ) در بازگشت سنگ به نقطهٔ پرتاب، داریم $y = ۰$، در نتیجه :

$$-۵t^۲ + ۲۰t = ۰$$

و یا

$$t\,(-۵t + ۲۰) = ۰$$

جواب‌های این معادله $t = ۰$ و $t = ۴s$ است. $t = ۰$ مربوط به لحظهٔ پرتاب است و $t = ۴s$ زمانی است که طول می‌کشد تا سنگ به نقطهٔ پرتاب برگردد.

ت) سرعت متحرک در این لحظه از معادلهٔ سرعت به‌دست می‌آید :

$$v_y = -۱۰(۴) + ۲۰ = -۲۰\,m/s$$

علامت منفی نشان می‌دهد که در هنگام بازگشت سنگ به نقطهٔ پرتاب،

سوی سرعت آن، رو به پایین است. ملاحظه می‌شود که با معادله‌های حرکت و سرعت، می‌توان چگونگی حرکت سنگ را در هر لحظه از رفت و برگشت، توصیف کرد.

مثال ۱ـ۱۴

از بالای ساختمانی به ارتفاع $50\,m$ سنگی را در راستای قائم با سرعت $15\,m/s$، به بالا پرتاب می‌کنیم. چه مدت زمانی طول می‌کشد تا سنگ به زمین برسد؟

پاسخ

محور مختصات را رو به بالا و مبدأ آن را در بالای ساختمان در نظر می‌گیریم.

در نتیجه، معادلهٔ حرکت سنگ به صورت زیر است :

$$y = -5t^2 + 15t$$

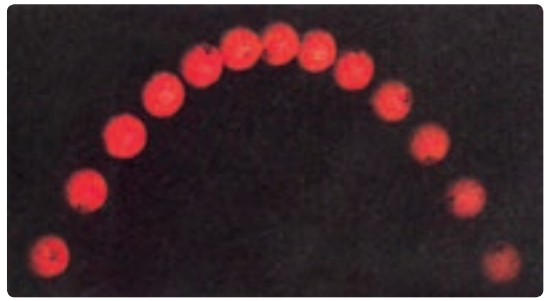
در پایین ساختمان $y = -50\,m$، در نتیجه :

$$-50 = -5t^2 + 15t$$

با حل این معادله، دو مقدار $t = -2s$ و $t = 5s$ به دست می‌آید؛ چون حرکت از لحظهٔ $t = 0$ شروع شده است، جواب اول قابل قبول نیست؛ در نتیجه زمان رسیدن سنگ به زمین $5s$ است.

۱ـ۲ـ حرکت در دو بُعد یا حرکت در صفحه

در بخش ۱ـ۱ حرکت در یک بعد را مرور کردیم. در این بخش به بررسی حرکت در صفحه که آن را حرکت دو بُعدی نیز می‌نامیم، می‌پردازیم. حرکت گلولهٔ توپی که شلیک می‌شود و یا حرکت یک سیاره به دور خورشید و یا حرکت اتومبیل در پیچ جاده و ... مثال‌هایی از حرکت دوبعدی هستند.



شکل ۱ــ۲۱ــ مسیر توپ گلف

مکان جسم در یک صفحه، با بردار $\vec{r}$ نمایش داده می‌شود. این بردار را می‌توان به صورت زیر نوشت :

$$\vec{r} = x\,\vec{i} + y\,\vec{j} \qquad (۱ــ۱۷)$$

که در آن $\vec{i}$ و $\vec{j}$ به ترتیب بردارهای یکّه در جهت‌های x و y هستند.

چون هنگام حرکت جسم، در هر لحظه بردار مکان آن تغییر می‌کند، برای مشخص کردن مکان جسم در حین حرکت، کافی است که مؤلفه‌های x و y را به صورت تابع‌هایی از زمان داشته باشیم :

$$x = f(t) \text{ و } y = g(t) \qquad (۱ــ۱۸)$$

رابطه‌های ۱ــ ۱۸ معادله‌های حرکت یک جسم را در دو بُعد نشان می‌دهند. واضح است که در حرکت دو بعدی، بردار مکان نیز تابعی از زمان است :

$$\vec{r} = f(t)\,\vec{i} + g(t)\,\vec{j} \qquad (۱ــ۱۹)$$

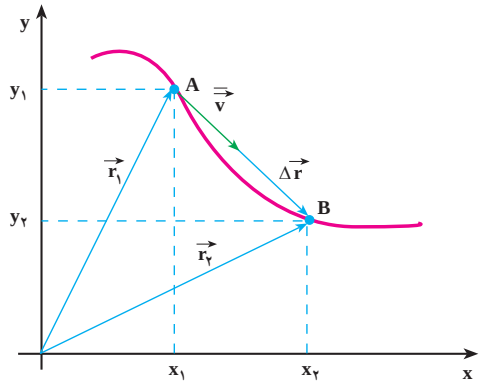
جابه‌جایی و سرعت متوسط : برای بررسی حرکت جسم روی مسیری مطابق شکل ۱ــ۲۲، فرض کنید متحرکی در لحظهٔ t_1 در نقطهٔ A (مکان $\vec{r}_1$) و در لحظهٔ t_2 در نقطهٔ B (مکان $\vec{r}_2$) باشد. برداری که از A به B رسم می‌شود جابه‌جایی (تغییر مکان) جسم را در بازهٔ زمانی $\Delta t = t_2 - t_1$ نمایش می‌دهد. این بردار که در شکل ۱ــ ۲۲ رسم شده است از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 \qquad (۱ــ۲۰)$$

$$\Delta\vec{r} = (x_2\,\vec{i} + y_2\,\vec{j}) - (x_1\,\vec{i} + y_1\,\vec{j})$$

$$\Delta\vec{r} = (\Delta x)\,\vec{i} + (\Delta y)\,\vec{j} \qquad (۱ــ۲۱)$$

در رابطهٔ ۱ــ۲۱، $\Delta x = x_2 - x_1$ و $\Delta y = y_2 - y_1$ است.



شکل ۱ــ۲۲ــ بردار سرعت متوسط و بردار تغییر مکان هم‌جهت‌اند.

سرعت متوسط جسم در یک بازهٔ زمانی معین، همانند حالت یک بعدی، به‌صورت زیر تعریف می‌شود :

$$\vec{\bar{v}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \qquad (۱ــ۲۲)$$

با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۲۱ داریم :

$$\vec{\bar{v}} = \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)\vec{i} + \left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)\vec{j} \qquad (۱ــ۲۳)$$

اگر $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ را با $\bar{v}_x$ و $\frac{\Delta y}{\Delta t}$ را با $\bar{v}_y$ نمایش دهیم، خواهیم داشت :

$$\vec{\bar{v}} = (\bar{v}_x)\vec{i} + (\bar{v}_y)\vec{j} \qquad (۱ــ۲۴)$$

پرسش ۱ـ۱

رابطهٔ ۱ــ۲۲ نشان می‌دهد که سرعت متوسط، کمیتی برداری است و $\vec{\bar{v}}$ با $\Delta\vec{r}$ هم‌جهت است؛ چرا؟

مثال ۱ـ۱۵

معادله‌های حرکت جسمی در دو بُعد، در SIبه صورت زیر است :

$x = ۲t$ و $y = -t^۲ + ۴t$

الف) بردار مکان جسم را در لحظه های $t_۱ = ۱s$ و $t_۲ = ۲s$ به دست آورید.

ب) سرعت متوسط آن را در بازهٔ زمانی ۱ تا ۲ ثانیه تعیین و بزرگی آن را حساب کنید.

پاسخ

الف) در $t_۱ = ۱s$:

$x_۱ = ۲m$ و $y_۱ = +۳m$

$\vec{r}_۱ = ۲\vec{i} + ۳\vec{j}$

به همین ترتیب در $t_۲ = ۲s$:

$x_۲ = ۴m$ و $y_۲ = ۴m$

$\vec{r}_۲ = ۴\vec{i} + ۴\vec{j}$

ب) در بازهٔ زمانی ۱ تا ۲ ثانیه :

$\Delta x = x_۲ - x_۱ = ۴ - ۲ = ۲m$

$\Delta y = y_۲ - y_۱ = ۴ - ۳ = ۱m$

$\overline{v}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{۲}{۱} = ۲m/s$

$\overline{v}_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{۱}{۱} = ۱m/s$

و در نتیجه

$\vec{v} = ۲\vec{i} + \vec{j}$

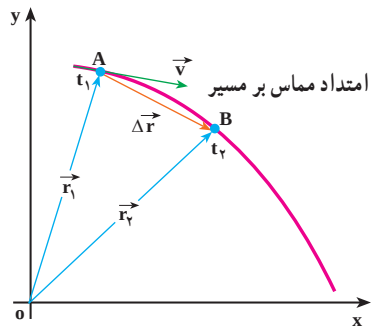
$(\overline{v})^۲ = (\overline{v}_x)^۲ + (\overline{v}_y)^۲ = ۲^۲ + ۱^۲ = ۵$

$\overline{v} = \sqrt{۵} \simeq ۲/۲۳ m/s$

سرعت لحظه‌ای : در شکل ۱ـ۲۳نمودار حرکت جسمی روی یک مسیر خمیده در صفحهٔ xoy نشان داده شده است. مکان جسم در دو لحظهٔ $t_۱$ و $t_۲$، مشخص شده است. پیش‌تر گفتیم که بردار سرعت متوسط در یک بازهٔ زمانی معین، با بردار جابه‌جایی مربوط به آن، هم‌جهت است. همچنین می‌دانید هنگامی که بازهٔ زمانی Δt، کوچک و کوچک‌تر شود، سرعت متوسط به سرعت لحظه‌ای

نزدیک و نزدیک‌تر می‌شود؛ یعنی، بردار سرعت لحظه‌ای حدّ بردار سرعت متوسط است وقتی Δt به سمت صفر، میل می‌کند :

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} (\bar{\vec{v}}) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \qquad (۱ــ۲۵)$$



شکل ۱ــ۲۳ــ سرعت لحظه‌ای در امتداد مماس بر مسیر حرکت است.

به عبارت دیگر می‌توان گفت که «سرعت لحظه‌ای، مشتق بردار مکان جسم، نسبت به زمان است» :

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \qquad (۱ــ۲۶)$$

در حدّی که Δt به سمت صفر میل کند، با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۲۱ می‌توان سرعت لحظه‌ای جسم را برحسب مؤلفه‌های آن در دو امتداد x و y به‌دست آورد :

$$\vec{v} = (\frac{dx}{dt})\vec{i} + (\frac{dy}{dt})\vec{j}$$

$$\vec{v} = (v_x)\vec{i} + (v_y)\vec{j} \qquad (۱ــ۲۷)$$

در شکل ۱ــ۲۳ می‌بینید که وقتی t_2 به سمت t_1 میل کند، راستای بردار جابه‌جایی $\Delta\vec{r}$، به سمت راستای مماس بر منحنی مسیر، در نقطهٔ A میل خواهد کرد. بنابراین، چون بردار سرعت متوسط همواره هم‌جهت با جابه‌جایی است، در حدّی که Δt به سمت صفر میل می‌کند، بردار سرعت لحظه‌ای بر مسیر حرکت در نقطهٔ A مماس خواهد شد. بدین‌ترتیب می‌توان گفت هنگامی که جسم روی یک مسیر خمیده حرکت می‌کند، جهت بردار سرعت آن که همواره بر مسیر حرکت مماس است، در هر لحظه تغییر می‌کند. از این پس، برای اختصار، بردار سرعت لحظه‌ای را سرعت می‌نامیم.

مثال ۱ـ ۱۶

خودرویی در یک صفحهٔ افقی که آن را در اینجا صفحهٔ xoy می‌نامیم، حرکت می‌کند. معادله‌های حرکت آن در SI به‌صورت زیر است :

$$x = 6t + 5 \quad و \quad y = 4t^2$$

بزرگی سرعت خودرو را در $t = 1s$ به‌دست آورید.

پاسخ

با استفاده از رابطهٔ ۱ـ۲۷ مؤلفه‌های سرعت به‌دست می‌آید :

$$v_x = \frac{dx}{dt} = 6\ m/s$$

ملاحظه می‌شود که مؤلفهٔ افقی سرعت مقدار ثابتی دارد و تابع زمان نیست. به‌همین ترتیب برای مؤلفهٔ قائم سرعت داریم :

$$v_y = \frac{dy}{dt} = 8t$$

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود این مؤلفه، تابع زمان است و بزرگی آن در $t = 1s$ برابر است با :

$$v_y = 8\ m/s$$

پس بزرگی سرعت در $t = 1s$ برابر است با :

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10\ m/s$$

شتاب متوسط و شتاب لحظه‌ای

می‌دانید وقتی که سرعت جسم در حال حرکت تغییر می‌کند، حرکت را شتاب‌دار می‌گویند. البته این تغییر سرعت می‌تواند به معنای تغییر در بزرگیِ سرعت، تغییر در جهتِ سرعت و یا هر دو باشد. دیدیم که وقتی مسیر حرکت جسم خمیده است، جهت سرعت آن الزاماً تغییر می‌کند. بنابراین، حرکت بر روی مسیر منحنی، حرکتی شتاب‌دار است. حتّی اگر بزرگی سرعت هم تغییر نکند.

فعالیت ۱ـ۳

دو حرکت شتاب‌دار مثال بزنید که در آنها، بزرگی سرعت تغییر نکند.

در شکل ۱ـ۲۴ـ الف بردارهای سرعت در دو لحظهٔ t_1 و t_2 روی مسیر نشان داده شده است. برای محاسبهٔ تغییر سرعت در بازهٔ زمانی $\Delta t = t_2 - t_1$ بردارهای مساوی با $\vec{v}_1$ و $\vec{v}_2$ را مطابق شکل ۱ـ۲۴ـ ب از مبدأ مشترک O رسم می‌کنیم و $\Delta\vec{v}$ را به‌دست می‌آوریم. در اینجا نیز، مشابه حرکت یک بعدی، بردار شتاب متوسط را در بازهٔ زمانی Δt به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم :

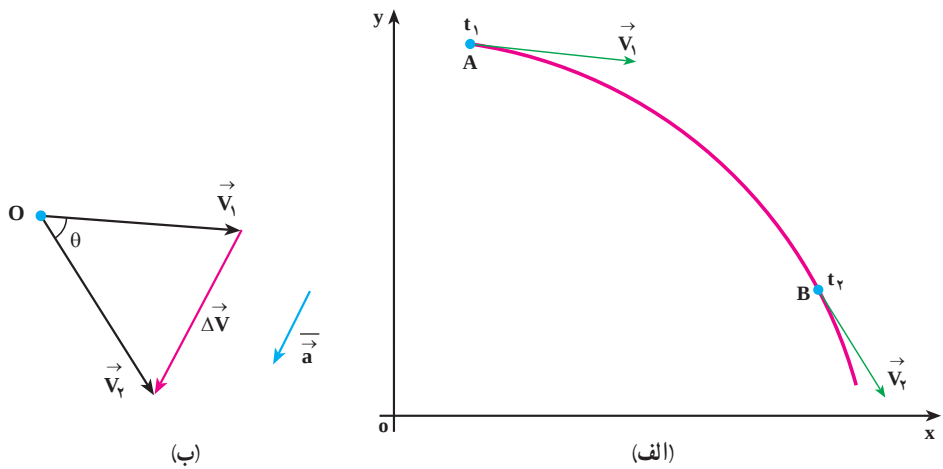
$$\vec{\bar{a}} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \qquad (۱ـ ۲۸)$$

با استفاده از رابطهٔ ۱ـ۲۷ داریم :

$$\vec{\bar{a}} = \left(\frac{\Delta v_x}{\Delta t}\right)\vec{i} + \left(\frac{\Delta v_y}{\Delta t}\right)\vec{j}$$

که آن را می‌توان به‌صورت زیر نوشت :

$$\vec{\bar{a}} = (\bar{a}_x)\,\vec{i} + (\bar{a}_y)\,\vec{j} \qquad (۱ـ۲۹)$$



شکل ۱ـ۲۴ـ بردار شتاب متوسط با $\Delta\vec{v}$ هم‌جهت است.

شتاب لحظه‌ای در لحظهٔ t_1 را نیز می‌توان به‌صورت حدّ شتاب متوسط، هنگامی که Δt به سمت صفر میل می‌کند، تعریف کرد؛ یعنی :

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} (\vec{\bar{a}}) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \qquad (۱ـ۳۰)$$

با توجه به مفهوم مشتق، رابطهٔ ۱ـ۳۰ به‌صورت زیر نوشته می‌شود :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \qquad (۱ـ۳۱)$$

$$\vec{a} = \frac{d^2(\vec{r})}{dt^2} \qquad (۱ـ۳۲)$$

به کمک رابطهٔ ۱ـ۲۹ می‌توانیم بنویسیم :

$$\vec{a} = (\frac{dv_x}{dt})\vec{i} + (\frac{dv_y}{dt})\vec{j} \qquad (۱ـ۳۳)$$

که در آن $\frac{dv_x}{dt} = a_x$ و $\frac{dv_y}{dt} = a_y$ مؤلفه‌های شتاب لحظه‌ای هستند.

درنتیجه می‌توان نوشت :

$$\vec{a} = (a_x)\vec{i} + (a_y)\vec{j} \qquad (۱ـ۳۴)$$

رابطهٔ ۱ـ۲۸ نشان می‌دهد که $\vec{\bar{a}}$ و $\Delta \vec{v}$ هم‌جهت‌اند، ولی همان‌طور که در شکل ۱ـ۲۴ـ ب نشان داده شده است، در حرکت روی مسیر خمیده، معمولاً بردار شتاب متوسط $\vec{\bar{a}}$ ، با بردارهای سرعت، ($\vec{v_1}$ یا $\vec{v_2}$) هم‌جهت نیست؛ درحالتی هم که Δt به سمت صفر میل می‌کند و بردار $\vec{v_2}$ به‌بردار $\vec{v_1}$ بسیار نزدیک می‌شود، شتاب لحظه‌ای با سرعت لحظه‌ای نیز معمولاً هم‌جهت نخواهد بود، ولی به کمک رابطهٔ ۱ـ۳۳ و با داشتن معادلهٔ سرعت، جهت بردار شتاب لحظه‌ای را که از این پس آن را به اختصار **شتاب** خواهیم نامید، می‌توان به‌دست آورد.

مثال ۱ـ۱۷

معادلهٔ حرکت دو بعدی جسمی در SI به‌صورت زیر است :

$$\begin{cases} x = 20t^2 \\ y = -5t^3 \end{cases}$$

بردارهای سرعت و شتاب این جسم را در لحظهٔ $t = 1s$ به‌دست آورید. آیا این دو بردار هم‌جهت‌اند؟

پاسخ

برای تعیین بردار سرعت، ابتدا مؤلفه‌های v_x و v_y را در $t = ۱s$ به‌دست می‌آوریم :

$$v_x = \frac{dx}{dt} = ۴۰t \xrightarrow{t=۱s} v_x = ۴۰ m/s$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = -۱۵t^۲ \xrightarrow{t=۱s} v_y = -۱۵ m/s$$

بنابراین بردار سرعت لحظه‌ای در $t = ۱s$ چنین خواهد بود :

$$\vec{v} = ۴۰\vec{i} - ۱۵\vec{j}$$

برای تعیین بردار شتاب نیز ابتدا مؤلفه‌های شتاب، یعنی a_x و a_y، را به‌دست می‌آوریم. مؤلفهٔ افقی شتاب، ثابت است :

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = ۴۰ m/s^۲$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = -۳۰t$$

a_y تابع زمان است و در $t = ۱s$ برابر است با :

$$a_y = -۳۰ m/s^۲$$

با توجه به مقدارهای a_x و a_y در لحظهٔ فوق، بردار شتاب در $t = ۱s$ نیز نوشته می‌شود :

$$\vec{a} = ۴۰\vec{i} - ۳۰\vec{j}$$

زاویه‌ای که بردارهای سرعت و شتاب در لحظهٔ $t = ۱s$ با محور افقی می‌سازند به‌ترتیب برابرند با :

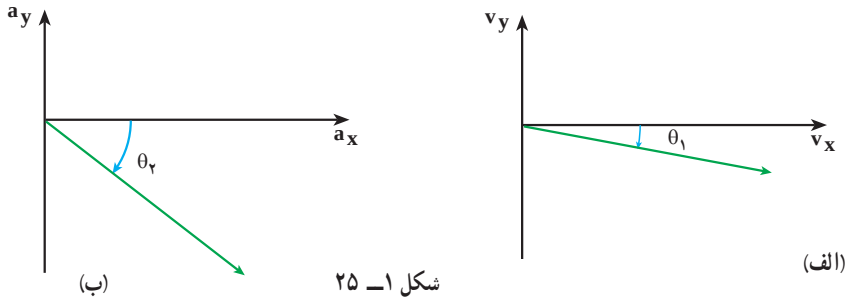
$$\tan\theta_۱ = \frac{v_y}{v_x} = \frac{-۱۵}{۴۰}$$

$$\theta_۱ = \tan^{-۱}\frac{-۳}{۸} \simeq -۷^\circ$$

$$\tan\theta_۲ = \frac{a_y}{a_x} = -\frac{۳۰}{۴۰}$$

$$\theta_۲ = \tan^{-۱}\frac{-۳}{۴} \simeq -۳۷^\circ$$

با مقایسهٔ زاویه‌های θ_1 و θ_2 در شکل ۱ــ۲۵ می‌توان نتیجه گرفت که بردارهای سرعت و شتاب در این لحظه هم‌جهت نیستند.



شکل ۱ــ ۲۵

تمرین‌های فصل اول

۱ــ معادلهٔ حرکت جسمی در SI به‌صورت $x = t^3 - 3t^2$ است. مطلوب است :

الف) بزرگی سرعت متوسط جسم در بازهٔ زمانی ۱ تا ۲ ثانیه

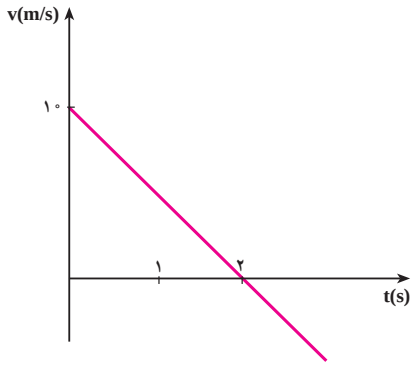
ب) بزرگی سرعت متحرک در لحظهٔ $t = 4s$

۲ــ جسمی با سرعت ثابت بر روی محور x حرکت می‌کند. جسم در لحظهٔ $t = 2s$ در مبدأ مختصات و ۲ ثانیه بعد در $x = -6m$ است.

الف) معادلهٔ حرکت جسم را بنویسید.

ب) مکان جسم را در لحظهٔ $t = 3s$ به‌دست آورید.

۳ــ نمودار سرعت ــ زمان متحرکی در شکل ۱ــ۲۶ داده شده است. اگر متحرک در لحظهٔ $t = 0s$، در $x = 2m$ باشد، معادلهٔ حرکت آن را به‌دست آورید.



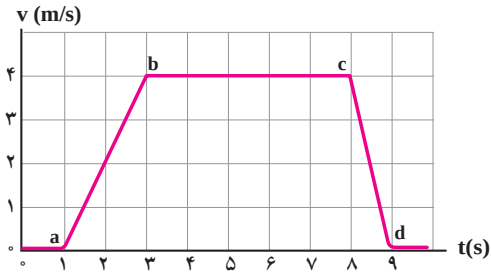
شکل ۱ــ۲۶

۴ــ معادلهٔ حرکت متحرکی که بر روی خط راست حرکت می‌کند، در SI به‌صورت : $x = 2t^3 + 4t$ است.

الف) شتاب متوسط متحرک در بازهٔ زمانی ۱ تا ۲ ثانیه

ب) شتاب متحرک در لحظهٔ $t = 3s$ را به‌دست آورید.

۵ــ نمودار سرعت ــ زمان آسانسوری مطابق شکل ۱ــ۲۷ است. نمودار شتاب ــ زمان آن چگونه می‌شود و در مورد کندشونده یا تندشونده بودن حرکت اظهار نظر کنید.



شکل ۱ــ۲۷

۶ ــ خودرویی در پشت چراغ قرمز ایستاده است. با سبز شدن چراغ، خودرو با شتاب $۲\,m/s^۲$ شروع به حرکت می‌کند. در همین لحظه کامیونی با سرعت ثابت $۳۶\,km/h$ از کنار آن می‌گذرد.

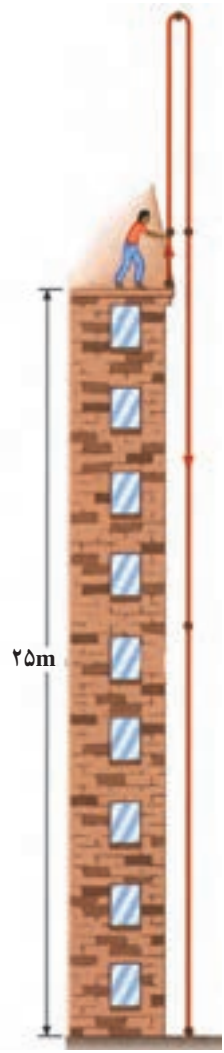
الف) نمودارهای مکان ــ زمان و سرعت ــ زمان را برای خودرو و کامیون رسم کنید.

ب) پس از چه مدتی، خودرو به کامیون می‌رسد؟

۷ــ در شکل ۱ــ ۲۸ توپی در راستای قائم به‌طرف بالا پرتاب می‌شود. توپ پس از ۴ ثانیه به محلّ پرتاب برمی‌گردد. توپ

الف) با چه سرعتی پرتاب شده است؟ ب) تا چه ارتفاعی بالا می‌رود؟

پ) با چه سرعتی به زمین می‌رسد؟ ت) بعد از چند ثانیه به زمین می‌رسد؟ $(g = ۱۰\,m/s^۲)$



شکل ۱ــ ۲۸

۸ ــ مثالی ذکر کنید که در آن سرعت یک جسم در یک لحظه، صفر ولی جسم در آن لحظه دارای شتاب باشد.

۹ــ کانگورو می‌تواند از مانعی به ارتفاع ۲/۵ متر بپرد.

الف) سرعت آن را هنگام بلند شدن از زمین حساب کنید.

ب) سرعت آن را به هنگام بازگشت به زمین محاسبه کنید.

فرض کنید حرکت کانگورو در راستای قائم است.

۱۰ــ بردارهای مکان ذرهٔ متحرکی در لحظه‌های $t_1 = 5s$ و $t_2 = 25s$ به‌ترتیب $\vec{r}_1 = 2\vec{i} + 14\vec{j}$ و $\vec{r}_2 = 8\vec{i} + 6\vec{j}$ است. بزرگی سرعت متوسط این ذره را بین دو لحظهٔ t_1 و t_2 به‌دست آورید. با رسم یک نمودار، جهت $\vec{\bar{v}}$ را نشان دهید.

۱۱ــ معادلهٔ حرکت جسمی با دو رابطهٔ زیر، در SI داده شده است :

$$x = 6t \quad , \quad y = 2t^2 + 1$$

الف) معادلهٔ سرعت جسم را بنویسید و بزرگی سرعت را در $t = 2s$ محاسبه کنید.

ب) بردار سرعت متوسط جسم را بین لحظه‌های $t = 1$ و $t = 2$ ثانیه برحسب بردارهای یکّهٔ $\vec{i}$ و $\vec{j}$ بنویسید.

دینامیک

فصل ۲

دینامیک

نگاهی به فصل : قانون‌های نیوتون از جملهٔ قانون‌های اساسی و بنیادی در دانش فیزیک به شمار می‌روند. این قانون‌ها، کاربردهای گسترده‌ای در فناوری و غالب رشته‌های مهندسی دارند. در صنعت، امور ساختمانی، دریانوردی، فضانوردی و... اصول حاکم بر پدیده‌ها از قانون‌های نیوتون پیروی می‌کنند.

شما در فیزیک (۲) و آزمایشگاه، با قانون‌های نیوتون آشنا شدید و دیدید که چگونه می‌توان آنها را برای حل مسئله‌های دینامیک در یک بُعد به کار برد.

در این فصل، پس از یادآوری این قانون‌ها، کاربرد آنها را در حل مسئله‌ها، در دینامیک دو بعدی، بررسی می‌کنیم.

۲ــ۱ــ قانون‌های نیوتون

قانون اول نیوتون : «هر جسمی، حالت سکون و یا حرکت یکنواخت خود را روی خط راست حفظ می‌کند، مگر آنکه تحت تأثیر نیرو یا نیروهایی، مجبور به تغییر آن حالت شود.»

قانون دوم نیوتون : «نیروی برایند وارد بر جسم برابر است با حاصل‌ضرب جرم جسم در شتاب آن» به عبارت دیگر شتاب یک جسم در همان جهت نیروی برایند وارد بر آن است و با نیروی برایند تقسیم بر جرم جسم برابر است؛ یعنی :

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

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \qquad (۲ــ۱)$$

توجه کنید در رابطهٔ بالا $\vec{F}$ برایند نیروهای وارد بر جسم است.

قانون سوم نیوتون : «هرگاه جسمی به جسم دیگر نیرو وارد کند، جسم دوم هم به جسم اوّل نیرویی **هم اندازه، هم راستا و در خلاف سوی آن** وارد می‌کند.»

همچنین در فیزیک (۲) و آزمایشگاه دیدیم، نیرویی که جسم اوّل وارد می‌کند، «کنش» و نیرویی که جسم دوم وارد می‌کند «واکنش» نام دارد. این دو نیرو همواره هم اندازه، هم راستا و در سوی مخالف یکدیگرند و هر یک بر دیگری وارد می‌شود.

تمرین ۲ـ۱

با مراجعه به آنچه در فیزیک (۲) و آزمایشگاه خوانده‌اید، جمله‌های زیر را کامل کنید :

۱ــ تغییر بردار سرعت در اثر ..... است.

۲ــ اگر در اثر اعمال نیرو، جسم ساکنی به حرکت درآید، در شروع حرکت بردارهای سرعت و ..... هم‌جهت‌اند.

۳ــ در مسیر خمیده بردارهای سرعت و نیرو.....

۴ــ اگر جسمی بر روی خط راستی در حرکت باشد و بر آن نیرویی هم‌راستا و هم‌سو با سرعت حرکتِ آن وارد شود، حرکت جسم..... خواهد شد.

۵ــ درصورتی که جسمی بر روی خط راستی در حرکت باشد و بر آن نیرویی در خلاف جهت سرعت اعمال شود حرکت جسم ..... خواهد شد.

تمرین ۲ـ۲

توضیح دهید چرا هنگامی که :

۱ــ با پا به دیواری ضربه می‌زنید پای شما درد می‌گیرد؟

شکل ۲ــ۱

۲ــ قایق‌ران پارو می‌زند، قایق در آب حرکت می‌کند؟

۳ــ چمدان را از زمین بلند می‌کنید، دست شما به‌طرف پایین کشیده می‌شود؟

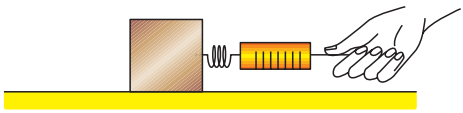
۴ــ در شکل ۲ــ۱ آب از فواره خارج می‌شود، فواره می‌چرخد؟

فعالیت۲ـ۱

در شکل ۲ــ۲ تصویر یک موشک ایرانی را در حال پرتاب، مشاهده می‌کنید. براساس قانون سوم نیوتون چگونگی حرکت آن را شرح دهید.

شکل ۲ــ۲

مثال ۲ـ۱



شکل ۲ـ۳ـ الف

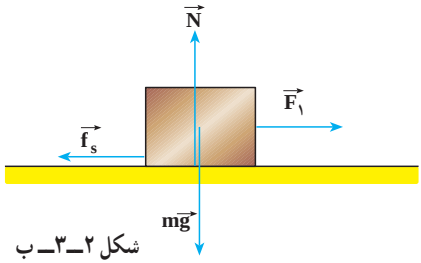
صندوقی به جرم ۱۰kg روی یک سطح افقی با ضریب اصطکاک ایستایی ۰/۴ و ضریب اصطکاک جنبشی ۰/۲ قرار دارد.

مطابق شکل ۲ـ۳ـ الف نیروسنج را به صندوق وصل می‌کنیم و آن را می‌کشیم :

الف) نخست با نیرویی برابر با ۲۰N صندوق را می‌کشیم. آیا صندوق شروع به حرکت می‌کند؟ در این حالت نیروی اصطکاک بین صندوق و سطح چه‌مقدار است؟

ب) نیروی وارد بر صندوق را به ۶۰N می‌رسانیم، در این حالت نیروی اصطکاک چه‌مقدار است؟ شتاب حرکت صندوق را در این حالت حساب کنید.

پاسخ



شکل ۲ـ۳ـ ب

الف) در فیزیک (۲) و آزمایشگاه دیدیم، برای آنکه جسمی به حرکت درآید باید نیروی وارد بر آن از نیروی اصطکاک در آستانهٔ حرکت بیشتر باشد. بنابراین ابتدا نیروی اصطکاک در آستانهٔ حرکت (بیشینهٔ نیروی اصطکاک) را محاسبه می‌کنیم :

$$\Sigma F_y = 0 \Rightarrow N = mg = 10 \times 10 = 100N$$

$$f_{s,max} = \mu_s N \Rightarrow f_{s,max} = 0/4 \times 100 = 40N$$

در این حالت، چون نیروی وارد شده، از نیروی اصطکاک در آستانهٔ حرکت کمتر است، صندوق ساکن می‌ماند و درنتیجه شتاب حرکت آن صفر است. بنابر قانون دوم نیوتون داریم :

$$\Sigma F_x = ma \Rightarrow F_1 - f_s = ma = 0 \Rightarrow f_s = 20N$$

ب) در این حالت، چون نیروی وارد شده، از نیروی اصطکاک در آستانهٔ حرکت بیشتر است، جسم حرکت می‌کند و نیروی اصطکاک، جنبشی است و با استفاده از رابطهٔ $f_k = \mu_k N$ محاسبه می‌شود.

$$f_k = 0/2 \times 100 = 20N$$

برای محاسبهٔ شتاب حرکت، قانون دوم نیوتون را می‌نویسیم :

$$F - f_k = ma \Rightarrow 60 - 20 = 10a \Rightarrow a = 4\,m/s^2$$

۲ـ۲ـ چگونگی استفاده از قانون‌های نیوتون در حرکت یک جسم

در فیزیک (۲) و آزمایشگاه دیدیم که برای حل مسئله‌های دینامیک یک‌بعدی چه نکاتی را باید در نظر بگیریم. اکنون برای حلّ مسئله‌های دینامیک دوبعدی این نکات را یادآوری و تکمیل می‌کنیم :

۱ـ شکل ساده‌ای از جسم و تکیه‌گاه آن را رسم می‌کنیم.

۲ـ نیروهایی را که اجسام دیگر بر جسم وارد می‌کنند، روی شکل مشخص می‌کنیم.

۳ـ دستگاه محورهای مختصات مناسب انتخاب می‌کنیم. (ضمن حل مسئله، با نحوهٔ انتخاب دستگاه مختصات مناسب آشنا خواهیم شد.)

۴ـ نیروها را روی محورهای مختصات تجزیه می‌کنیم؛ یعنی، مؤلفه‌های هر نیرو را روی محورها تعیین می‌کنیم.

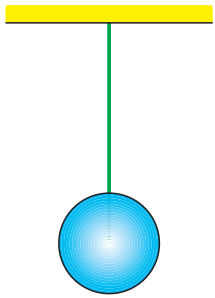
۵ـ با نوشتن قانون دوم نیوتون روی هر یک از محورها، شتاب حرکت جسم را روی هر محور محاسبه می‌کنیم. به‌عبارت دیگر، مؤلفه‌های نیرو را روی هر محور به‌طور جداگانه، به‌صورت $F_x = ma_x$ و $F_y = ma_y$ می‌نویسیم.

۶ـ هرگاه چند جسم به هم متصل باشند، درصورتی که بردار شتاب حرکت همگی یکسان باشد، مجموعه را می‌توانیم به‌عنوان یک دستگاه (با جرمی برابر مجموع جرم‌ها) درنظر بگیریم و قانون دوم را برای آن بنویسیم.

نحوهٔ استفاده از قانون‌های نیوتون در مثال‌هایی که در ادامه می‌آید، نشان داده شده است.

مثال ۲ـ۲

جسمی به جرم $m = 12kg$ را با طنابی که جرم آن ناچیز است مطابق شکل ۲ـ۴ـ الف می‌آویزیم. نیروهای وارد بر جسم را تعیین کنید و مقدار هر یک را به‌دست آورید.



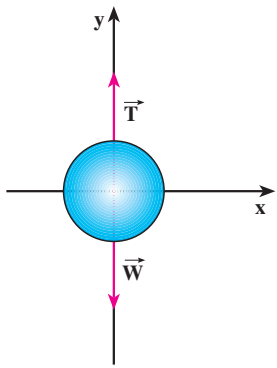
شکل ۲ـ۴ـ الف

پاسخ

نیروهای وارد بر جسم عبارت‌اند از :

نیروی وزن، که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود و نیرویی که از طرف طناب به جسم وارد می‌شود. چون جسم ساکن است، باید برایند نیروهای وارد بر آن صفر باشد. درنتیجه باید از طرف طناب،

نیرویی در امتداد قائم و رو به بالا بر جسم اعمال شود. این نیرو را نیروی کشش طناب (نخ) می‌نامند که آن را با $\vec{T}$ نمایش می‌دهیم.



شکل ۲ــ۴ــ ب

نیروهای وارد بر جسم، در راستای محور y هستند و در شکل ۲ــ۴ــ ب نشان داده شده‌اند. بنابر قانون دوم نیوتون داریم :

$$T - mg = ma$$

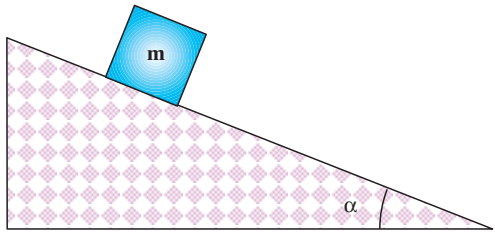
چون $a = ۰$، داریم :

$$T = mg = ۱۲ \times ۱۰ = ۱۲۰N$$

در هر نقطه از طناب کشیده شده، نیرویی از طرف یک‌بخش بر بخش دیگر وارد می‌شود. نیروی کشش طناب در هر نقطه برابر نیرویی است که در صورت پاره‌شدن طناب در آن نقطه، باید وارد کنیم تا وضعیّت اولیهٔ آن حفظ شود؛ یعنی، اگر جسم ساکن بوده با جای‌گزینی این نیرو در آن نقطه همچنان ساکن بماند و اگر در حرکت بوده با همان حالت قبل از پاره شدن حرکت کند.

مثال ۲ـ۳

جسمی به جرم m را روی سطح شیب‌داری که با افق زاویهٔ α می‌سازد قرار می‌دهیم :

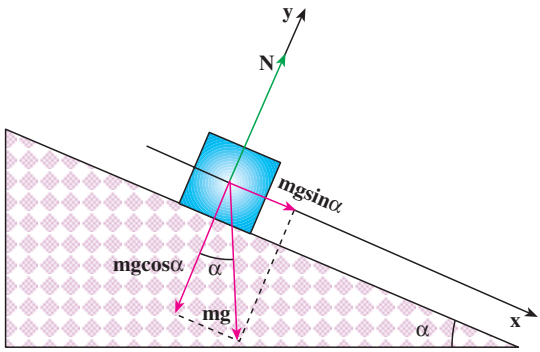


شکل ۲ــ۵ــ الف

الف) شتاب حرکت جسم و نیروی عمودی تکیه‌گاه را محاسبه کنید. (در این قسمت اصطکاک را نادیده بگیرید.)

ب) اگر در اثر نیروی اصطکاک، جسم روی سطح ساکن بایستد، نیروی اصطکاک را محاسبه کنید.

پاسخ



شکل ۲ــ۵ ــ ب

الف) ابتدا نیروهای وارد بر جسم را رسم می‌کنیم. جسم در امتداد سطح شیب‌دار حرکت می‌کند، محور x را در راستای سطح شیب دار و در جهت حرکت و محور y را عمود بر آن سطح، انتخاب می‌کنیم.

مؤلفه‌های وزن روی محورهای x و y به‌ترتیب عبارت‌اند از :

$mg\cos\alpha$ و $mg\sin\alpha$

با توجه به قانون دوم نیوتون در راستای محور x داریم :

$$F_x = mg\sin\alpha = ma$$

$$a = g\sin\alpha$$

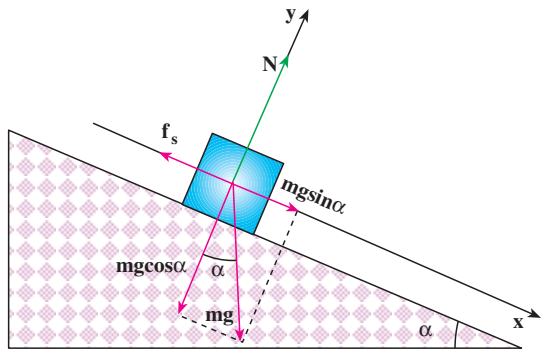
چون جسم در راستای محور y حرکت ندارد :

$$F_y = 0$$

$$N - mg\cos\alpha = 0$$

و درنتیجه :

$$N = mg\cos\alpha$$



شکل ۲ ــ ۶

ب) نمودار نیروهای وارد بر جسم در شکل ۲ــ۶ نشان داده شده است؛ چون جسم ساکن است، برایند نیروهای وارد بر آن صفر است :

$$F_x = 0$$

$$mg\sin\alpha - f_s = 0$$

و از آنجا داریم :

$$f_s = mg\sin\alpha$$

۲ـ۳ـ تکانه (اندازه حرکت)

شکل ۲ـ۷

در شکل ۲ـ۷ یک خودروی سواری و یک کامیون مجاور هم با سرعت یکسان در حرکت‌اند. با نزدیک شدن به چراغ قرمز خودرو و کامیون باید پس از طی مسافت ۵۰m متوقف شوند. به‌نظر شما نیروی لازم برای متوقف کردن کدام‌یک از آنها با شتاب ثابت بیشتر است؟ برای بررسی دقیق‌تر، فرض کنید جرم کامیون ۱۰ تن و جرم خودروی سواری ۱ تن باشد و هر کدام با سرعت ۲۰m/s در حرکت باشند. شتاب حرکت کندشونده برای کامیون و خودروی سواری، در این جابه‌جایی برابر است با :

$$|a_1| = |a_2| = \left|\frac{v^2 - v_0^2}{2\Delta x}\right| = \frac{400}{2\times 50} = 4\,m/s^2$$

نیروی لازم برای توقف کامیون برابر است با :

$$F_1 = m_1 a = 10000 \times 4 = 4\times 10^4 N$$

و نیروی لازم برای توقف خودروی سواری برابر است با :

$$F_2 = m_2 a = 1000 \times 4 = 4\times 10^3 N$$

نتیجه می‌گیریم که نیروی لازم برای متوقف کردن کامیون بیشتر از نیروی لازم برای متوقف کردن خودروی سواری است.

فعالیت ۲ـ۲

فرض کنید در مثال بالا، جرم خودرو و کامیون یکسان، ولی سرعت یکی ۲۰m/s و دیگری ۱۵m/s باشد. نیروی لازم برای متوقف کردن هر کدام از آنها را محاسبه و با هم مقایسه کنید. نتیجه‌های این فعالیّت و مثال قبل را در گروه خود، تجزیه و تحلیل و به کلاس گزارش کنید.

در مثال‌های بالا دیدیم که نیروی لازم برای متوقّف کردن خودروها به جرم و سرعت آنها بستگی دارد. در فیزیک کمیّتی به‌نام تکانه (اندازه حرکت) تعریف می‌شود که به هر دو کمیّت جرم و سرعت بستگی دارد. «**تکانهٔ یک جسم، حاصل ضرب جرم جسم در سرعت آن است.**»

تکانه را با $\vec{P}$ نمایش می‌دهند و یکای آن کیلوگرم متر بر ثانیه (kgm/s) است. بنابراین می‌توان نوشت :

$$\vec{P} = m\vec{v} \qquad (۲ــ۲)$$

تکانه، کمیّتی برداری است؛ چرا؟

رابطهٔ بین نیرو و تکانه : با به‌کارگیری قانون دوم نیوتون، به سادگی رابطهٔ نیرو و تکانه به‌دست می‌آید؛ با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۱ داریم :

$$\vec{F} = m\frac{d\vec{v}}{dt}$$

چون جرم جسم، مقداری ثابت است، می‌توان نوشت :

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = d\frac{(m\vec{v})}{dt} \quad \Rightarrow \quad \vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{v})$$

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} \qquad (۲ــ۳)$$

یعنی **آهنگ تغییر تکانهٔ یک جسم نسبت به زمان برابر برایند نیروهای وارد بر جسم است**. به بیان دیگر، برآیند نیروهای وارد بر جسم، مشتق تکانهٔ آن نسبت به زمان است.

اگر در بازهٔ زمانی Δt تغییر تکانهٔ یک جسم $\Delta\vec{P}$ باشد، نیروی متوسّط وارد بر آن از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$\bar{\vec{F}} = \frac{\Delta\vec{P}}{\Delta t} \qquad (۲ــ۴)$$

مثال ۲ــ۴

چکشی به جرم ۱/۵kg را با سرعت ۱۰m/s به سر میخی می‌کوبیم (شکل ۲ــ۸). اگر زمان برخورد چکش با سر میخ ۰/۰۰۵s باشد، بزرگی نیروی متوسطی که به چکش وارد می‌شود، چه‌مقدار است؟

شکل ۲ــ۸

پاسخ

$$\bar{F} = \frac{\Delta P}{\Delta t} = m\left(\frac{v - v_{\circ}}{\Delta t}\right)$$

$$|\bar{F}| = \left|1/5\,\frac{(\circ - 10)}{\circ/\circ\circ 5}\right| = 3000\,N$$

تمرین ۲ـ۳

دو خودروی A و B دارای مشخصات فنی متفاوت‌اند. جرم خودروی A برابر ۱۰۰۰kg و جرم خودروی B برابر ۸۰۰kg است. سرعت خودروی A حداقل پس از ۱۱/۷s از صفر به ۹۶km/h می‌رسد، ولی سرعت خودروی B حداقل پس از ۱۲/۱s، همین مقدار افزایش پیدا می‌کند.

حداکثر برایند نیروهای وارد بر هر کدام از خودروهای A و B را حساب کنید.

نقش کیسهٔ هوا در تصادف‌های رانندگی

حوادث ناشی از سوانح رانندگی هر روز عدّه‌ای را به کام مرگ می‌کشاند و یا موجب آسیب‌ها و خسارت‌های فراوان می‌شود. از این‌رو، شرکت‌های خودروسازی، همواره می‌کوشند خودروهای خود را با امکانات جدیدی، به منظور کاهش ضایعات ناشی از تصادف، مجهّز کنند.

جاسازی کیسهٔ هوا در خودروها، یکی از تازه‌ترین روش‌های ایجاد ایمنی است. ساز و کار این وسیله، به این صورت است که هنگام بروز حادثه که به تغییر سرعت ناگهانی خودرو می‌انجامد، در اثر یک واکنش شیمیایی سریع، گازی در یک کیسهٔ پلاستیکی تولید

شکل ۲ــ۹

فناوری

فناوری

می‌شود و کیسهٔ پر از گاز در مقابل راننده و سرنشین قرار می‌گیرد. برخورد آنها به کیسهٔ هوا، مدت زمان تغییر سرعت یا زمان توقف آنها را بسیار طولانی‌تر می‌کند؛ در نتیجه بر طبق رابطهٔ $\overrightarrow{F} = \frac{\Delta \overrightarrow{P}}{\Delta t}$، با افزایش Δt نیروی متوسط وارد بر سرنشینان کاهش می‌یابد و بدین‌ترتیب از وارد آمدن آسیب جدی به آنها جلوگیری می‌شود.

زمان توقف در برخورد با جسم سخت در حدود هزارم ثانیه است، درحالی‌که کیسهٔ هوا، این زمان را تا چند ثانیه افزایش می‌دهد از این‌رو، نیروی وارد بر سرنشین تا حدود یک هزارم، کاهش می‌یابد.

فعالیت ۲ـ۳

در یک مسابقهٔ پرش با نیزه، ورزشکاری از مانعِ پرش با ارتفاع ۶m بدون خطا عبور می‌کند.

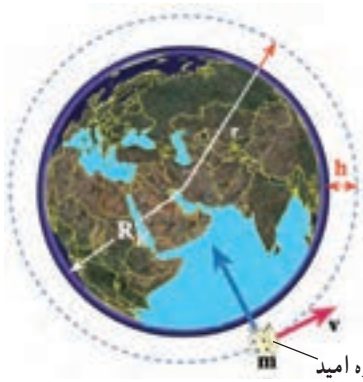
نقش تشک را در جلوگیری از آسیب رسیدن به ورزشکار مورد بحث و بررسی قرار دهید.

شکل ۲ـ۱۰

۲ــ۴ــ حرکت دایره‌ای

حرکت یک جسم در مسیر دایره‌ای، نمونهٔ دیگری از حرکت در صفحه است. مسیر حرکت ماه و ماهواره‌ها به دور زمین و برخی سیاره‌ها به دور خورشید تقریباً دایره‌ای است. در بعضی وسایل خانگی مانند لباس‌شویی، آب‌میوه‌گیری و... اجسام درون آنها در مسیر دایره‌ای حرکت می‌کنند. در تصویرهای زیر نمونه‌هایی از حرکت اجسام بر مسیر دایره‌ای را مشاهده می‌کنید.

شکل ۲ــ۱۱ــ الف ــ تصویری از یک قطار هوایی در پارک تفریحی

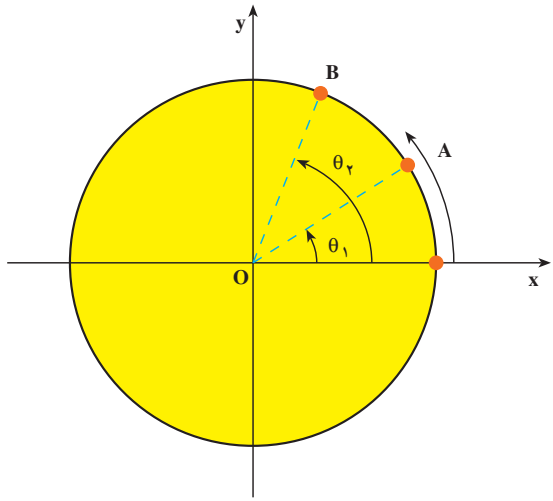


شکل ۲ــ۱۱ــ ب ــ طرحی از چرخش ماهوارهٔ امید به دور زمین

شکل ۲ــ۱۱ــ پ ــ تصویری از حرکت اتومبیل در شیبی عرضی

اکنون به بررسی حرکت دایره‌ای و دینامیک آن می‌پردازیم.

سرعت زاویه‌ای متوسط : ذره‌ای را در نظر بگیرید که روی مسیر دایره‌ای در جهت مخالف عقربه‌های ساعت در حرکت است (شکل ۲ــ ۱۲). در این‌جا منظور از ذرّه، جسم کوچکی است که ابعاد آن در برابر شعاع دایره ناچیز باشد. مکان ذرّه را روی دایره در هر لحظه می‌توان با زاویهٔ θ نسبت



شکل ۲ــ۱۲

به محور ox نمایش داد. به θ، مکان زاویه‌ای می‌گوییم. بنابراین هنگامی که ذرّه در نقطهٔ A قرار دارد مکان آن را با زاویهٔ θ_1 و هنگامی که در نقطهٔ B قرار دارد، مکان آن را با زاویهٔ θ_2 نشان می‌دهیم. $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ را جابه‌جایی زاویه‌ای ذرّه می‌نامیم. سرعت زاویه‌ای متوسط ذرّه در حرکت دایره‌ای، به‌صورت نسبت جابه‌جایی زاویه‌ای به زمان آن تعریف می‌شود؛ یعنی :

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \qquad (۵ــ۲)$$

یکای سرعت زاویه‌ای، رادیان بر ثانیه (rad/s) است.

مثال ۲ـ۵

حرکت زمین به دور خورشید تقریباً دایره‌ای است، سرعت زاویه‌ای متوسط زمین به دور خورشید را محاسبه کنید.

پاسخ

زمین در مدّت ۳۶۵ روز، یک بار به دور خورشید می‌چرخد و در این مدت 2π رادیان طی می‌کند؛ بنابراین :

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{2\pi}{365\times24\times3600} = \frac{2\pi}{31536000} \simeq 2\times10^{-7}\,(\mathrm{rad/s})$$

سرعت زاویه‌ای لحظه‌ای : سرعت زاویه‌ای لحظه‌ای را، مانند آنچه در مورد تعریف سرعت لحظه‌ای در فصل ۱ دیدیم، چنین تعریف می‌کنیم :

$$\omega = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

و یا

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \qquad (۶_۲)$$

از این به بعد، سرعت زاویه‌ای لحظه‌ای را به اختصار **سرعت زاویه‌ای** می‌گوییم.

تمرین ۲ـ۴

مکان زاویه‌ای ذرّه‌ای که روی مسیر دایره‌ای حرکت می‌کند، با رابطهٔ $\theta = ۲t^۲ + ۶t$ بیان شده است. (t برحسب ثانیه و θ برحسب رادیان)

الف) سرعت زاویه‌ای متوسط ذرّه را بین لحظه‌های $t_۱ = ۱s$ و $t_۲ = ۲s$ و

ب) سرعت زاویه‌ای آن را در لحظهٔ $t_۳ = ۳s$ حساب کنید.

۲ـ ۵ ـ حرکت دایره‌ای یکنواخت

هرگاه اندازهٔ سرعت زاویه‌ای ذرّه‌ای که بر روی مسیر دایره‌ای در حرکت است ثابت بماند، می‌گوییم ذره، حرکت دایره‌ای یکنواخت دارد. در چنین حرکتی، سرعت زاویه‌ای متوسط در هر بازهٔ زمانی با سرعت زاویه‌ای لحظه‌ای ذره برابر است.

$$\bar{\omega} = \omega = \frac{\theta - \theta_۰}{t - ۰}$$

و یا

$$\theta = \omega t + \theta_۰ \qquad (۷_۲)$$

برای بررسی حرکت دایره‌ای یکنواخت، کمیت‌های زیر را تعریف می‌کنیم :

دوره : زمانی که طول می‌کشد تا ذرّه روی مسیر دایره‌ای یک دور کامل طی کند، دوره نامیده می‌شود. دوره را با T نمایش می‌دهند و یکای آن ثانیه است.

بسامد : تعداد دورهای ذرّه را در یک ثانیه بسامد (فرکانس) می‌گویند. بسامد را با f نمایش می‌دهند. یکای بسامد $\frac{۱}{s}$ یا هرتز (Hz) است.

روشن است که :

$$T = \frac{1}{f} \qquad (۲ــ ۸)$$

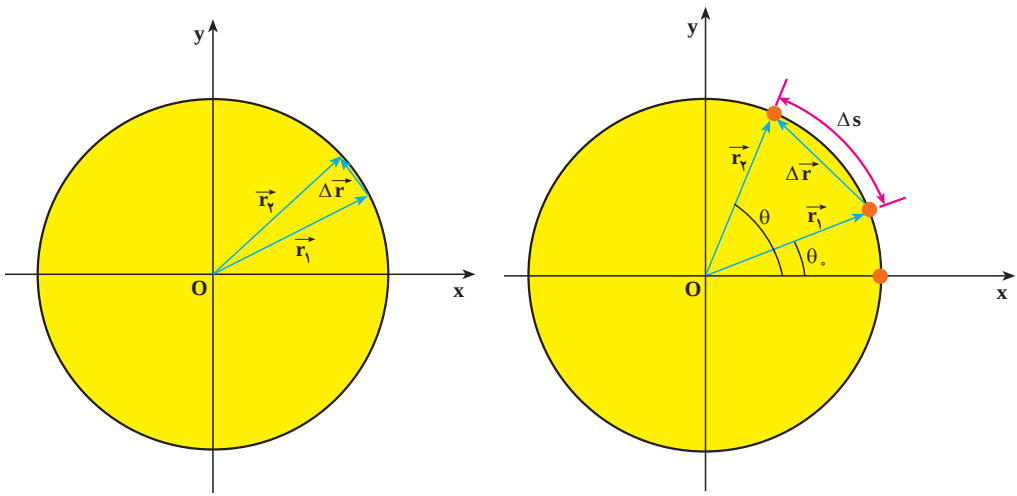
چون ذرّه در هر دور، 2π رادیان طی می‌کند، سرعت زاویه‌ای آن برابر است با :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \qquad (۲ــ۹)$$

تمرین ۲ـ ۵

سرعت زاویه‌ای گردش ماه به دور زمین را محاسبه کنید (دورهٔ گردش ماه به دور زمین را ۲۹ روز و حرکت آن را دایره‌ای یکنواخت فرض کنید).

سرعت خطی در حرکت دایره‌ای : در فصل قبل دیدید که موقعیت ذرّه را در صفحه می‌توان با بردار مکان مشخص کرد (شکل ۲ــ۱۳). اگر بردار مکان ذرّه در لحظهٔ t_1، $\vec{r}_1$ و در لحظهٔ t_2، $\vec{r}_2$ باشد، جابه‌جایی ذرّه در بازهٔ زمانی $\Delta t = t_2 - t_1$ برابر $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ خواهد بود. ذرّه در این بازهٔ زمانی کمان Δs را می‌پیماید. اگر بازهٔ زمانی Δt بسیار کوچک باشد، کمان Δs کوچک می‌شود و می‌توان طول کمان Δs را تقریباً با طول وتر مقابل آن، یعنی $|\Delta \vec{r}|$ برابر گرفت.



شکل ۲ــ۱۳

در فصل قبل دیدیم که سرعت متوسط متحرک را می‌توان از رابطهٔ ۱ــ۲۲ به‌دست آورد و بزرگی سرعت لحظه‌ای نیز با رابطهٔ زیر تعریف می‌شود :

$$|\vec{v}| = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t}$$

از آنجایی که در حالت حد، $|\vec{\Delta r}| \simeq \Delta s$ داریم :

$$|\vec{v}| = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \qquad (۱۰ــ۲)$$

در درس ریاضی خوانده‌اید که زاویهٔ $\Delta\theta$ برحسب رادیان برابر است با نسبت طول کمان مقابل به آن زاویه، به شعاع دایره.

یعنی :

$$\Delta\theta = \frac{\Delta s}{r}$$

و یا

$$\Delta s = r\Delta\theta \qquad (۱۱ــ۲)$$

بنابراین رابطهٔ ۲ــ۱۰ را می‌توان به‌صورت زیر نوشت :

$$v = r\frac{d\theta}{dt}$$

و یا

$$v = r\omega \qquad (۱۲ــ۲)$$

در فصل ۱ دیدیم که بردار سرعت جسم، همواره مماس بر مسیر حرکت است. v را سرعت خطی متحرک نیز می‌نامند.

تمرین ۲ـ ۶

طول عقربه‌های ساعت‌شمار، دقیقه‌شمار و ثانیه‌شمار یک ساعت دیواری به‌ترتیب ۸ cm، ۱۲cm و ۱۲cm است. سرعت خطی نوک هر یک از عقربه‌های این ساعت را محاسبه کنید.

مثال ۲ـ۶

در یک شهربازی، گردونه‌ای افراد را در یک سطح افقی و در مسیر دایره‌ای می‌گرداند (شکل ۲ــ۱۴). به‌طوری که هر فرد حرکت دایره‌ای یکنواختی دارد. اگر گردونه در هر ۱۰ ثانیه یک دور بزند و شعاع چرخش برای هر نفر ۵ متر باشد، سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی هر شخص را در این گردونه محاسبه کنید.

شکل ۲ــ۱۴

پاسخ

دورهٔ چرخش $T = ۱۰\,s$ است.

پس سرعت زاویه‌ای برابر است با :

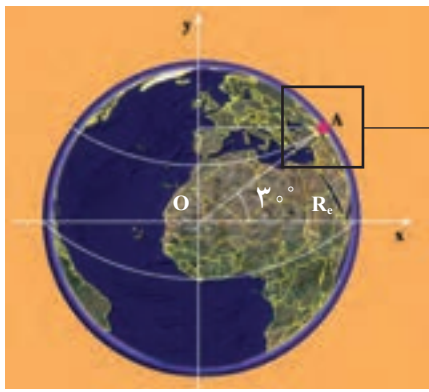
$$\omega = \frac{۲\pi}{T} = \frac{۲\pi}{۱۰} = \frac{\pi}{۵}\,rad/s$$

و سرعت خطی آن نیز برابر خواهد بود با :

$$v = r\omega = ۵ \times \frac{\pi}{۵} = ۳/۱۴\,m/s$$

مثال ۲ـ۷

شهر آبادان در مدار جغرافیایی ۳۰° شمالی قرار دارد. سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی شخصی را که در این شهر زندگی می‌کند حساب کنید. شعاع زمین را $R_e = ۶/۴ \times ۱۰^{۶}\,m$ بگیرید.



شکل ۲ــ۱۵

پاسخ

سرعت زاویه‌ای حرکت وضعی زمین، در تمام نقاط زمین یکسان است (چرا؟).

با توجه به این‌که دورهٔ چرخش زمین به دور خود، ۲۴ ساعت است، می‌توانیم سرعت زاویه‌ای هر نقطه از زمین را محاسبه کنیم.

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$T = ۲۴ \times ۶۰ \times ۶۰ = ۸۶۴۰۰ s$$

$$\omega = \frac{2\pi}{۸۶۴۰۰} = ۷/۲۷ \times ۱۰^{-۵} \ rad/s$$

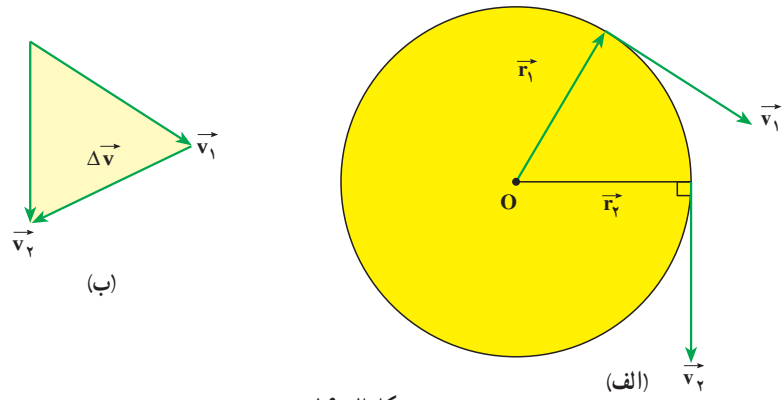
فاصلهٔ آبادان از محور چرخش زمین، با توجه به شکل ۲ــ۱۵ برابر است با :

$$r = ۶/۴ \times ۱۰^{۶} \times \frac{\sqrt{۳}}{۲} = ۵/۵۴ \times ۱۰^{۶} \ m$$

و سرعت خطی شخص در آبادان برابر است با :

$$v = r\omega = ۵/۵۴ \times ۱۰^{۶} \times ۷/۲۷ \times ۱۰^{-۵} = ۴۰۲/۷۶ m/s$$

شتاب در حرکت دایره‌ای یکنواخت : ذره‌ای را در نظر بگیرید که دارای حرکت دایره‌ای یکنواخت است (شکل ۲ــ۱۶ــ الف). در فصل قبل دیدیم که بردار سرعت در هر لحظه مماس بر مسیر است. اگر مکان ذرّه در لحظهٔ $t_۱$، $\vec{r}_۱$ و در لحظهٔ $t_۲$، $\vec{r}_۲$ باشد، بردارهای سرعت متحرّک در این نقاط به ترتیب بر $\vec{r}_۱$ و $\vec{r}_۲$ عمودند. بردار $\Delta \vec{v} = \vec{v}_۲ - \vec{v}_۱$ در شکل ۲ــ۱۶ــ ب رسم شده است.



شکل ۲ــ۱۶

ملاحظه می‌شود با این که بزرگی بردار سرعت ثابت است، به علت تغییر راستای بردار سرعت $\Delta \vec{v} \neq 0$ است. اندازهٔ شتاب متوسط حرکت در این حالت را می‌توان با استفاده از رابطهٔ $|\vec{\bar{a}}| = \frac{|\Delta \vec{v}|}{\Delta t}$ به‌دست آورد. می‌توان نشان داد، هنگامی که Δt به سمت صفر میل می‌کند، شتاب حرکت از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$a = \frac{v^2}{r} \qquad (۲ــ ۱۳ــ \text{الف})$$

و یا

$$a = r\omega^2 \qquad (۲ــ ۱۳ــ \text{ب})$$

راستای این شتاب در راستای شعاع دایره و سوی آن به طرف مرکز است،به این ترتیب، این شتاب را شتاب مرکزگرا گویند.

تمرین ۲ـ ۷

شتاب مرکزگرای ماه به دور زمین را محاسبه کنید.
فاصلهٔ ماه از زمین $۳/۸ \times ۱۰^۸ m$ و دورهٔ حرکت ماه را ۲۹ روز بگیرید.

مثال ۲ـ ۸

خودرویی در یک جاده به شعاع انحنای ۲۰۰ m با سرعت ثابت ۲۰ m/s در حرکت است. شتاب مرکزگرای این خودرو را حساب کنید.

پاسخ

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{۴۰۰}{۲۰۰} = ۲ m/s^2$$

۲ـ۶ ــ دینامیک حرکت دایره‌ای یکنواخت

در بخش ۲ــ۵ دیدیم که در حرکت دایره‌ای یکنواخت، شتاب جسم در راستای شعاع دایره و جهت آن به طرف مرکز است. بنابر قانون دوم نیوتون نیرو و شتاب هم جهت‌اند، درنتیجه در حرکت دایره‌ای

یکنواخت، برایند نیروهای وارد بر جسم در راستای شعاع و به سوی مرکز است. از این‌رو برایند نیروهای وارد بر جسم را که منجر به حرکت دایره‌ای می‌شوند **نیروی مرکزگرا** می‌نامند.

با توجه به رابطه‌های ۲ــ۱۳ قانون دوم نیوتون در حرکت دایره‌ای یکنواخت به‌صورت زیر درمی‌آید :

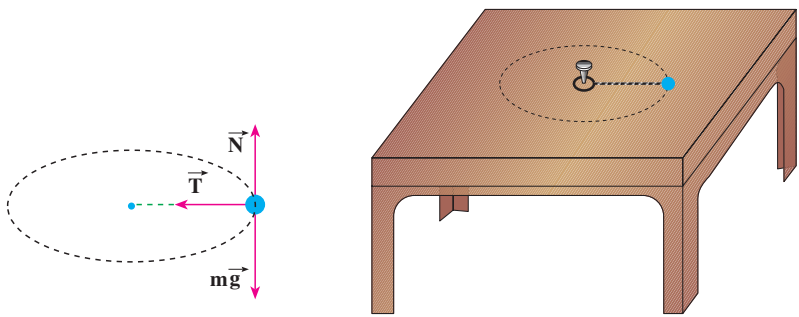
$$F = \frac{mv^2}{r} \qquad (۲ــ۱۴ــ الف)$$

$$F = mr\omega^2 \qquad (۲ــ۱۴ــ ب)$$

در این رابطه، F بزرگی برایند نیروهای وارد بر جسم در راستای شعاع دایره است.

مثال ۲ــ۹

مهره‌ای به جرم ۲۰g را به نخی می‌بندیم و به انتهای دیگر نخ، حلقهٔ کوچکی وصل می‌کنیم، سپس حلقه را مطابق شکل ۲ــ۱۷ــ الف با میخ کوتاهی در وسط یک میز ثابت می‌کنیم. نیروی اصطکاک مهره با میز ناچیز است.



(ب) (الف)

شکل ۲ــ۱۷

فاصلهٔ مهره از میخ ۲۵cm است، با یک ضربه که به مهره وارد می‌کنیم آن را روی مسیر دایره‌ای به حرکت درمی‌آوریم. نیروهای وارد بر مهره را با رسم شکل مشخص کنید. اگر مهره در هر ثانیه یک دور بزند، بزرگی نیروی کشش نخ را محاسبه کنید.

پاسخ

نیروهای وارد بر مهره در شکل ۲ــ ۱۷ــ ب نشان داده شده است.

در راستای قائم، نیروی وزن و نیروی عمودی تکیه‌گاه بر جسم اثر می‌کنند. برایند این دو نیرو صفر است :

$$N - mg = 0$$

$$\Rightarrow N = mg$$

تنها نیروی کشش نخ می‌ماند که در اینجا همان نیروی مرکزگرا، یعنی : $T = m\frac{v^2}{r}$ است. سرعت زاویه‌ای برابر است با :

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \ rad/s$$

و سرعت خطی نیز برابر است با :

$$v = r\omega = 0/25 \times 2\pi = \frac{\pi}{2} \simeq 1/57 \, m/s$$

و نیروی کشش نخ برابر است با :

$$T = m\frac{v^2}{r} = 200 \times 10^{-3} \times \frac{\pi^2}{4} \times \frac{1}{0/25} \simeq 0/2N$$

تمرین ۲ـ ۸

در هر یک از موارد زیر نیروی مرکزگرا را مشخص کنید.

۱ــ در حرکت لباس‌هایی که در ماشین‌لباس‌شویی می‌چرخند.

۲ــ در چرخش الکترون به‌دور هسته

۳ــ در گردش سیاره‌ها به دور خورشید

ابوریحان بیرونی

ابوریحان محمد بن احمد بیرونی، دانشمند برجستهٔ ایرانی، در نیمهٔ دوم قرن چهارم و اوایل قرن پنجم می‌زیست. وی در بیرون (حومهٔ) شهر کاث، پایتخت خوارزمشاهیان، به دنیا آمد. او تا سن بیست و پنج سالگی در زادگاه خود مشغول فراگیری علومی چون جغرافیا، ریاضیات، ستاره شناسی، پزشکی، فقه، کلام و ... بود. بیرونی اولین فعالیت‌های علمی خود را در حدود سال ۳۸۰ هجری در شهر کاث با رصد آسمان به کمک وسایل نه چندان دقیق آغاز کرد. در سال ۳۸۷ هجری بار دیگر در شهر کاث خسوفی را با هماهنگی انجام شده بین او و ابوالوفاءِ بوزجانی، از برجسته ترین منجمان آن دوره، رصد کرد. در واقع، ابوالوفاء نیز همین خسوف را در بغداد رصد کرده بود. با مقایسهٔ نتایج به دست آمده از این دو رصد، بیرونی اختلاف طول جغرافیایی بغداد و کاث را پیدا کرد.

با توجه به اطلاعات به دست آمده، تعداد آثار ابوریحان بیرونی شامل تألیف‌ها، ترجمه‌ها و آثار نیمه تمام او به ۱۸۰ عنوان می‌رسد که دست کم ۱۱۵ عنوان از آنها به ریاضیات و نجوم اختصاص دارد و از این تعداد تنها ۲۸ عنوان به دست ما رسیده است.

بیرونی در کتاب **«اِفراد المقال فی امر الظلال»**، یکی از نظریات مشهور ارسطو را با تکیه بر آزمایش رد می‌کند. نکتهٔ مهم و مورد توجه در آزمایش‌های بیرونی، شیوهٔ علمی او در انجام دادن آزمایش‌هاست. وی مانند یک محقق امروزی در آزمایش خود به نکاتی توجه می‌کند؛ از جمله هنگام مقایسهٔ خاصیتی ویژه از دو ماده می‌کوشد تا سایر شرایط برای آنها یکسان باشد و نیز به تکرار در آزمایش تأکید می‌کند تا مطمئن شود که نتایج حاصل از فرایند اتفاقی نیست.

دیدگاه بیرونی دربارهٔ چیستی کهکشان راه شیری که در کتاب التفهیم آمده از اهمیتی بسزا برخوردار است؛ زیرا در میان طبیعی‌دانان مسلمان کمتر کسی به آن پرداخته است و همگی از نظریات ارسطو در این زمینه پیروی می‌کرده‌اند. تنها بیرونی و ابن هیثم نظریاتی نو دراین زمینه مطرح کرده‌اند. بیرونی چنین می‌گوید: «مجرّه را پارسیان راه کاهکشان خوانند و هندوان راه بهشت و آن جمله شدن ستارگان است از جنس ستارگان ابری و ...»

بیرونی در بخشی از کتاب افراد المقال فی امر الظلال سخن احمد بن طیب سرخسی در کتاب «ارکان الفلسفه» دربارهٔ سیاهی هوا بر فراز نقاط مرتفع را نشانهٔ مبالغهٔ وی در پیروی از نظریه ای که از کتاب **«الحس و المحسوس»** ارسطو برمی‌آید، می‌داند. ابوریحان بر آن است که در این باره باید فقط با استناد به آزمایش و تجربه سخن گفت و می‌گوید که هیچ‌گاه از تغییر رنگ هوا در سرما یا نبود گرما سخنی نرفته است و قله کوه دماوند با بلندی بسیارش دیده می‌شود و هیچ نشانه‌ای از سیاهی در آن نیست.

۱ــ براساس قانون سوم نیوتون، به پرسش‌های زیر پاسخ دهید :

الف) نیروهای وارد بر یک شخص، هنگامی که جسمی را هُل می‌دهد و همچنین نیروهای وارد بر جسم چگونه است؟

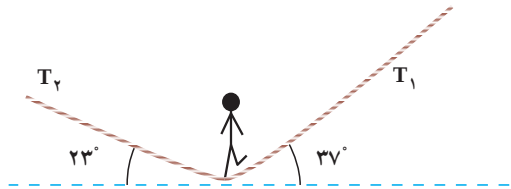
ب) نقش نیروهای مختلف در هنگام راه رفتن ما بر روی زمین چگونه است؟

۲ــ به جسمی به جرم $۱۰۰\,kg$ نیروی ثابت F در راستای قائم به‌طرف بالا وارد می‌شود. جسم از حال سکون با شتاب $۵\,m/s^۲$ به‌طرف بالا حرکت می‌کند و پس از $۲۰\,s$ نیروی F حذف می‌شود.

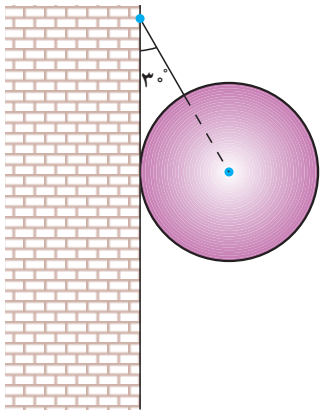
الف) مقدار نیروی F را تعیین کنید.

ب) ارتفاعی که جسم بالا می‌رود. $g = ۱۰\,m/s^۲$ (از مقاومت هوا چشم‌پوشی کنید.)

۳ــ یک بازیگر سیرک به وزن $۶۰۰\,N$ روی طنابی مطابق شکل ۲ــ۱۸ درحال تعادل است. نیروهای کشش طناب را محاسبه کنید.



شکل ۲ــ۱۸



شکل ۲ــ۱۹

۴ــ کره‌ای به جرم $۲۰\,kg$ را مطابق شکل ۲ــ۱۹، به وسیلهٔ کابلی به دیوار قائم و بدون اصطکاک آویزان می‌کنیم. نیروی کشش کابل و واکنش دیوار را محاسبه کنید.

۵ــ دو جسم به جرم‌های $m_1 = 1kg$ و $m_2 = 2kg$ مطابق شکل ۲ــ۲۰ روی سطح افقی صافی قرار دارند. نیروی افقی $\vec{F}$ باعث می‌شود که دو جسم با شتاب $3 m/s^2$ به حرکت درآیند. اندازهٔ نیروی F و نیروی تماسی‌ای که دو جسم بر یکدیگر وارد می‌کنند را در هر یک از دو شکل «الف» و «ب» محاسبه کنید.

(ب) شکل ۲ــ۲۰ (الف)

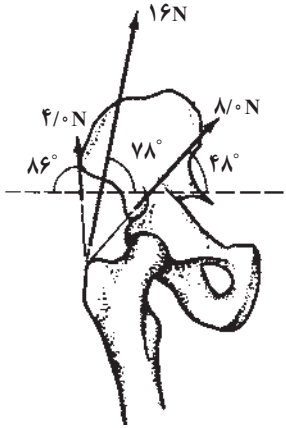
۶ ــ کتابی را مانند شکل ۲ــ۲۱ به دیوار فشرده و ثابت نگه داشته‌ایم.

الف) آیا نیروی اصطکاک با نیروی وزن برابر است؟ چرا؟

ب) اگر کتاب را بیشتر به دیوار بفشاریم آیا نیروی اصطکاک تغییر می‌کند؟ با این کار چه نیرویی افزایش می‌یابد؟

شکل ۲ــ۲۱

۷ــ سه ماهیچه، استخوان ران را به لگن متصل می‌کنند. در شکل ۲ــ۲۲ مقدار و جهت نیروهایی که این ماهیچه‌ها به استخوان ران وارد می‌کنند، نشان داده شده است. برایند نیروهای وارد بر استخوان ران از طرف این ماهیچه‌ها را به‌دست آورید.



شکل ۲ــ۲۲

۸ــ پره‌های یک بالگرد (هلیکوپتر) در هر دقیقه ۹۰۰ دور می‌گردد. کمیّت‌های زیر را برای پره‌ها محاسبه کنید.

الف) دوره، بسامد و سرعت زاویه‌ای

ب) سرعت خطی و شتاب مرکزگرای نقطه‌ای که فاصلهٔ آن از محور دوران ۳m است.

۹ــ ماهواره‌ای روی مدار دایره‌ای به دور زمین می‌گردد. اگر جرم ماهواره $m = ۲۵۰kg$، جرم زمین $M_e = ۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴} kg$، ثابت جهانی گرانش $G = ۶/۶۷ \times ۱۰^{-۱۱} N.m^۲/kg$، فاصلهٔ ماهواره از سطح زمین ۲۶۰۰km و شعاع زمین ۶۴۰۰km باشد، کمیّت‌های زیر را محاسبه کنید :

الف) نیروی گرانش بین ماهواره و زمین

ب) سرعت ماهواره

پ) دورهٔ گردش ماهواره

۱۰ــ یک ماهواره در چه فاصله‌ای از مرکز زمین باید قرار گیرد، تا همواره در یک نقطه در بالای خط استوا باشد؟

۱۱ــ جرم ماهوارهٔ امید (شکل ۲ــ۲۳) تقریباً ۲۷ کیلوگرم و فاصلهٔ آن از سطح زمین حدوداً ۲۵۰ کیلومتر است. با توجه به داده‌های مسئلهٔ ۹، دوره، سرعت و نیروی گرانشی بین این ماهواره و زمین را به‌دست آورید.

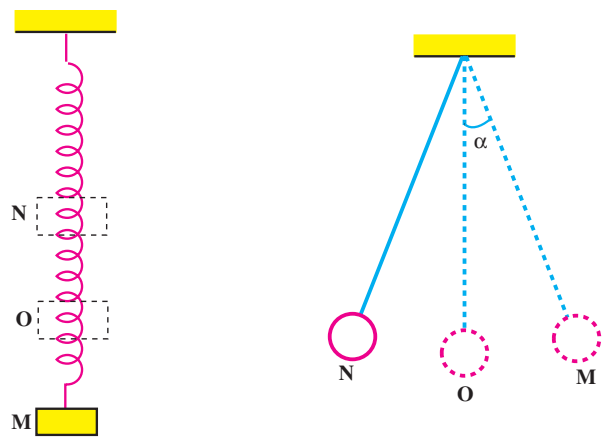
شکل ۲ــ۲۳

حرکت نوسانی

فصل ۳

حرکت نوسانی

نگاهی به فصل : گردش زمین به دور خورشید، گردش ماه به دور زمین، ضربان قلب انسان، ارتعاش تارهای کمانچه، تار و یا سه‌تار، بالا و پایین رفتن تاب بازی، پیدایش فصل‌های سال، طلوع و غروب خورشید، یا حرکت یک آونگ ساده (شکل ۳ــ۱ــ الف)، حرکت وزنه‌ای که به یک فنر متصل است (شکل ۳ــ۱ــ ب) و مثال‌های بسیار دیگری مانند اینها، حرکت‌های دوره‌ای هستند که با گذشت زمان بارها تکرار می‌شوند. در حرکت‌های دوره‌ای، متحرک پس از طی زمان معینی به وضعیت اولیه برمی‌گردد و حرکت خود را از نو آغاز می‌کند. در این فصل پس از معرفی پدیده‌های دوره‌ای به توصیف حرکت هماهنگ ساده می‌پردازیم؛ زیرا شناخت و بررسی این حرکت، پایه و اساس مناسبی برای درک امواج و انتشار آنها فراهم می‌کند.



شکل ۳ــ۱

۳ــ۱ــ حرکت هماهنگ ساده

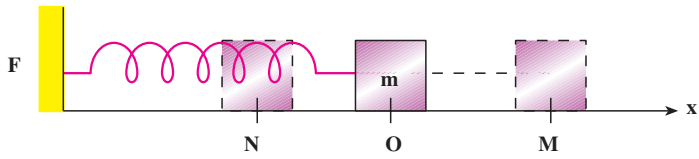
یک حرکت نوسانی را **هماهنگ ساده** می‌نامیم؛ وقتی مسیر رفت و برگشت متحرک روی یک پاره‌خط حول نقطه‌ای واقع در وسط آن باشد. برای مثال، حرکت آونگ (شکل ۳ ــ ۱ــ الف)، وقتی زاویهٔ α خیلی کوچک باشد، به گونه‌ای که بتوان تانژانت و سینوس آن را برابر گرفت و همچنین بالا و

پایین رفتن وزنهٔ آویخته به فنر (شکل ۳ــ۱ــ ب). در این دو حرکت، متحرک، دربازه‌های زمانی یکسان، از ابتدای پاره خط، یعنی از نقطهٔ M به نقطهٔ N می‌رود و برمی‌گردد و به این ترتیب، حول نقطهٔ O واقع در وسط پاره خط نوسان می‌کند. از این پس دستگاهی را که دارای حرکت هماهنگ ساده است نوسانگر هماهنگ ساده می‌نامیم. نوسانگر وزنه‌ــفنر در شکل ۳ــ۱ــ ب الگوی مناسبی برای بررسی حرکت نوسانی ساده است. ابتدا برخی مفهوم‌ها را در این حرکت معرفی می‌کنیم.

دوره و بسامد : در حرکت هماهنگ ساده بازهٔ زمانی بین دو وضعیت یکسان و متوالی را **دوره** می‌نامیم. به عبارت دیگر دوره، زمان یک نوسان (زمان یک رفت و برگشت به وضع قبلی) است و با T نشان داده می‌شود. همچنین تعداد دوره‌ها یا تعداد نوسان‌ها را در یک ثانیه **بسامد** می‌نامیم و آن را با f نشان می‌دهیم. یکای بسامد در SI، s^{-1} است که هرتز (Hz) نامیده می‌شود. با توجه به تعریف دوره، معلوم می‌شود که بسامد وارون دوره است :

$$f = \frac{1}{T} \qquad (۳ــ۱)$$

دامنهٔ نوسان : جسمی به جرم m را در نظر بگیرید که به سر آزاد یک فنر متصل است و می‌تواند در راستای محور x، روی یک سطح افقی که اصطکاک آن ناچیز است، جابه‌جا شود (شکل ۳ ــ۲). در حالتی که فنر طول عادی خود را دارد برایند نیروهای وارد به جسم صفر و در نتیجه جسم در حال تعادل است.



شکل ۳ــ۲

حال اگر مبدأ محور مختصات، یعنی نقطهٔ O را منطبق بر مکان جسم در حالت تعادل اختیار نماییم و سپس جسم را تا نقطهٔ M به سمت راست بکشیم و سپس رها کنیم، جسم حول وضع تعادلش (نقطهٔ O) با حرکت هماهنگ ساده شروع به نوسان می‌کند. در ضمن نوسان جسم، فاصلهٔ آن از مبدأ تغییر می‌کند، امّا هیچ‌گاه فاصلهٔ آن از مبدأ بیش از OM یا ON نمی‌شود. این بیشترین فاصلهٔ نوسانگر از مبدأ را **دامنه** می‌نامیم و معمولاً آن‌را با A نشان می‌دهیم.

نیروی بازگرداننده : در شکل ۳ــ۲، جهت نیروی فنر همواره به گونه‌ای است که می‌خواهد جسم را به حالت تعادل (نقطهٔ O) برگرداند، این نیرو، **نیروی بازگرداننده** نامیده می‌شود. نیروی بازگردانندهٔ فنر با تغییر طول فنر، متناسب است و از رابطهٔ زیر که به قانون هوک معروف است، به‌دست می‌آید :

$$F = -kx \qquad (۲ــ۳)$$

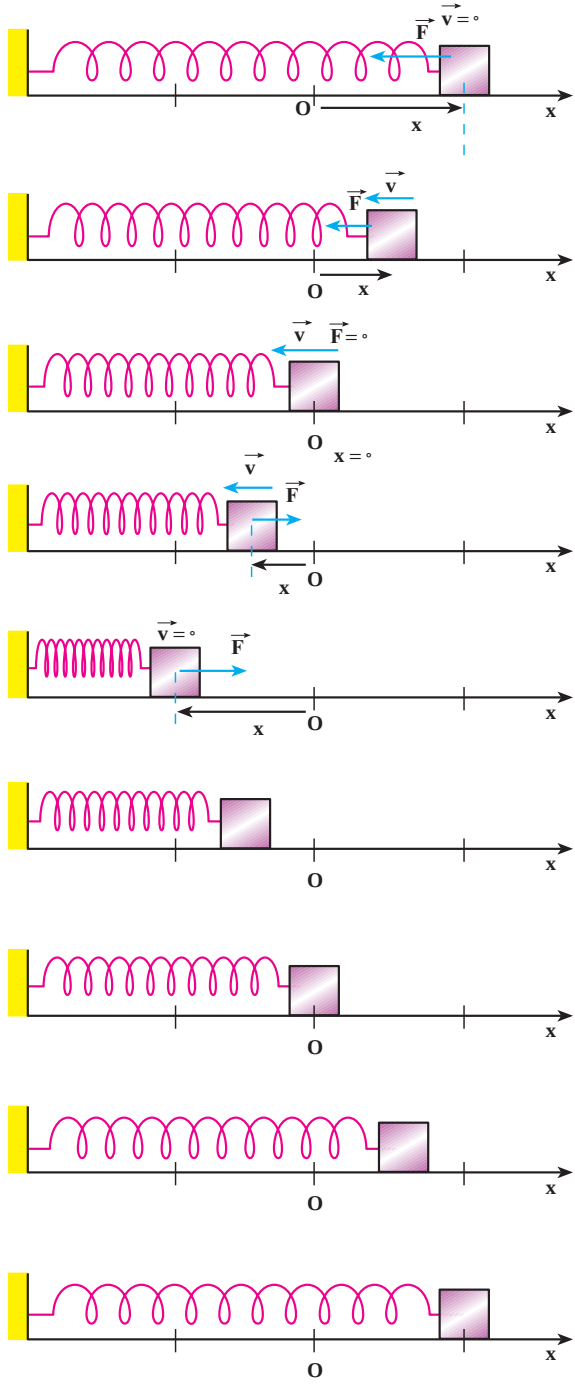
در این رابطه، x تغییر طول فنر، F نیروی بازگردانندهٔ فنر و k ثابت تناسب است که به ویژگی‌های فنر بستگی دارد و آن را ثابت نیروی فنر می‌نامیم. یکای k در SI نیوتون بر متر (N/m) است. علامت منفی در رابطهٔ ۳ــ۲ نشان می‌دهد که جهت نیروی بازگردانندهٔ فنر همواره خلاف جهت بردار مکان جسم است. هر دستگاهی که نیروی بازگردانندهٔ آن از قانون هوک پیروی کند، حرکت هماهنگ ساده خواهد داشت.

حال اثر نیروی بازگرداننده را در نوسانگر وزنه ــ فنر، در یک دوره، بررسی می‌کنیم.

همان‌طور که در شکل ۳ــ۳ــ الف تا پ دیده می‌شود، اگر جسم را پس از خارج کردن از وضع تعادل رها کنیم، تحت اثر نیروی بازگرداننده به‌طرف وضع تعادل خود (نقطهٔ O) برمی‌گردد و پس از رسیدن به نقطهٔ O، به سبب داشتن انرژی جنبشی، به حرکتش به سمت چپ ادامه می‌دهد (شکل پ). از این لحظه به بعد، مکان و سرعت جسم منفی و نیروی بازگرداننده در جهت محور x و مثبت است. بنا به قانون دوم نیوتون، چون شتاب با نیروی برایند هم جهت است در این مرحله از حرکت شتاب نیز مثبت است. اما چون سرعت آن منفی است، حرکت جسم کند شونده است (شکل ت)؛ یعنی از سرعت آن کاسته می‌شود و در یک لحظه به صفر می‌رسد. در این لحظه فنر بیشترین فشردگی یا تغییر طول را دارد و نیروی بازگرداننده بیشینه است (شکل ث).

فعالیت ۳ـ۱

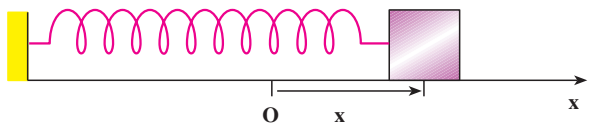
دیدیم در لحظه‌ای که فنر بیشترین فشردگی را پیدا می‌کند سرعت نوسانگر به صفر می‌رسد. اکنون با توجه به شکل‌های ۳ــ۳ــ ج تا خ نیروی وارد بر نوسانگر و همچنین مکان، سرعت و شتاب نوسانگر را پس از لحظهٔ مذکور بررسی کنید.


(الف)
$\vec{F}$
$\vec{v}=0$
O
x
x
(ب)
$\vec{F}$
$\vec{v}$
O
x
x
(پ)
$\vec{v}$
$\vec{F}=0$
O
x
x = 0
(ت)
$\vec{v}$
$\vec{F}$
x
O
x
(ث)
$\vec{v}=0$
$\vec{F}$
x
O
x
(ج)
O
x
(چ)
O
x
(ح)
O
x
(خ)
O
x

شکل ۳ــ۳

۳ــ۲ــ معادلهٔ حرکت هماهنگ ساده

یک نوسانگر را در نظر بگیرید که مطابق شکل ۳ــ۴ در فاصلهٔ x از وضع تعادل قرار دارد.



شکل ۳ــ۴

بنا به رابطهٔ ۳ــ۲ نیروی وارد بر وزنه در این لحظه $F = -kx$ است؛ اگر جرم وزنه m باشد بنابه قانون دوم نیوتون داریم :

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

$$a = -\frac{k}{m}x \qquad (۳ــ۳)$$

بنا به آنچه در فصل ۱ دیدیم، شتاب مشتق دوم مکان نسبت به زمان است؛ یعنی :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x$$

بنابراین $x = f(t)$ باید به صورتی باشد که مشتق دوم آن نسبت به زمان، با علامت منفی، با x متناسب باشد. با توجه به این که تابع سینوسی که در درس ریاضی خوانده‌اید، همین ویژگی را دارد، معادلهٔ حرکت هماهنگ ساده باید به صورت زیر باشد* :

$$x = A\sin\omega t \qquad (۳ــ۴)$$

اگر از رابطهٔ ۳ــ۴ دو بار نسبت به زمان مشتق بگیریم خواهیم داشت :

$$\frac{dx}{dt} = A\omega\cos\omega t$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega^2\sin\omega t$$

با توجه به رابطهٔ ۳ــ۴ می‌توان نوشت :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x$$

* در برنامهٔ درسی این کتاب همواره فرض می‌شود که نوسانگر در مبدأ زمان، در مبدأ مکان بوده و در جهت مثبت محور x است.

از مقایسهٔ رابطهٔ اخیر با رابطهٔ ۳ــ۳ نتیجهٔ زیر حاصل می‌شود.

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (۵ــ۳)$$

ω را **بسامد زاویه‌ای** می‌نامیم. یکای بسامد زاویه‌ای رادیان بر ثانیه است. در رابطهٔ ۳ــ۴، x مکان متحرک در لحظهٔ t و A دامنه نوسان است (چرا؟) همچنین $\varphi = \omega t$ فاز حرکت در لحظهٔ t می‌باشد؛ اگر در لحظهٔ t_1 فاز حرکت :

$$\varphi_1 = \omega t_1$$

و در لحظهٔ t_2 فاز حرکت

$$\varphi_2 = \omega t_2$$

باشد، تغییر فاز بین دو لحظهٔ t_1 و t_2 برابر است با :

$$\Delta\varphi = \omega t_2 - \omega t_1 = \omega(t_2 - t_1)$$

یا

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t \qquad (۶ــ۳)$$

در رابطهٔ ۳ــ۶ اگر $\Delta t = 1s$ باشد، $\Delta\varphi = \omega$ می‌شود؛ یعنی، بسامد زاویه‌ای (ω) تغییر فاز در هر ثانیه است.

رابطهٔ بسامد زاویه‌ای و دورهٔ تناوب : چون دورهٔ تناوب تابع سینوسی، 2π است باید در هر دوره (یعنی در زمان T) فاز به اندازهٔ 2π تغییر کند. بنابراین، با توجه به رابطهٔ ۳ــ۶ می‌توان چنین نوشت :

$$\Delta\varphi = \omega T = 2\pi$$

و از آنجا

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \qquad (۷ــ۳)$$

اکنون با توجه به رابطه‌های ۳ــ۵ و ۳ــ۷ رابطه‌های زیر به‌دست می‌آید :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad (۸ــ۳)$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (۹ــ۳)$$

رابطهٔ ۳ ــ ۸ نشان می‌دهد که دوره به ویژگی‌های فیزیکی نوسانگر بستگی دارد؛ چنان که اگر وزنه را تغییر دهیم (m تغییر کند) یا فنر را عوض کنیم (k تغییر کند) دوره و در نتیجه بسامد نوسان‌های دستگاه،

تغییر می‌کند. از طرف دیگر دوره و بسامد به دامنه بستگی ندارد؛ به همین دلیل گفته می‌شود که بسامد یک نوسانگر از ویژگی‌های ساختاری آن نوسانگر است و بسامد طبیعی آن نامیده می‌شود.

مثال ۳ـ۱

معادلهٔ حرکت نوسانگری در SI به صورت زیر است.

$x = ۰/۰۵ \sin ۶۰\pi t$

الف) دامنه، دوره و بسامد این حرکت چه مقدار است؟

ب) مکان نوسانگر را در لحظهٔ صفر و در لحظهٔ $\frac{۱}{۳۶۰}$ ثانیه به‌دست آورید.

پاسخ

الف) باتوجه به معادلهٔ ۳ـ۴ و رابطهٔ ۳ـ۷ نتایج زیر حاصل می‌شود :

دامنه : $A = ۰/۰۵m$

دوره : $\omega = \frac{۲\pi}{T} = ۶۰\pi \Rightarrow T = \frac{۱}{۳۰}s$

بسامد : $f = \frac{۱}{T} = ۳۰Hz$

ب) $x_{۰} = ۰/۰۵ \sin ۶۰\pi \times ۰ = ۰/۰۵ \times ۰ = ۰$

$x = ۰/۰۵ \sin ۶۰\pi \times \frac{۱}{۳۶۰} \Rightarrow x = ۰/۰۵ \sin \frac{\pi}{۶} = ۰/۰۲۵m$

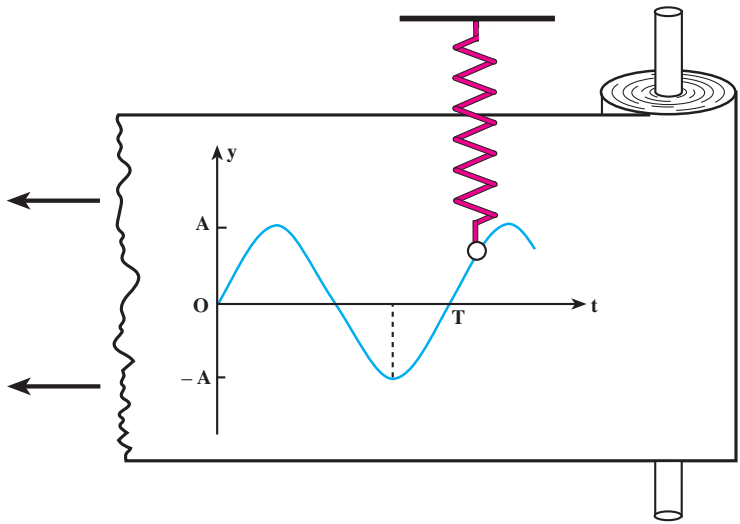
مثال ۳ـ۲

دامنهٔ نوسان نوسانگر هماهنگ ساده‌ای ۲cm و بسامد آن ۲۰Hz است. معادلهٔ حرکت آن را بنویسید.

پاسخ $A = ۰/۰۲m \ , \ f = ۲۰Hz \ , \ \omega = ۲\pi f \Rightarrow \omega = ۴۰\pi \ rad/s,$

$x = A \sin \omega t \Rightarrow x = ۰/۰۲ \sin ۴۰\pi t$

رسم نمودار یک نوسانگر هماهنگ ساده : یکی از روش‌های نمایش نمودار مکان ــ زمان حرکت نوسانگر هماهنگ ساده در شکل ۳ــ۵ نشان داده شده است.



شکل ۳ــ۵

در این روش، نوار کاغذی روی استوانه‌ای که در امتداد قائم قرار دارد پیچیده شده است. استوانه می‌تواند به‌طور یکنواخت حول محورش بچرخد. نوسانگر وزنه ــ فنر در امتداد قائم طوری نصب شده است که وزنهٔ متصل به آن به‌وسیلهٔ نوک یک مداد با نوار کاغذی در تماس است. اگر نوسانگر ساکن باشد و نوار کاغذی به سمت چپ کشیده شود نوک مداد یک خط افقی (محور زمان) روی نوار ثبت می‌کند. اگر نوار ساکن باشد و نوسانگر را به نوسان درآوریم، نوک مداد خطی در امتداد قائم رسم می‌کند، که نشان‌دهندهٔ جابه‌جایی نوسانگر است. حال اگر نوار کاغذی را با سرعت ثابت بکشیم و در همان حال نوسانگر را به نوسان واداریم نمودار حرکت هماهنگ ساده که یک نمودار سینوسی است رسم می‌شود، محور افقی زمان حرکت و محور قائم مکان متحرک را در هر لحظه نشان می‌دهد.

شما در درس ریاضی با چگونگی رسم نمودار تابع سینوسی آشنا شده‌اید. به همان ترتیب هم می‌توان نمودار حرکت هماهنگ ساده را به کمک نقطه‌یابی رسم کرد. برای این کار نقطه‌های بیشینه، کمینه و محل برخورد نمودار را با محور زمان معلوم نموده و با مشخص کردن آنها در صفحهٔ مختصات $x - t$ نمودار را رسم می‌کنیم. به مثال‌هایی در این باره توجه کنید :

مثال ۳ـ۳

دوره و دامنهٔ نوسانگر هماهنگ ساده‌ای به ترتیب ۰/۲s و ۶cm است. معادلهٔ حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان ــ زمان آن را رسم کنید.

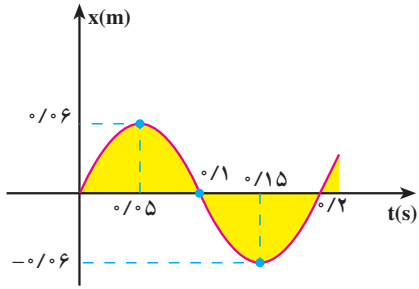
پاسخ

$T = ۰/۲s \ , \ A = ۰/۰۶m \ , \ \omega = ۱۰\pi rad/s$

معادلهٔ حرکت : $x = A\sin\omega t \Rightarrow x = ۰/۰۶\sin ۱۰\pi t$

برای رسم نمودار تغییرات x برحسب t به‌کمک نقطه‌یابی به ترتیب زیر، عمل می‌کنیم :

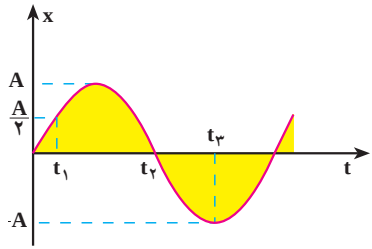
t(s)	x(m)
۰	۰
$\frac{T}{۴} = ۰/۰۵$	$۰/۰۶ = +A$
$\frac{T}{۲} = ۰/۱$	۰
$\frac{۳T}{۴} = ۰/۱۵$	$-۰/۰۶ = -A$
$T = ۰/۲$	۰



شکل ۳ــ۶

مثال ۳ـ۴

نمودار شکل ۳ــ۷ مربوط به حرکت هماهنگ ساده‌ای است که دورهٔ آن ۰/۲ ثانیه است. زمان‌های $t_۱$ و $t_۲$ و $t_۳$ را به‌دست آورید.



شکل ۳ــ ۷

پاسخ

$$\omega = \frac{۲\pi}{T} = ۱۰\pi \text{rad/s} \Rightarrow x = A\sin ۱۰\pi t$$

با توجه به شکل ۳ـ۷ در لحظهٔ $t_۱$ مکان برابر $A/۲$ است؛ بنابراین :

$$+\frac{A}{۲} = A\sin ۱۰\pi t_۱ \Rightarrow \sin ۱۰\pi t_۱ = \frac{۱}{۲}$$

$$۱۰\pi t_۱ = \frac{\pi}{۶} \Rightarrow t_۱ = \frac{۱}{۶۰}\text{s}$$

در لحظهٔ $t_۲$ مکان صفر است؛ بنابراین :

$$۰ = A\sin ۱۰\pi t_۲$$

$$\Rightarrow ۱۰\pi t_۲ = ۰ \quad \text{یا} \quad ۱۰\pi t_۲ = \pi$$

از تساوی $۱۰\pi t_۲ = ۰$ زمان $t_۲$، صفر به دست می‌آید، در حالی که در شکل $t_۲$ مثبت است؛ بنابراین :

$$۱۰\pi t_۲ = \pi \Rightarrow t_۲ = \frac{۱}{۱۰}\text{s}$$

در لحظهٔ $t_۳$ مکان $-A$ است؛ بنابراین :

$$-A = A\sin ۱۰\pi t_۳ \Rightarrow \sin ۱۰\pi t_۳ = -۱$$

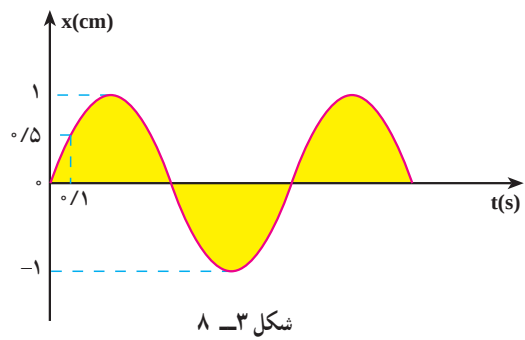
$$۱۰\pi t_۳ = \frac{۳\pi}{۲} \Rightarrow t_۳ = \frac{۳}{۲۰}\text{s}$$

تمرین ۳ـ۱

نمودار مکان ــ زمان نوسانگری در شکل ۳ ــ ۸ رسم شده است. مطلوب است :

الف) دورهٔ حرکت

ب) مکان نوسانگر در لحظهٔ $t = ۰/۵\text{s}$.



شکل ۳ــ ۸

۳ـ۳ـ معادله‌های سرعت و شتاب در حرکت هماهنگ ساده

الف) معادلهٔ سرعت : با توجه به این که سرعت، مشتق مکان نسبت به زمان است با مشتق‌گیری از رابطهٔ ۳ـ۴ خواهیم داشت :

$$v = \frac{dx}{dt} \Rightarrow v = A\omega\cos\omega t \qquad (۳ـ۱۰)$$

معادلهٔ ۳ـ۱۰ نشان می‌دهد که سرعت به ازای $\cos\omega t = \pm ۱$ بیشینه می‌شود؛ پس داریم :

$$v_{max} = A\omega \qquad (۳ـ۱۱)$$

در لحظه‌ای که $\cos\omega t = \pm ۱$ است، $\sin\omega t = ۰$ و در نتیجه $x = ۰$؛ یعنی، سرعت بیشینه مربوط به لحظه‌ای است که نوسانگر درحال گذر از وضع تعادل است.

تمرین ۳ـ۲

الف) به کمک رابطه‌های ۳ـ۴ و ۳ـ۱۰ نشان دهید که $v = \pm\omega\sqrt{A^۲ - x^۲}$ است.

ب) به کمک رابطهٔ اخیر معلوم کنید که در چه مکانی سرعت نوسانگر صفر و یا بیشینه است؟

ب)معادلهٔ شتاب : می‌دانیم که شتاب مشتق سرعت نسبت به زمان، یا مشتق دوم مکان نسبت به زمان است؛ در نتیجه با استفاده از رابطهٔ ۳ـ۴ یا ۳ـ۱۰ داریم :

$$a = -A\omega^۲\sin\omega t \qquad (۳ـ۱۲)$$

معادلهٔ ۳ـ۱۲ نشان می‌دهد که در حرکت هماهنگ ساده، شتاب نیز به‌طور دوره‌ای تغییر می‌کند و بیشینهٔ آن از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$a_{max} = A\omega^۲ \qquad (۳ـ۱۳)$$

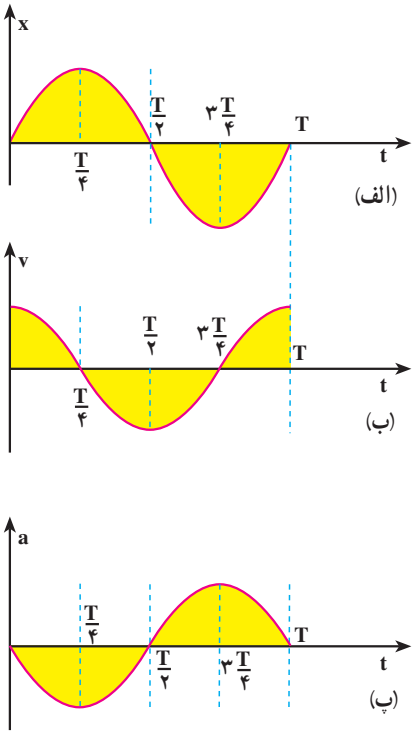
با استفاده از رابطهٔ ۳ـ۴ می‌توان رابطهٔ ۳ـ۱۲ را به‌صورت زیر نوشت :

$$a = -\omega^۲x \qquad (۳ـ۱۴)$$

که رابطهٔ شتاب را با مکان نوسانگر به‌دست می‌دهد. این رابطه همچنین نشان می‌دهد که بردار شتاب در خلاف جهت بردار مکان است.

در شکل‌های ۳ــ۹ــ الف ــ ب و پ، به‌ترتیب، نمودارهای مکان ــ زمان و سرعت ــ زمان و شتاب ــ زمان برای حرکت هماهنگ ساده‌ای که معادلهٔ آن به‌صورت $x = A\sin\omega t$ است نشان داده شده است.

همان‌طور که در این نمودارها دیده می‌شود در لحظهٔ $t = ۰$، $x = ۰$ است. در این لحظه سرعت بیشینه و مثبت و شتاب صفر است. در لحظهٔ $\frac{T}{۴}$، x بیشینه و مثبت، سرعت صفر و شتاب بیشینه و منفی است. در لحظهٔ $\frac{T}{۲}$، $x = ۰$، سرعت بیشینه و منفی و شتاب صفر است. در لحظهٔ $\frac{۳T}{۴}$، x بیشینه و منفی، سرعت صفر و شتاب بیشینه و مثبت است. در لحظهٔ T، x صفر، سرعت بیشینه و مثبت و شتاب صفر است.



شکل ۳ــ۹

مثال ۳ــ۵

دامنهٔ یک نوسانگر وزنه ــ فنر، ۵cm است. اگر جرم وزنه ۲۰g و ثابت فنر ۲N/m باشد :

الف) بیشینهٔ سرعت و شتاب در SI چه اندازه است؟

ب) در لحظه‌ای که مکان نوسانگر ۴cm+ است، سرعت و شتاب آن را به‌دست آورید.

پاسخ

الف)

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{۲}{۰/۰۲}} = ۱۰\,rad/s$$

$$v_{max} = A\omega = ۰/۰۵ \times ۱۰ = ۰/۵\,m/s$$

$$a_{max} = A\omega^2 = ۰/۰۵ \times ۱۰۰ = ۵\ m/s^2$$

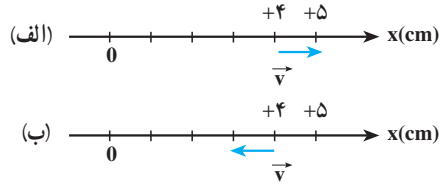
ب) در تمرین ۳ــ۱ دیدیم که $v = \pm\omega\sqrt{A^2 - x^2}$ ، بنابراین

$$v = \pm ۱۰\sqrt{(۰/۰۵)^2 - (+۰/۰۴)^2} = \pm ۰/۳\ m/s$$

علامت (±) نشان‌دهندهٔ این است که در مکان $x = +۴cm$ ممکن است سرعت در جهت محور x یا در خلاف جهت محور x باشد؛ یعنی، در لحظه‌ای که $x = +۴cm$ است؛ ممکن است متحرک در حال دور شدن از مبدأ باشد که در این صورت $v = +۰/۳\ m/s$ است و یا درحال نزدیک شدن به مبدأ باشد که در این صورت $v = -۰/۳\ m/s$. این وضعیت به‌ترتیب، در شکل‌های ۳ــ۱۰ الف و ۳ــ۱۰ ب نشان داده شده است.

$$a = -\omega^2 x = -۱۰۰ \times +۰/۰۴ = -۴\ m/s^2$$

پس معلوم می‌شود در مکان $x = +۴cm$ شتاب منفی و در خلاف جهت محور x است.



شکل ۳ــ۱۰

۳ــ۴ــ انرژی مکانیکی نوسانگر (دستگاه جرم ــ فنر)

در فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم، هنگامی که فنری فشرده یا کشیده می‌شود در آن انرژی پتانسیل کشسانی ذخیره می‌شود؛ می‌توان نشان داد مقدار این انرژی از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$U_e = \frac{۱}{۲}kx^2$$

با جای‌گذاری x از معادلهٔ ۳ــ۴ خواهیم داشت :

$$U_e = \frac{۱}{۲}kA^2 \sin^2 \omega t \qquad (۱۵ــ۳)$$

با استفاده از رابطهٔ ۳ــ۵ می‌توان نوشت :

$$U_e = \frac{۱}{۲}m\omega^2 A^2 \sin^2 \omega t \qquad (۱۶ــ۳)$$

از طرفی با توجه به رابطهٔ ۳ــ۱۰ انرژی جنبشی این نوسانگر از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$K = \frac{۱}{۲}mv^۲ = \frac{۱}{۲}m\omega^۲A^۲\cos^۲\omega t \qquad (۱۷_۳)$$

بنابراین، انرژی مکانیکی، یعنی مجموع انرژی پتانسیل و جنبشی این نوسانگر به‌ترتیب زیر به‌دست می‌آید :

$$E = U_e + K = \frac{۱}{۲}m\omega^۲A^۲\sin^۲\omega t + \frac{۱}{۲}m\omega^۲A^۲\cos^۲\omega t$$

$$E = \frac{۱}{۲}m\omega^۲A^۲\left[\sin^۲\omega t + \cos^۲\omega t\right]$$

$$E = \frac{۱}{۲}m\omega^۲A^۲ \qquad (۱۸_۳)$$

از رابطه‌های ۳ــ۱۵ و ۳ــ۱۷ می‌توان دریافت که انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی نوسانگر وزنه ــ فنر با زمان تغییر می‌کنند؛ یعنی، در لحظه‌ای که نوسانگر در فاصلهٔ x از مبدأ قرار دارد، بخشی از انرژی آن به صورت پتانسیل و بقیه به صورت جنبشی است. اما رابطهٔ ۳ــ ۱۸ نشان می‌دهد که انرژی مکانیکی نوسانگر مستقل از زمان است.

اگر چه ما انرژی مکانیکی را برای نوسانگر وزنه ــ فنر محاسبه کردیم، ولی می‌توان نشان داد که برای هر نوع نوسانگر سادهٔ دیگری نیز، انرژی مکانیکی با مربع دامنه و مربع بسامد متناسب است.

تمرین ۳ــ۳

الف) رابطهٔ انرژی جنبشی نوسانگر ساده را برحسب مکان نوسانگر (x) به‌دست آورید و با استفاده از آن و همچنین رابطهٔ انرژی پتانسیل نوسانگر نشان دهید که انرژی مکانیکی آن به مکان بستگی ندارد.

ب) با استفاده از رابطه‌ای که به‌دست آوردید، مشخص کنید که در چه مکانی انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی نوسانگر صفر و یا بیشینه است.

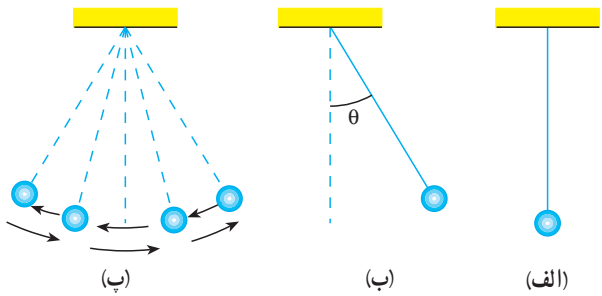
تمرین ۳ــ۴

نمودار تغییرات U_e و K و E را نسبت به مکان برای یک دورهٔ نوسانگر ساده رسم کنید.

۳ــ۵ــ آونگ ساده

آونگ ساده وزنهٔ کوچکی است به جرم m که با نخ سبکی به یک نقطه آویخته شده است. در حالت تعادل، آونگ در امتداد قائم قرار دارد (شکل ۳ــ۱۱ــ الف).

اگر وزنه را پس از خارج کردن آونگ از وضع تعادل رها کنیم (شکل ۳ــ۱۱ــ ب) حول وضع تعادلش نوسان می کند (شکل ۳ــ۱۱ــ پ). در نوسان آونگ، نیروی بازگرداننده، مؤلفهٔ نیروی وزن جسم در راستای مماس بر مسیر است.



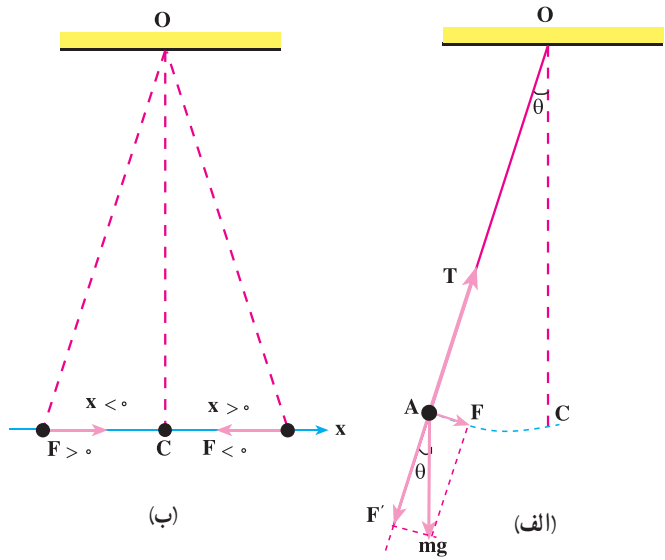
شکل ۳ــ۱۱

اگر زاویهٔ انحراف اولیه از وضع قائم (θ) به اندازهٔ کافی کوچک باشد، مسیر حرکت وزنه تقریباً یک پاره‌خط افقی است (شکل ۳ــ۱۲ــ ب). در این صورت، وزنه مانند وزنهٔ متصل به فنر یک حرکت هماهنگ ساده با دامنهٔ کم (حرکت نوسانی کم‌دامنه) انجام می‌دهد.

محاسبهٔ دورهٔ آونگ سادهٔ کم‌دامنه : در آونگ ساده اگر اصطکاک قابل چشم‌پوشی و جرم نخ ناچیز باشد، بر وزنهٔ آونگ نیروی وزن ($\vec{m g}$) و نیروی کشش نخ ($\vec{T}$) وارد می‌شود. همان‌طور که شکل ۳ــ۱۲ــ الف نشان می‌دهد نیروی کشش نخ در امتداد نخ است و در هر لحظه بر مسیر حرکت وزنه عمود است. بنابراین، در راستای مماس بر مسیر، مؤلفه ندارد. مؤلفهٔ نیروی وزن در امتداد مماس بر مسیر $F = mg\sin\theta$ و در امتداد عمود بر مسیر $F' = mg\cos\theta$ است. مؤلفهٔ مماس بر مسیر که نیروی بازگرداننده است می‌خواهد آونگ را به وضع تعادل برگرداند.

دیدیم که اگر زاویهٔ انحراف آونگ از وضع تعادل (θ) کوچک باشد، مسیر حرکت وزنه تقریباً یک خط راست افقی است؛ در این صورت، اگر طول آونگ را با l نمایش دهیم، $\sin\theta \simeq \theta = \frac{x}{l}$ است و می‌توان نوشت :

$$|F| = mg\theta = mg\frac{x}{l}$$



شکل ۳ــ۱۲

همان‌گونه که در شکل ۳ــ۱۲ــ ب دیده می‌شود مؤلفهٔ نیروی وزن جسم در راستای مماس بر مسیر و همواره در خلاف جهت بردار مکان است. بنابراین :

$$F = -mg\frac{x}{l}$$

همان‌طور که می‌بینید، نیروی بازگرداننده از قانون هوک (رابطهٔ ۳ ــ۲) پیروی می‌کند و حرکت آونگ سادهٔ کم دامنه یک حرکت هماهنگ ساده است.

اکنون با توجه به قانون دوم نیوتون داریم :

$$F = ma \Rightarrow -mg\frac{x}{l} = ma$$

$$a = -\frac{g}{l}x \qquad (۳ــ۱۹)$$

از رابطهٔ ۳ــ۱۴ و ۳ــ۱۹ نتیجه می‌گیریم که :

$$\omega^۲ = \frac{g}{l} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

و

$$T = ۲\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \qquad (۳ــ۲۰)$$

مثال ۳ـ۶

اندازهٔ دوره و بسامد حرکت نوسانی کم‌دامنهٔ یک آونگ ساده به طول ۴۰cm چقدر است؟ ($g = ۱۰ \, m/s^۲$).

پاسخ

$$T = ۲\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$T = ۲\pi\sqrt{\frac{۰/۴}{۱۰}} = ۲\pi \times \frac{۲}{۱۰} \approx ۱/۲۵s \quad \text{و} \quad f = \frac{۱}{T} = ۰/۸Hz$$

مثال ۳ـ۷

طول آونگ سادهٔ کم‌دامنه باید چند سانتی‌متر باشد تا بتواند در هر دقیقه ۳۰ نوسان انجام دهد؟ ($g = ۹/۸ \, m/s^۲$ و $\pi^۲ = ۱۰$).

پاسخ

$$T = \frac{t}{n} = \frac{۶۰}{۳۰} = ۲s$$

$$T^۲ = ۴\pi^۲ \frac{l}{g}$$

$$۴ = ۴ \times ۱۰ \times \frac{l}{۹/۸} \quad \Rightarrow \quad l = ۰/۹۸m = ۹۸cm$$

فعالیت ۳ـ۲

۱ــ به کمک یک گلوله و قطعه نخی به طول ۴۰cm آونگ ساده‌ای بسازید و دورهٔ آن را به ترتیب با زاویه‌های انحراف ۴، ۶ و ۲۰ درجه اندازه بگیرید.

۲ــ گلولهٔ آونگی را که ساخته‌اید به ترتیب، با چند گلولهٔ دیگر تعویض کنید. سپس دورهٔ هریک را با زاویهٔ انحراف ۶ درجه اندازه بگیرید.

۳ــ طول آونگ‌هایی را که ساخته‌اید تغییر دهید و دورهٔ نوسان آنها را با زاویهٔ انحراف ۶ درجه اندازه بگیرید.

نتیجهٔ فعالیت گروه را در کلاس به بحث بگذارید.

فعالیت ۳ـ۳

به کمک یک آونگ ساده شتاب گرانش را در محل سکونت خود اندازه‌گیری کنید. روش کار و نتیجهٔ اندازه‌گیری را به کلاس گزارش کنید.

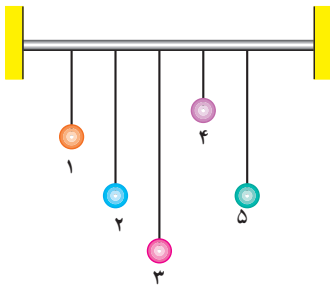
۳ـ۶ـ تشدید

در بخش‌های قبل دیدیم که وقتی یک نوسانگر ساده نظیر آونگ و یا دستگاه وزنه ـ فنر را از وضع تعادل منحرف می‌کنیم و آن را برای نوسان آزاد می‌گذاریم، دستگاه حول وضع تعادل خود شروع به نوسان می‌کند. این حرکت نوسانی، **نوسان طبیعی** یا **آزاد دستگاه** نامیده می‌شود. بسامد (یا دورهٔ) نوسان طبیعی از ویژگی‌های ساختاری نوسانگر است؛ مثلاً، بسامد آونگ سادهٔ کم دامنه به طول آونگ(l) بستگی دارد؛ یعنی، اگر با دادن انرژی به یک آونگ دامنهٔ نوسان آن را افزایش دهیم (به‌طوری که زاویهٔ انحراف آونگ کوچک باقی بماند) بسامد نوسان‌های آن تغییر نمی‌کند، در حالی که برای تغییر بسامد، لازم است طول آونگ را تغییر دهیم.

هنگامی که نوسانگر را از حالت تعادل خارج می‌کنیم و آن را به نوسان درمی‌آوریم، به علت نیروهای اتلافی از قبیل اصطکاک و مقاومت هوا، دامنهٔ نوسان آن به‌تدریج کاهش می‌یابد و دستگاه پس از چند نوسان می‌ایستد. این نوسان‌ها را **نوسان میرا** می‌نامیم. ساده‌ترین مثال برای نوسان میرا آونگ ساده و نیز تاب بازی در بوستان‌هاست. می‌دانید هنگامی که تاب را به نوسان درمی‌آوریم و آن را رها می‌کنیم پس از تعدادی نوسان می‌ایستد؛ ولی اگر بخواهیم تاب به نوسان خود ادامه دهد باید به آن نیرو وارد کنیم؛ مثلاً، می‌توانیم پس از یک رفت و برگشت، هنگامی که تاب می‌خواهد نوسان بعدی را شروع کند به آن نیرو وارد کنیم. در این حالت دورهٔ وارد کردن نیرو با دورهٔ نوسان تاب برابر است. با اعمال این نیرو دامنهٔ نوسان افزایش می‌یابد و به یک مقدار بیشینه می‌رسد و از این پس حرکت نوسانی بدون کاهش دامنه ادامه می‌یابد. در این حالت نیروی اعمال شده اثر نیروهای اتلافی را خنثی می‌کند.

فعالیت ۳ـ۴

مطابق شکل ۳ـ۱۳ به یک طناب افقی آونگ‌های ساده‌ای با طول‌های متفاوت ولی جرم یکسان بیاویزید، به‌طوری که طول آونگ‌های شمارهٔ ۲ و ۵ با یکدیگر برابر باشد. اکنون آونگ شمارهٔ ۵ را از وضع تعادل خارج و آن را رها کنید. حرکت چهار آونگ دیگر را به دقت مشاهده و تجزیه و تحلیل کنید و نتیجهٔ کار گروه را به کلاس گزارش دهید.



شکل ۳ـ۱۳

در این فعالیت با نوسان آونگ شمارهٔ ۵ آونگ‌های ۱ و ۳ و ۴ نیز به نوسان درمی‌آیند، اما پس از چند نوسان می‌ایستند؛ ولی آونگ شمارهٔ ۲ که دورهٔ آن با آونگ شمارهٔ ۵ یکسان است، در مدت طولانی‌تری می‌ایستد؛نتیجه این که :

اگر به نوسانگری یک نیروی دوره‌ای اعمال شود، در صورتی که بسامد نیروی اعمال شده با بسامد نوسانگر یکسان باشد، دامنهٔ نوسان تا مقدار بیشینه‌ای افزایش می‌یابد و از آن پس، حرکت نوسانی بدون کاهش دامنه ادامه می‌یابد. در این صورت می‌گوییم پدیدهٔ **تشدید** رخ داده است. در حالتی هم که بسامد نیروی اعمال شده با بسامد نوسانگر برابر نیست، انرژی به نوسانگر منتقل می‌شود؛ مثلاً، در فعالیت ۳ـ۴ به آونگ‌های ۱ و ۳ و ۴ انرژی منتقل می‌شود و آنها را به حرکت درمی‌آورد. ولی بیشترین انرژی در حالت تشدید به نوسانگر منتقل می‌شود (مانند آونگ ۲).

پرسش ۳ـ۱

اگر نیروی اتلافی به نوسانگر وارد نشود، پیش‌بینی می‌کنید، در اثر تشدید، نوسانگر چگونه رفتار کند؟

پدیدهٔ تشدید ممکن است مفید و یا برعکس مشکل‌زا باشد؛ مثلاً، در ساعت کوکی این پدیده مفید است. فنر کوک شده یک نیروی دوره‌ای بر رقاصک ساعت اعمال می‌کند که بسامد آن با بسامد نوسان رقاصک برابر است و در نتیجه تشدید رخ می‌دهد و باعث می‌شود که حرکت نوسانی رقاصک ادامه یابد. پدیدهٔ تشدید ممکن است اثر مخرب نیز داشته باشد و باعث تخریب ساختمان‌ها و تأسیسات شود.

تمرین‌های فصل سوم

۱ــ توضیح دهید در حرکت هماهنگ سادهٔ وزنه ــ فنر، اگر دامنهٔ نوسان دو برابر شود، چه تغییری در دوره، بیشینهٔ سرعت و انرژی مکانیکی نوسانگر ایجاد می‌شود؟

۲ــ جهت سرعت و شتاب را در حرکت هماهنگ ساده، در دو حالت الف و ب، با هم مقایسه کنید و دربارهٔ نتیجهٔ این مقایسه توضیح دهید.

الف) نوسانگر به مبدأ (وضع تعادل) نزدیک می‌شود.

ب) نوسانگر از مبدأ دور می‌شود.

۳ــ آیا در حرکت هماهنگ ساده اندازه و جهت نیروی بازگرداننده ثابت است؟ آیا امکان دارد این نیرو با بردار مکان جسم از مبدأ هم‌جهت باشد؟ توضیح دهید.

۴ــ اگر بیشینهٔ سرعت نوسانگر وزنه ــ فنری دو برابر شود، انرژی کل آن چند برابر می‌شود؟

۵ــ در لحظه‌ای که انرژی جنبشی یک نوسانگر وزنه ــ فنر ۳ برابر انرژی پتانسیل آن است مکان نوسانگر چند برابر دامنهٔ نوسان آن است؟ سرعت و شتاب نوسانگر در این لحظه به‌ترتیب، چند برابر بیشینهٔ سرعت و بیشینهٔ شتاب نوسانگر است؟

۶ــ دامنهٔ نوسان یک حرکت هماهنگ ساده $۳ \times ۱۰^{-۲}\,m$ و بسامد آن ۵ هرتز است. معادلهٔ حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان ــ زمان آن را در یک دوره رسم کنید.

۷ــ معادلهٔ حرکت، سرعت و شتاب هماهنگ ساده‌ای را بنویسید که دامنهٔ آن ۴cm و دورهٔ آن ۰/۴s است. نمودار مکان ــ زمان، سرعت ــ زمان و شتاب ــ زمان را در یک دوره رسم کنید.

۸ــ معادلهٔ حرکت هماهنگ سادهٔ یک نوسانگر در SI به‌صورت $x = ۰/۰۵\sin(۲۰\pi t)$ است.

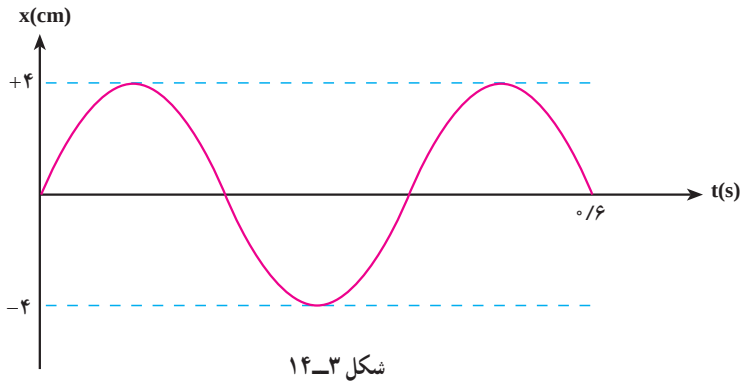
الف) در چه زمانی پس از لحظهٔ صفر، برای اولین بار سرعت نوسانگر به بیشترین مقدار خود می‌رسد؟

ب) در چه فاصله‌ای از مبدأ انرژی جنبشی نوسانگر برابر با انرژی پتانسیل آن خواهد شد؟

۹ــ نمودار مکان ــ زمان نوسانگر مطابق شکل ۳ــ ۱۴ است :

الف) معادله‌های حرکت و سرعت و شتاب این نوسانگر را بنویسید.

ب) چه زمانی پس از لحظهٔ صفر، برای اولین بار به‌ترتیب، سرعت و شتاب آن بیشینه می‌شود؟



شکل ۳ــ۱۴

۱۰ــ پیستون‌های یک اتومبیل ۴ سیلندر در حالت خلاص تقریباً حرکت نوسانی ساده دارند. اگر دامنهٔ نوسان آنها ۵۰ میلی‌متر و بسامد آن ۱۱۰ هرتز باشد، کمیت‌های زیر را به دست آورید.

الف) بیشینهٔ سرعت پیستون‌ها

ب) بیشینهٔ شتاب نوسان آنها

موج‌های مکانیکی

فصل ۴

موج‌های مکانیکی

نگاهی به فصل : مبحث موج یکی از مبحث‌های مهم فیزیک است. بیشترین اطلاعاتی که از جهان اطرافمان دریافت می‌کنیم، از طریق انتشار موج‌ها صورت می‌گیرد.

برخی از موج‌ها برای انتشار به محیط مادی نیاز دارند؛ این‌گونه موج‌ها را **موج‌های مکانیکی** می‌نامند. تشکیل موج بر سطح آب راکد، در اثر وزش باد یا هر عامل دیگری که باعث برهم‌زدن تعادل آب شود، نمونه‌ای آشنا از موج‌های مکانیکی است. انتقال صوت از منبع به شنونده، با موج‌های صوتی که در هوا منتشر می‌شوند، صورت می‌گیرد. موج صوتی نیز نوعی موج مکانیکی است که در فصل اول فیزیک ۲ با ویژگی‌های آن بیشتر آشنا می‌شوید.

نوع دیگری از موج‌ها که می‌توانند در محیط‌های غیرمادی (خلأ) نیز منتشر شوند، **موج‌های الکترومغناطیسی** نامیده می‌شوند؛ برای مثال، هم‌اکنون که در حال خواندن این نوشته‌ها هستید، اطلاعات را به صورت نوری که از صفحهٔ کتاب باز می‌تابد دریافت می‌کنید. نور، نوعی موج الکترومغناطیسی است. در فصل ششم با ماهیت و ویژگی‌های این گونه موج‌ها آشنا می‌شوید. هرچند ماهیت موج‌های مکانیکی و الکترومغناطیسی با یکدیگر تفاوت دارند، اما رفتار و ویژگی‌های آنها از جهت‌های زیادی، مشابه یکدیگر است؛ برای مثال، هر دو در حین انتشار می‌توانند انرژی را از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر منتقل کنند.

۴ـ۱ـ موج

پیش از این با نیروی کشسانی فنر آشنا شدیم. اگر در یک فنر تغییر طولی ایجاد کنیم، بین هر دو حلقهٔ مجاور فنر نیروی کشسانی به‌وجود می‌آید که می‌خواهد فنر را به حالت اولیه برگرداند. به فنر یا هر محیط دیگری که مانند فنر عمل می‌کند محیط کشسان گفته می‌شود. پس محیط کشسان محیطی است که وقتی در آن تغییر شکلی ایجاد شود نیروهای کشسان ایجاد شده بین اجزای محیط، تمایل دارند محیط را به حالت اول خود برگردانند. بیشتر جامدها، مایع ها و گازها محیط های کشسان هستند مثلاً اگر

یک تیغهٔ فنری را خم کرده و رها کنیم، به حالت اول برمی‌گردد. اگر توپی را که بر سطح آرام آب درون تشتکی قرار دارد، کمی بیشتر در آب فرو برده و رها کنیم، به حالت اول برمی‌گردد. به همین ترتیب، اگر انتهای سُرنگی را با دست مسدود کرده و پیستون را به درون آن فرو ببریم و رها کنیم، پیستون به حالت اول برمی‌گردد. در همهٔ این مثال‌ها، تیغهٔ فنری، آب و هوای درون سرنگ محیط‌هایی کشسان هستند.

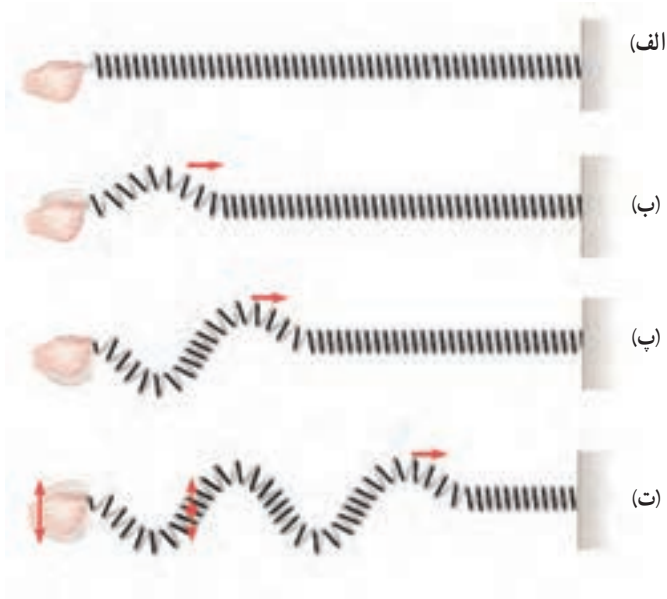
فعالیت ۴ـ۱

طناب درازی را به نقطه‌ای محکم کنید و آن را بکشید (شکل ۴ــ۱ــ الف). اکنون مطابق شکل ۴ــ۱ــ ب تغییر شکلی در آن ایجاد کنید. رفتار بعدی طناب را مشاهده و نتیجهٔ مشاهده‌های خود را به کلاس گزارش کنید. همین آزمایش را با یک فنر تکرار کنید.

شکل ۴ــ۱

یک محیط کشسانِ در حال تعادل را درنظر بگیرید. اگر تغییر شکلی در جزء کوچکی از این محیط ایجاد نموده و آن را به حال خود رها کنیم چه روی می‌دهد؟

مثلاً فنری را درنظر بگیرید که روی یک سطح افقی صاف به حال سکون قرار دارد (شکل ۴ــ۲ــ الف). اگر مطابق شکل ۴ــ۲ــ ب، چند حلقهٔ فنر را به یک سمت بکشیم و تغییر شکلی در آن ایجاد کرده و آن را رهایش کنیم، می‌بینیم که حلقه‌های جابه‌جا شده به‌جای اول برگشته و حلقه‌های مجاور آن از وضع تعادل خارج می‌شوند و همان شکل حلقه‌های قبلی را به خود می‌گیرند. این تغییر شکل، جزء به جزء در طول فنر منتقل می‌شود و تا آخر در آن پیش می‌رود (شکل‌های ۴ــ۲ــ پ و ت) علت انتقال تغییر شکل، وجود نیروی بازگرداننده بین حلقه‌های فنر است.



شکل ۴ــ۲

به همین ترتیب، **هرگاه تغییر شکلی (و یا آشفتگی) در یک جزء از محیط کشسانی که به‌حال تعادل است، ایجاد کنیم، به علت وجود نیروی کشسانی بین اجزای محیط، آن تغییر شکل، جزء به جزء در محیط منتقل می‌شود. تغییر شکل ایجاد شده در محیط را تَپ و انتقال تپ در محیط را انتشار می‌گوییم.**

فعالیت ۴ـ۲

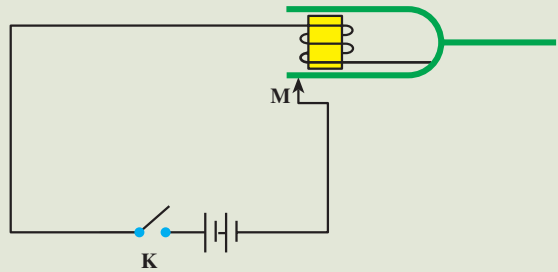
سنگ کوچکی را از بالای سطح آبِ آرامِ استخر یا برکه‌ای رها کنید و آنچه را که رخ می‌دهد به دقت مشاهده کنید. نتیجهٔ مشاهدهٔ خود را به کلاس گزارش کنید.

موج سینوسی : اگر یک جزء از محیط کشسانی را که درحال تعادل است با حرکت هماهنگ ساده به نوسان درآوریم، با نوسان آن جزء، تپ‌های متوالی در محیط تولید و به‌دنبال یکدیگر، منتشر می‌شوند. چنین موجی را، **موج سینوسی** می‌نامیم. چشمهٔ موج سینوسی، نوسانگری است که می‌تواند، با بسامد (یا دوره) و دامنهٔ ثابتی، حرکت هماهنگ ساده انجام دهد. دیاپازون یکی از وسیله‌هایی است که به‌عنوان چشمهٔ موج در آزمایش‌ها به‌کار برده می‌شود.

نوسان دیاپازون با دامنهٔ ثابت

دیاپازون، دوشاخه‌ای مانند شکل ۴ــ۳ است که اگر به یکی از شاخه های آن ضربه‌ای وارد کنیم، هر دو شاخه با حرکت هماهنگ ساده نوسان می کنند. این نوسان میرا است و دیاپازون بعد از تعدادی نوسان از حرکت باز می‌ایستد. برای آنکه نوسان‌های دیاپازون ادامه یابد، می توان آن را در مداری الکتریکی مانند شکل ۴ــ۴ قرار داد. در این مدار، توسط آهنربای الکتریکی، نیروی مغناطیسی‌ای به‌طور دوره‌ای، بر شاخه های دیاپازون (که خود از مادهٔ مغناطیسی ساخته شده است) وارد و آن را به نوسان دائم وادار می کند. با اتصال کلید K جریان الکتریکی در مدار برقرار و شاخه های دیاپازون، جذب آهنربای الکتریکی می‌شوند. در نتیجه در نقطهٔ M، شاخهٔ دیاپازون از مدار جدا شده و جریان الکتریکی نیز قطع می‌شود. با قطع جریان، خاصیت مغناطیسی ازبین می‌رود و شاخه های دیاپازون به‌جای اول برمی گردند و دوباره اتصال برقرار می‌شود و این عمل ادامه می یابد. به‌این ترتیب، نوسان‌های دیاپازون پایدار می‌ماند.

شکل ۴ــ۳



شکل ۴ــ۴

شکل ۴ــ ۵ ــ الف تا پ ایجاد و انتشار موج سینوسی را در طناب، فنر و سطح آب نشان می‌دهد.

الف ــ دست با نوسان خود در طناب موجی دوره‌ای به‌صورت برجستگی و فرورفتگی ایجاد کرده است.

ب ــ نوسان‌های دست، در فنر موج دوره‌ای به‌صورت تراکم و انبساط ایجاد کرده است.

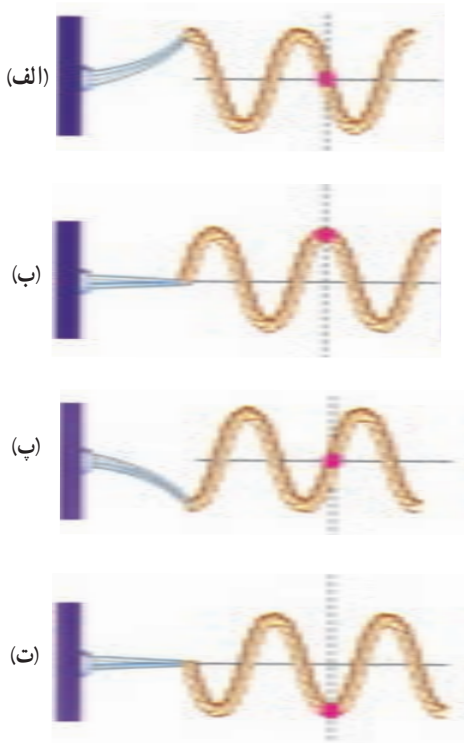
پ ــ موج‌های ایجاد شده در سطح آب به‌صورت دایره‌های متوالی برجسته و فرورفته منتشر می‌شوند.

شکل ۴ــ ۵

موج‌های ایجاد شده در طناب، فنر و سطح آب، نمونه‌هایی از موج‌های مکانیکی‌اند. این موج‌ها در محیط‌های مادّی کشسان تولید و منتشر می‌شوند.

بسامد موج : وقتی یک چشمهٔ موج با بسامد ν در محیطی کشسان شروع به نوسان می‌کند، ذره‌های مجاور خود را نیز با همان بسامد به نوسان وامی‌دارد. به همین ترتیب، همهٔ ذره‌های محیط با همان بسامدِ چشمهٔ موج به نوسان درمی‌آیند.

شکل ۴ــ۶ ــ الف تا ت چگونگی نوسان یک ذرهٔ محیط را که با رنگ قرمز مشخص شده است، ضمن انتشار موج نشان می‌دهد.



شکل ۴ــ ۶ ــ ضمن انتشار موج به طرف راست، یک ذره از طناب، حرکت هماهنگ ساده با بسامد موج، انجام می‌دهد.

انتشار موج : شکل ۴ــ۷ حالت‌های مختلف طنابی را نشان می‌دهد که در آن موجی سینوسی منتشر می‌شود. در این شکل‌ها، یک قلّهٔ موج را با پیکان مشخص کرده‌ایم. در حالت‌های مختلف شکل مشاهده می‌شود که پیکان در جهت محور x جابه‌جا می‌شود که نشان دهندهٔ پیشروی موج در طول طناب است. این شکل‌ها، وضعیت نقطه‌های مختلف طناب را در بازه‌های زمانی $\frac{T}{8}$ نشان می‌دهد. اگر در یک لحظهٔ معیّن یکی از نقطه‌های طناب در قلّهٔ موج باشد و پس از t ثانیه نقطهٔ دیگری که به فاصلهٔ x از آن واقع است به همان وضعیت برسد، سرعت پیشروی موج که آن را **سرعت انتشار** می‌نامیم برابر است با :

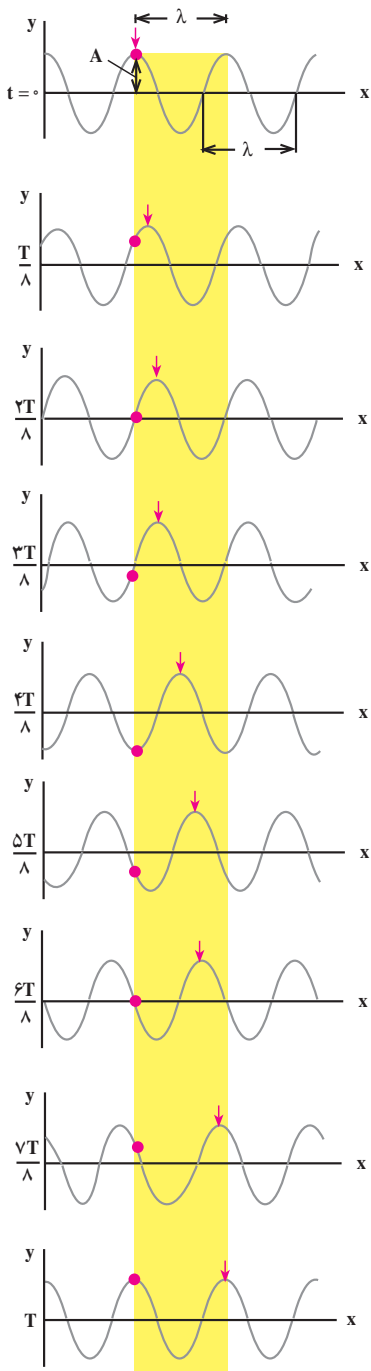
$$v = \frac{x}{t} \qquad (۴ــ۱)$$

سرعت انتشار موج در یک محیط به ویژگی‌های فیزیکی محیط (جنس، دما و...) بستگی دارد اما به شرایط فیزیکی چشمهٔ موج (بسامد، دامنه و...) بستگی ندارد؛ برای مثال، سرعت انتشار موج در یک طناب که با نیروی F کشیده شده است، به نیروی کشش طناب و نیز به‌جرم واحد طول آن بستگی دارد. سرعت انتشار موج عرضی (درهمین فصل با موج‌های طولی و عرضی آشنا می‌شویم) در طناب (و یا در تار) یکنواختی به جرم m و طول L از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$v = \sqrt{\frac{F}{m/L}} \qquad (۴ــ۲ــ\text{الف})$$

برای سادگی، $\frac{m}{L}$ (که جرم واحد طول است) را با μ نشان می‌دهیم.

$$\mu = \frac{m}{L}$$



شکل ۴ــ۷ــ انتشار موج در طناب

در نتیجه، سرعت انتشار موج در یک طناب را می‌توان از رابطهٔ زیر به‌دست آورد :

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \qquad (۴ــ۲ــ ب)$$

در این رابطه، F نیروی کشش طناب برحسب نیوتون μ جرم واحد طول طناب برحسب کیلوگرم بر متر و v سرعت انتشار موج مکانیکی در طناب برحسب متر بر ثانیه است.

مثال ۴ـ۱

ریسمانی به طول یک متر و جرم ۱۰۰g بین دو نقطه محکم کشیده شده است. اگر نیروی کشش ریسمان برابر ۴۰N باشد، سرعت انتشار موج‌های عرضی را در این طناب، محاسبه کنید.

پاسخ

ابتدا جرم واحد طول ریسمان را محاسبه می‌کنیم :

$$\mu = \frac{m}{L}$$

$$\mu = \frac{۰/۱}{۱} = ۰/۱ kg/m$$

اکنون به کمک رابطهٔ ۴ــ۲ــ ب سرعت انتشار را به‌دست می‌آوریم :

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

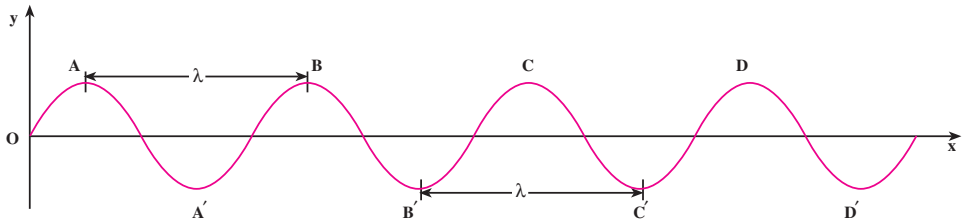
$$v = \sqrt{\frac{۴۰}{۰/۱}} = ۲۰ m/s$$

فعالیت ۴ـ۳

در فعالیت ۴ــ۱، مشاهدهٔ انتقال تپ به دلیل آن‌که سرعت انتشار آن در طناب زیاد است، مشکل است. چه راه‌هایی پیشنهاد می‌کنید تا بتوان با کاهش سرعت انتشار، انتقال تپ را مشاهده کرد؟ پیشنهادهای خود را در کلاس به‌بحث بگذارید.

طول موج : به حالت های مختلف شکل ۴ــ۷ توجه کنید. در مدتی که یک نقطهٔ محیط (مثلاً نقطهٔ واقع در قلّهٔ موج) یک نوسان انجام می‌دهد؛ یعنی، در مدت یک دوره T، قلهٔ موج که با علامت پیکان مشخص شده است، به اندازهٔ پهنای نوار زرد رنگ پیش می‌رود اندازهٔ این پیشروی را **طول موج** می‌نامیم و آن را با λ نشان می‌دهیم. اگر به هر نقطهٔ دیگر موج، مثلاً درّهٔ موج هم توجه کنید، می‌بینید که در مدت یک دوره به اندازهٔ طول موج منتقل می‌شود. بنابراین، طول موج را می‌توان به صورت مسافتی که موج در مدت یک دوره می‌پیماید، تعریف کرد.

در شکل ۴ــ ۸ که انتشار موج را در یک طناب نشان می‌دهد، فاصلهٔ دو قلّهٔ متوالی موج و یا فاصلهٔ دو درّهٔ متوالی برابر طول موج است.



شکل ۴ــ ۸

بار دیگر به شکل ۴ــ ۸ توجه کنید. در این شکل نقطه های دیگری نیز می‌توان یافت که فاصلهٔ آنها از یکدیگر برابر طول موج است. همچنین می‌توان دریافت که هر دو نقطه که فاصلهٔ آنها از یکدیگر برابر طول موج است، همواره در وضعیت نوسانی مشابهی قرار دارند. به چنین دو نقطه‌ای، نقاط **هم فاز** گفته می‌شود؛ برای مثال، نقطه های A و B و C و D همه در قلّهٔ موج واقع‌اند و در نتیجه هم‌فازند. به همین ترتیب، نقطه هایی که فاصلهٔ آنها از یکدیگر دو، سه و یا ... n برابر λ (n عددی است صحیح) باشد، همواره در یک وضعیت نوسانی‌اند. پس می‌توان گفت : **نقطه هایی از محیط که فاصلهٔ آنها از یکدیگر مضرب صحیحی از طول موج یا مضرب زوجی از نصف طول موج باشد، هم فازند.**

اگر فاصلهٔ دو نقطهٔ هم فاز را با Δx نشان دهیم داریم :

$$\Delta x = n\lambda = ۲n\frac{\lambda}{۲} \qquad (۳ــ۴)$$

اکنون به دو نقطهٔ متوالی طناب در شکل ۴ــ ۸ که یکی در قلّهٔ موج (نقطهٔ A) و دیگری در درّهٔ موج (نقطهٔ A′) قرار دارد توجه کنید. اگر حرکت این دو نقطه را دنبال کنید، متوجه خواهید شد که حرکت آنها همواره در جهت‌های مخالف یکدیگر است. چنین دو نقطه‌ای را در **فاز مخالف** می‌نامیم.

فاصلهٔ این دو نقطه از یکدیگر در راستای انتشار، برابر نصف طول موج است. به همین ترتیب، نقطه های دیگری نیز می توان مشخص کرد که با یکدیگر در فاز مخالف‌اند. فاصلهٔ این نقطه ها از یکدیگر مضرب فردی از نصف طول موج است. بنابراین : **نقطه هایی از محیط که فاصلهٔ آنها از یکدیگر مضرب فردی از نصف طول موج باشد، در فاز مخالف‌اند.** برای این نقطه ها داریم :

$$\Delta x = (2n-1)\frac{\lambda}{2} \qquad (4\text{ـ}4)$$

پرسش ۴ـ۱

روی شکل ۴ـ ۸ نقطه هایی را که هم‌فازند و نقطه هایی را که در فاز مخالف‌اند پیدا کنید.

رابطهٔ طول موج با سرعت و بسامد : اگر زمان انتشار برابر یک دوره، یعنی $t = T$ باشد، مسافتی که موج در این مدت می‌پیماید، برابر طول موج می‌شود؛ یعنی $x = \lambda$ است. با توجه به تعریف طول موج و رابطهٔ ۴ـ۱ داریم :

$$\lambda = vT \qquad (5\text{ـ}4)$$

چون دوره و بسامد، عکس یکدیگرند خواهیم داشت :

$$\lambda = vT = \frac{v}{f} \qquad (6\text{ـ}4)$$

مثال ۴ـ۲

نیروی کشش طنابی ۱۲N و جرم واحد طول آن $30\frac{g}{m}$ است. الف) اگر سر این طناب را با دیاپازونی که بسامد آن ۱۰۰Hz است، عمود بر راستای طناب به نوسان درآوریم، طول موج در طناب را پیدا کنید. ب) اگر نیروی کشش طناب را نصف کنیم، بسامد و طول موج در طناب را حساب کنید.

$$\mu = 30\,g/m = 0/03\,kg/m$$

پاسخ

الف) با استفاده از رابطهٔ ۴ـ۲ داریم :

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

$$v = \sqrt{\frac{۱۲}{۰/۰۳}} = ۲۰\,m/s$$

طول موج را از رابطهٔ ۴ــ۶ محاسبه می‌کنیم :

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

$$\lambda = \frac{۲۰}{۱۰۰} = ۰/۲m$$

ب) با تغییر نیروی کشش طناب، سرعت انتشار موج در طناب تغییر می‌کند، اما بسامد موج هم‌چنان برابر بسامد دیاپازون است. با تغییر سرعت انتشار، طول موج تغییر می‌کند. داریم :

$$f_۱ = f_۲ = ۱۰۰Hz$$

از رابطهٔ ۴ــ۲ــ ب و با توجه به این که $\mu_۱ = \mu_۲$ است داریم :

$$\frac{v_۲}{v_۱} = \sqrt{\frac{F_۲}{F_۱}}$$

$$\frac{v_۲}{v_۱} = \sqrt{\frac{۶}{۱۲}} = \frac{\sqrt{۲}}{۲}$$

چون بسامد نوسان‌ها ثابت است، از رابطهٔ ۴ــ۶ نتیجه می‌شود :

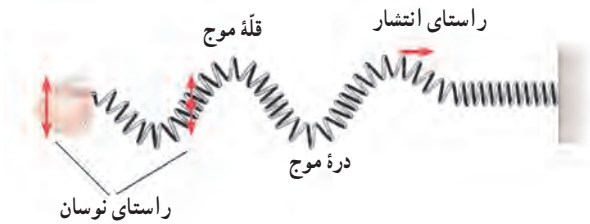
$$\frac{\lambda_۲}{\lambda_۱} = \frac{v_۲}{v_۱} = \frac{\sqrt{۲}}{۲}$$

$$\lambda_۲ = ۰/۲\frac{\sqrt{۲}}{۲} \simeq ۰/۱۴m$$

۴ــ۲ــ موج های عرضی ــ موج های طولی

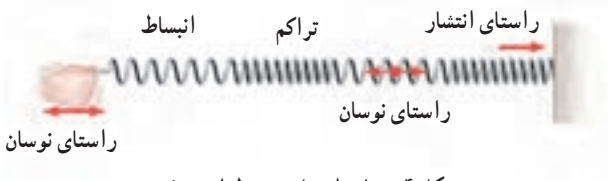
گفتیم وقتی یک چشمهٔ موج با بسامد f در محیطی کشسان نوسان می‌کند ذره‌های مجاور خود را نیز با همان بسامد به نوسان درمی‌آورد و بدین ترتیب، همهٔ ذرات محیط به نوسان در می‌آیند. راستای نوسان این ذره‌ها، ممکن است عمود بر راستای انتشار موج و یا موازی با آن باشد.

الف) موج عرضی : اگر راستای نوسان ذره های محیط، عمود بر راستای انتشار موج باشد موج را عرضی می نامند؛ برای مثال، موج های ایجاد شده در فنر در شکل ۴ــ۹ عرضی اند. موج عرضی در فنر و یا در طناب با قلّه ها و درّه ها قابل تشخیص است.



شکل ۴ــ۹ــ موج عرضی در فنر

ب) موج طولی : اگر راستای نوسان ذرّه های محیط، موازی با راستای انتشار موج باشد، موج را طولی می نامند؛ برای مثال، در شکل ۴ــ۱۰ وقتی دیاپازون را به نوسان درآوریم، حلقه های فنر به چپ و راست، یعنی در امتداد طول فنر، نوسان می کنند و موج طولی در طول فنر منتشر می شود.



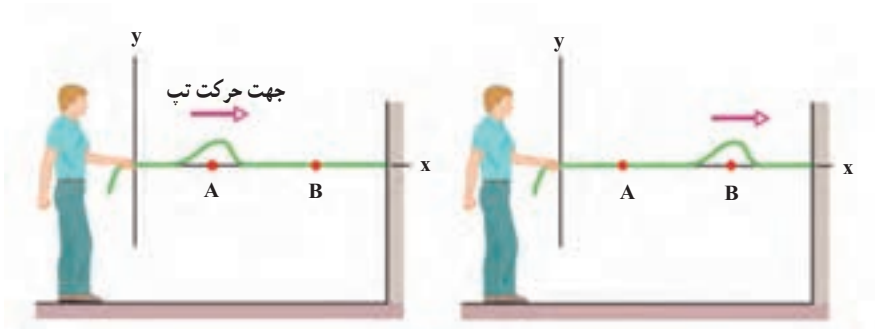
شکل ۴ــ۱۰ــ انتشار موج طولی در فنر

وقتی موج طولی در فنر منتشر می شود، حلقه های فنر به طور متناوب به هم نزدیک یا از هم دور می شوند. وقتی به هم نزدیک می شوند، حلقه ها متراکم شده و وقتی از هم دور می شوند، حلقه ها انبساط پیدا می کنند. موج طولی در فنر را با همین تراکم ها و انبساط های پی در پی می توان تشخیص داد. در فنر می توان هر دو نوع موج عرضی و طولی را ایجاد کرد.

۴ــ۳ــ تابع موج

وقتی یک موج در یک محیط همگن در حال انتشار است، شکل موج، در ضمن انتشار از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر تغییر نمی کند؛ مثلاً، اگر شکل یک تپ در یک لحظه (مثلاً در $t = 0$) و در نقطهٔ A به صورت شکل ۴ــ۱۱ــ الف باشد، بعد از Δt ثانیه (در لحظهٔ t) این تپ به نقطهٔ B می رسد. شکل تپ

در نقطهٔ B و در لحظهٔ t همان است که Δt ثانیه قبل در نقطهٔ A بوده است (شکل ۴ــ۱۱ــ ب). به بیان دیگر، وضعیت نقطهٔ B در لحظهٔ t مانند وضعیت A در Δt ثانیه قبل از آن است.



(ب) (الف)

شکل ۴ــ۱۱

اکنون فرض کنید چشمهٔ موجی با دورهٔ T (بسامد f) و دامنهٔ A حرکت هماهنگ ساده‌ای انجام دهد و نوسان‌های آن با سرعت v در طنابی همگن منتشر شود. مبدأ مختصات را منطبق بر چشمهٔ موج (ابتدای طناب) و راستای طناب را پیش از نوسان، محور x انتخاب می‌کنیم. وقتی چشمه به نوسان درآید، نوسان‌ها در طول طناب، منتشر می‌شوند.

چشمهٔ موج و نقطه‌ای از طناب که به آن متصل است در مکان $x = 0$ واقع‌اند. اگر جابه‌جایی هر نقطهٔ طناب را از وضع تعادل خود با u نشان دهیم، وضعیت نوسانی آن با رابطهٔ زیر بیان می‌شود :

$$u = A\sin\omega t = A\sin\frac{2\pi}{T}t \qquad (۴ــ۷)$$

موج بعد از زمان $\Delta t = \frac{x}{v}$ به نقطه‌ای واقع در مکان x می‌رسد. وضعیت این نقطه، همان‌گونه که قبلاً بیان شد، مانند وضعیت چشمهٔ موج در Δt ثانیه قبل است که با جایگزین کردن مقدار « $t - \frac{x}{v}$ » به‌جای t در رابطهٔ ۴ــ۷ مشخص می‌شود. بنابراین خواهیم داشت :

$$u = A\sin\omega(t - \frac{x}{v}) = A\sin(\omega t - \frac{\omega x}{v}) \qquad (۴ــ۸)$$

و با توجه به رابطه‌های $\omega = \frac{2\pi}{T}$ و $\lambda = vT$ داریم :

$$u = A\sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x) \qquad (۴ــ۹)$$

$\frac{2\pi}{\lambda}$ را با k نشان می‌دهند و به آن عدد موج می‌گویند.

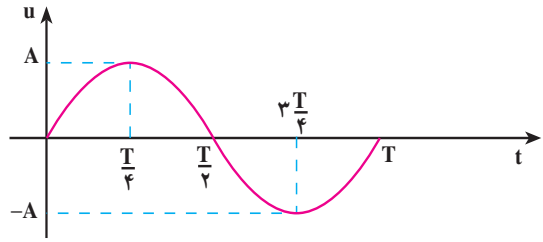
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} \qquad (۴ــ۱۰)$$

یکای عدد موج در SI رادیان بر متر (rad/m) است؛ در نتیجه رابطهٔ ۴ــ۹ به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$u = A\sin(\omega t - kx) \qquad (۴ــ۱۱)$$

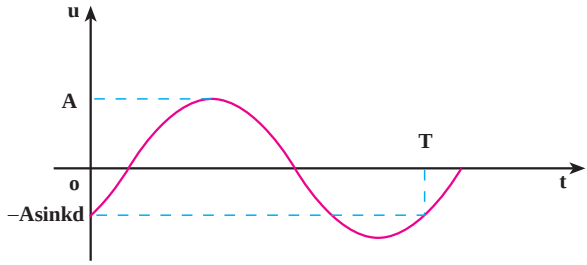
رابطهٔ ۴ــ۱۱ وضعیت نوسانی نقطه‌ای از محیط را که به فاصلهٔ x از مبدأ مختصات (چشمهٔ موج) واقع است، در لحظهٔ t نشان می‌دهد. به این رابطه **تابع موج** می‌گوییم.

تابع موج، تابعی دو متغیره است؛ یعنی در آن، u تابع دو متغیر زمان (t) و مکان (x) است؛ برای مثال، اگر به یک نقطهٔ محیط نگاه کنیم (x را ثابت بگیریم) خواهیم دید که این نقطه در لحظه های مختلف وضعیت های نوسانی متفاوتی پیدا می کند؛ یک لحظه در وضعیت تعادل است، لحظه‌ای دیگر از وضع تعادل خارج شده و فاصلهٔ آن از وضع تعادل برابر u می‌شود و در لحظه‌ای دیگر، در دورترین فاصله از وضع تعادل قرار می گیرد ($u = A$). به عبارت دیگر u تابع زمان است. پس با ثابت گرفتن x می توان تابع u را برحسب زمان (t) برای هریک از ذرّه های محیط به دست آورد و نمودار آن را نیز رسم کرد؛ مثلاً، این تابع برای چشمهٔ موج که آن را مبدأ مختصات گرفته‌ایم ($x = ۰$) به‌صورت $u = A\sin\frac{۲\pi}{T}t$ و نمودار آن نیز به‌صورت زیر است :



شکل ۴ــ۱۲

تابع u برای یک ذرّه که به فاصلهٔ $x = d$ از چشمهٔ موج واقع است، $u = A\sin(\frac{۲\pi}{T}t - kd)$ خواهد بود. نمودار u برای این نقطه در شکل ۴ــ۱۳ آمده است. توجه کنید که شروع نمودار به d بستگی دارد.



شکل ۴ــ۱۳

مثال ۴ـ۳

یک چشمهٔ موج با بسامد ۱۰۰Hz نوسان هایی با دامنهٔ 5mm ایجاد می کند که با سرعت ۱۰ m/s در امتداد محور x منتشر می‌شوند. طول موج و عدد موج را محاسبه کنید و تابع موج آن را نیز بنویسید.

پاسخ

با استفاده از رابطهٔ ۴ـ۶ داریم :

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

$$\lambda = \frac{۱۰}{۱۰۰} = ۰/۱m$$

با توجه به رابطهٔ ۴ـ۱۰ خواهیم داشت :

$$k = \frac{۲\pi}{\lambda}$$

$$k = \frac{۲\pi}{۰/۱} = ۲۰\pi rad/m$$

با استفاده از رابطهٔ ۴ـ۱۱ داریم :

$$u = A\sin(\omega t - kx) = A\sin(۲\pi ft - kx)$$

$$u = ۵ \times ۱۰^{-۳}\sin(۲۰۰\pi t - ۲۰\pi x) = ۵ \times ۱۰^{-۳}\sin ۲۰\pi(۱۰t - x)$$

تمرین ۴ـ۱

تابع موجی که در جهت محور x منتشر می‌شود برحسب یکاهای SI به صورت $u = ۰/۰۲\sin(۲۰\pi t - ۴\pi x)$ است. دامنه، بسامد، طول موج و سرعت انتشار این موج را محاسبه کنید.

اگر موج عرضی باشد، نوسان ذرّه های محیط عمود بر محور x (مثلاً در راستای محور y) است. برای نشان دادن راستای نوسان، نام محوری را که نوسان در راستای آن انجام می‌شود زیرنویس u قرار می‌دهیم؛ برای مثال، تابع زیر نشان دهندهٔ یک موج عرضی است که نوسان آن در راستای محور y و انتشار آن در جهت محور x است :

$$u_y = A\sin(\omega t - kx) \qquad (۴ـ۱۲)$$

حال اگر موج طولی در جهت محور x منتشر شود، تابع آن به‌صورت زیر خواهد بود :

$$u_x = A\sin(\omega t - kx) \qquad (۴ــ۱۳)$$

همچنین می‌توان نشان داد که اگر موج در خلاف جهت محور x منتشر شود، تابع آن به‌صورت زیر خواهد بود :

$$u_x = A\sin(\omega t + kx) \qquad (۴ــ۱۴)$$

در رابطه های ۴ــ۱۲ و ۴ــ۱۴ به $\varphi = \omega t - kx$ و یا $\varphi = \omega t + kx$، **فاز موج** گفته می‌شود. چون شکل موج در هنگام انتشار تغییر نمی‌کند؛ فاز آن هم با گذشت زمان و انتشار موج، ثابت می‌ماند.

تمرین ۴ـ۲

نشان دهید که در تابع های $u = A\sin(\omega t - kx)$ و $u = A\sin(\omega t + kx)$ به‌ترتیب، سرعت‌های انتشار موج مثبت و منفی است؛ یعنی این تابع ها، موج‌هایی را نشان می‌دهند که در جهت محور x و در خلاف جهت آن منتشر می‌شوند.

تمرین ۴ـ۳

نقش یک موج را در لحظه‌ای مانند شکل ۴ــ۸ درنظر بگیرید. نشان دهید نقاطی که وضعیت نوسانی یکسان در دو لحظه دارند دارای اختلاف فاز $2n\pi$ است که $(n = 0,1,\ldots)$ و نقاطی که دارای وضعیت نوسانی قرینه‌اند دارای اختلاف فاز $(2m - 1)\pi$ است که $(m = 1,2,\ldots)$.

مثال ۴ـ۴

با دیاپازونی به بسامد ۵۰Hz سر طناب کشیده شده‌ای را به نوسان درمی‌آوریم. دامنهٔ نوسان‌ها ۵mm در راستای محور y و سرعت انتشار موج در طناب برابر ۱۰۰ m/s و نوسان‌ها در جهت مثبت محور x منتشر می‌شود.

الف) تابع موج ایجاد شده در طناب را بنویسید.

ب) معادلهٔ نوسان نقطهٔ M از طناب را که به فاصلهٔ ۲۵cm از سر طناب (نقطهٔ O) واقع است بنویسید.

پاسخ

الف) با استفاده از رابطه های $\omega = ۲\pi f$، $\lambda = \frac{v}{f}$ و $k = \frac{۲\pi}{\lambda}$ داریم :

$$\omega = ۲\pi f = ۱۰۰\pi \, rad/s$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{۱۰۰}{۵۰} = ۲m$$

$$k = \frac{۲\pi}{\lambda} = \frac{۲\pi}{۲} = \pi \, rad/m$$

با استفاده از رابطهٔ ۴ـ۱۲ داریم :

$$u_y = A\sin(\omega t - kx)$$

$$u_y = ۵ \times ۱۰^{-۳}\sin(۱۰۰\pi t - \pi x)$$

ب) برای نقطهٔ یاد شده داریم :

$$x = ۰/۲۵m = \frac{۱}{۴}m$$

با قرار دادن مقدار x در تابع موج، نتیجه می‌شود :

$$u_M = ۵\times ۱۰^{-۳}\sin(۱۰۰\pi t - \frac{\pi}{۴})$$

تمرین ۴ـ۴

چشمهٔ موجی نوسان هایی با بسامد ۲۰Hz و دامنهٔ ۵cm در یک محیط کشسان و در راستای محور y انجام می‌دهد. اگر این نوسان‌ها در خلاف جهت محور x و با سرعت ۱۰ m/s در این محیط منتشر شوند :

الف) طول موج و عدد موج را محاسبه کنید.

ب) تابع این موج را بنویسید.

پ) کمترین فاصلهٔ نقطهٔ M از چشمهٔ موج چه اندازه باشد تا با چشمهٔ موج در فاز مخالف قرار گیرد.

فاصلهٔ دو نقطهٔ محیط از یکدیگر : محیطی را درنظر بگیرید که در آن موجی در حال انتشار است. معادلهٔ نوسان دو نقطهٔ A و B از این محیط که در یک جهت انتشار موج و به فاصلهٔ x_A و x_B از مبدأ مختصات واقع‌اند، با توجه به رابطهٔ ۴ــ۱۲، به‌صورت زیر است :

$$u_A = A\sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x_A) \qquad u_B = A\sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x_B)$$

اختلاف فاز این دو نقطه برابر است با :

$$|\Delta\varphi| = \frac{2\pi}{\lambda}|x_B - x_A|$$

اگر «$x_B - x_A$» را با Δx نشان دهیم، داریم :

$$|\Delta\varphi| = \frac{2\pi}{\lambda}|\Delta x| = k|\Delta x| \qquad (۴ــ۱۵)$$

از رابطهٔ ۴ــ۱۵ با معلوم بودن اختلاف فاز دو نقطهٔ محیط که در یک جهت انتشار موج‌اند، می‌توان فاصلهٔ دو نقطه را از یکدیگر (یعنی Δx) محاسبه کرد.

رابطهٔ ۴ــ۱۵ نشان می‌دهد که اختلاف فاز دو نقطهٔ محیط که به فاصلهٔ $\Delta x = 1\,m$ از یکدیگر و در یک جهت انتشار موج‌اند، برابر است با :

$$\Delta x = 1\,m$$
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} = k \qquad (۴ــ۱۶)$$

رابطهٔ ۴ــ۱۶ را می‌توان تعریفی برای عدد موج دانست و گفت : **عدد موج برابر اختلاف فاز دو نقطهٔ محیط است که به فاصلهٔ یک متر از یکدیگر قرار دارند.**

مثال ۴ــ۵

موجی در یک محیط، در حال انتشار است. معادلهٔ نوسانی نقطه‌های A و B از این محیط، در SI، به‌صورت $u_A = 0/02\sin(50\pi t - 0/4\pi)$ و $u_B = 0/02\sin(50\pi t - 0/7\pi)$ است؛ اگر موج از نقطهٔ A به نقطهٔ B برود، کمترین فاصلهٔ دو نقطه را از یکدیگر به‌دست آورید. سرعت انتشار موج $20\ m/s$ است.

پاسخ

ابتدا بسامد نوسان‌ها و سپس طول موج را محاسبه می‌کنیم :

$$\omega = 2\pi f$$

$$۲\pi f = ۵۰\pi \quad \Rightarrow \quad f = ۲۵Hz$$

با استفاده از رابطهٔ $\lambda = \frac{v}{f}$ داریم :

$$\lambda = \frac{۲۰}{۲۵} = ۰/۸m = ۸۰cm$$

اکنون اندازهٔ اختلاف فاز دو نقطه را محاسبه می‌کنیم :

$$\Delta\varphi = |\varphi_B - \varphi_A|$$

$$\Delta\varphi = ۰/۷\pi - ۰/۴\pi = ۰/۳\pi rad$$

با استفاده از رابطهٔ ۴ــ۱۵ داریم :

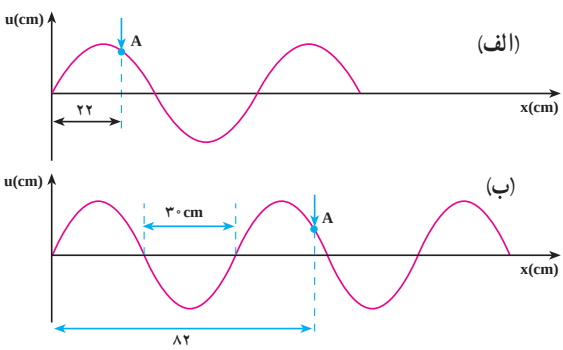
$$\frac{۳\pi}{۱۰} = \frac{۲\pi}{\lambda}\Delta x = \frac{۲\pi}{۸۰}\Delta x \quad \Rightarrow \quad \Delta x = AB = ۱۲cm$$

فعالیت ۴ـ۴

با استدلال توضیح دهید که چرا در مثال ۴ــ۵، Δxکمترین فاصلهٔ دو نقطه از محیط است که در یک جهت انتشار موج واقع‌اند.

تمرین ۴ـ۵

شکل های ۴ــ۱۴ ــ الف و ب، نقش یک موج را در دو لحظهٔ $t_۱$ و $t_۲$ نشان می‌دهد که در امتداد محور x منتشر می‌شود. علامت پیکان، یک نقطه از موج را در این دو لحظه نشان می‌دهد. با فرض اینکه محور قائم، لزوماً محور y نیست مطلوب است :



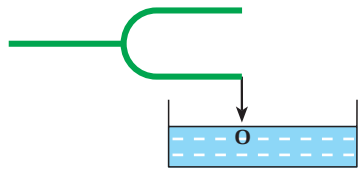
شکل ۴ــ۱۴

الف) این موج طولی است یا عرضی و عدد موج آن‌چه اندازه است؟

ب) اگر بسامد نوسان ها ۲۵Hz باشد، $\Delta t = t_۲ - t_۱$ چند ثانیه است؟

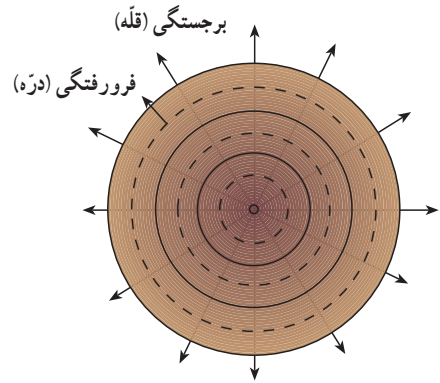
۴ــ۴ــ انتشار موج در دو و سه بُعد

اگر مطابق شکل ۴ــ۱۵ به کمک یک سوزنی که به انتهای یک شاخهٔ دیاپازون نصب شده است، ضربه هایی را در راستای قائم بر سطح آب درون تشتک وارد کنیم، موج های ایجاد شده به صورت دایره هایی به مرکز چشمهٔ موج، در سطح آب، یعنی در دو بُعد منتشر می‌شوند.



شکل ۴ــ۱۵

در شکل ۴ــ۱۶ دو دسته دایره می‌بینید. دایره های توپر، برجستگی‌ها و دایره های خط‌چین، فرورفتگی‌ها را در سطح آب نشان می‌دهند. به این دایره های درحال انتشار **جبههٔ موج** می‌گوییم و آن را چنین تعریف می‌کنیم : **جبههٔ موج مکان هندسی نقطه هایی از محیط است که در آن نقطه‌ها تابع موج دارای فاز یکسانی است**. بنابراین، اختلاف فاز نقطه های واقع بر یک جبههٔ موج همواره برابر صفر است.

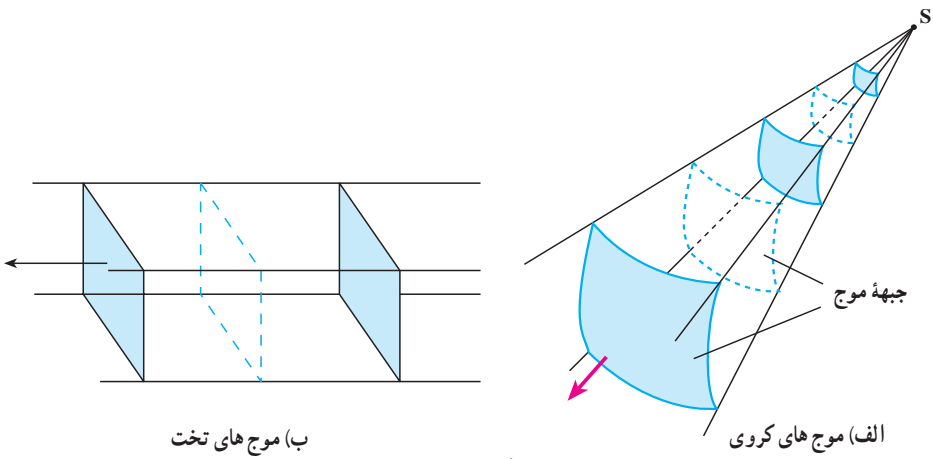


شکل ۴ــ۱۶

موج های سطح آب، نمونه‌ای از انتشار موج در دو بُعد است. موج‌هایی نیز هستند که در سه بعد منتشر می‌شوند؛ انتشار موج‌های صوتی و انتشار موج های الکترومغناطیسی، نمونه هایی از انتشار

موج در سه بُعدند. اگر یک چشمهٔ موج نقطه‌ای را در یک محیط همسانگرد سه‌بُعدی قرار دهیم (مثلاً بلندگوی کوچکی در هوای درون اتاق)، جبههٔ موج به‌صورت کره‌هایی خواهد بود که مرکز همهٔ آنها، چشمهٔ موج است و از چشمهٔ موج در سه بُعد منتشر می‌شوند و شعاع آنها با انتشار موج به‌تدریج افزایش می‌یابد. به این موج‌ها، موج کروی می‌گوییم. شکل ۴ــ۱۷ــ الف قسمت‌های کوچکی از سطح موج‌ها را که از چشمهٔ موج نقطه‌ای S گسیل می‌شوند نشان می‌دهد.

در فاصلهٔ بسیار دور از یک چشمهٔ موج نقطه‌ای، قسمت‌های کوچکی از جبههٔ موج‌های کروی، همان‌گونه که در شکل ۴ــ۱۷ــ ب نشان داده شده است، به‌صورت صفحه‌هایی موازی یکدیگر درمی‌آیند. در این صورت به آنها **موج تخت** می‌گوییم.



الف) موج‌های کروی

ب) موج‌های تخت

شکل ۴ــ۱۷

موج حامل انرژی است : موج‌ها با خود انرژی را از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر منتقل می‌کنند. اگر یک سر طنابی در دست شما باشد و از سر دیگر آن موجی به طرف شما منتشر شود، وقتی موج به‌دست شما می‌رسد، ضربهٔ موج می‌خواهد طناب را از دست شما خارج کند.

در فصل ۳ در بحث انرژی مکانیکی نوسانگر ساده دیدیم انرژی مکانیکی نوسانگر ساده با مجذور دامنه و مجذور بسامد نوسانگر متناسب است.

وقتی یک موج سینوسی با دامنهٔ A و بسامد f در طناب بلند و کشیده شده‌ای پیش می‌رود، همراه با پیشروی موج، انرژی نیز در طناب پیش می‌رود. توان انتقال انرژی از هر نقطهٔ طناب تابعی از زمان است و با گذشت زمان تغییر می‌کند. مقدار متوسط توان انتقال انرژی از هر نقطهٔ طناب در مدت زمان

یک دوره (T) از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید

$$\overline{P} = 2\pi^2 A^2 f^2 \mu v \qquad (۱۷ـ۴)$$

که در آن، μ، جرم واحد طول طناب و v سرعت انتشار موج در طناب است. **اینکه مقدار متوسط توان انتقال انرژی از هر نقطهٔ طناب با مجذور دامنه و مجذور بسامد موج متناسب است، در مورد انتشار موج سینوسی در سایر محیط‌ها نیز درست است** (مثلاً انتشار امواج سینوسی روی سطح آب یا انتشار امواج صوتی سینوسی در هوا).

بازتاب موج : فرض کنید موجی در یک محیط در حال انتشار است. به نظر شما وقتی این موج به انتهای محیط، یعنی مرز این محیط با محیط دیگر می‌رسد، چه پدیده‌ای رخ می‌دهد؟

وقتی موج، به انتهای محیط می‌رسد، مقداری از انرژی این موج از مرز مشترک دو محیط عبور می‌کند و وارد محیط دوم می‌شود و بقیهٔ آن از مرز مشترک بازتاب شده و به محیط اول برمی‌گردد.

برای بررسی پدیدهٔ بازتاب، باید اولاً، فرض کنیم که تمام انرژی موج از مرز مشترک دو محیط بازتاب شده و به محیط اول برمی‌گردد؛ ثانیاً، اصطکاک ناچیز است و انرژی موج هم تلف نمی‌شود. این بررسی ساده‌تر و آموزنده است.

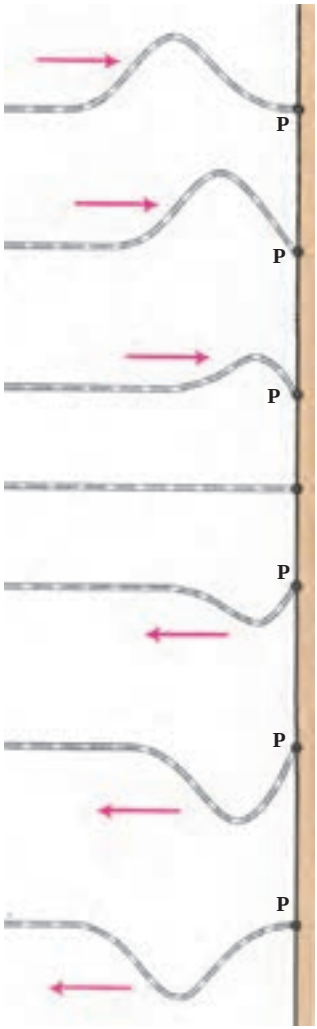
نتیجهٔ به‌دست آمده در این مورد و در مورد دیگر موج‌های مکانیکی، نظیر موج‌های صوتی و موج‌های الکترومغناطیسی، نیز درست است.

بازتاب تپ (موج) از انتهای طناب به نحوهٔ اتصال انتهای طناب بستگی دارد. انتهای طناب، ممکن است به یک دیوار، محکم ثابت شده باشد. در این صورت، انتهای طناب را **انتهای ثابت یا بسته** می‌نامیم (شکل ۴ـ۱۸ـ الف) و همچنین ممکن است انتهای طناب به حلقهٔ بسیار سبکی وصل شده باشد و روی میلهٔ قائمی بدون اصطکاک بتواند، بالا و پایین برود (شکل ۴ـ۱۸ـ ب). در این حالت، انتهای طناب **انتهای آزاد** نامیده می‌شود.

بدین ترتیب، انتهای ثابت نمی‌تواند نوسان کند، درصورتی که انتهای آزاد برای نوسان آزاد است.

الف ـ انتهای ثابت　　ب ـ انتهای آزاد

شکل ۴ـ۱۸

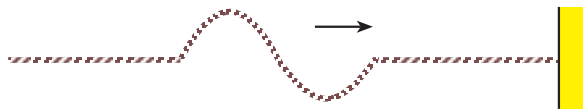


بازتاب از انتهای ثابت : وقتی تپ مطابق شکل ۴ــ۱۹ به انتهای ثابت P می‌رسد، جزء کوچکی از طناب که در مجاورت نقطهٔ P قرار دارد، به آن نیرویی رو به بالا وارد می‌کند تا نقطهٔ P را به نوسان وادارد. نقطهٔ P از طناب، روی دیوار ثابت است و نمی‌تواند جابه‌جا شود. بنا به قانون سوم نیوتون، نقطهٔ P (انتهای ثابت) به طناب، نیرویی رو به پایین وارد می‌کند. این، درست مانند آن است که انتهای طناب را با دست گرفته و رو به پایین بکشیم و در آن تپی رو به پایین ایجاد کنیم. یعنی، انتهای ثابت، در بازتاب تپ، مانند یک چشمهٔ موج عمل می‌کند و یک تپ در خلاف جهت تپ تابشی (فرودی) در طناب ایجاد می‌کند که برجستگی را به فرورفتگی و فرورفتگی را به برجستگی تبدیل می‌کند (به حالت های مختلف شکل ۴ــ۱۹ توجه کنید). تپ باز تابیده، در خلاف جهت تپ تابشی، روی طناب منتشر می‌شود.

شکل ۴ــ۱۹ــ انتهای طناب ثابت است.

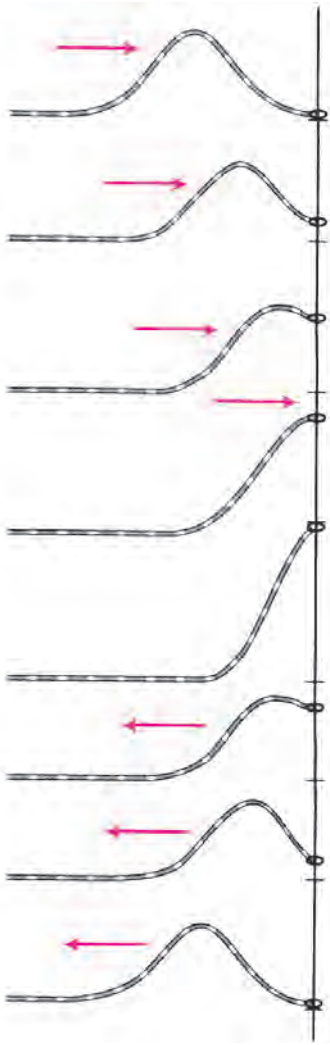
تمرین ۴ـ۷

در شکل ۴ــ۲۰ تپی روی طنابی در حال انتشار است. شکل تپ بازتاب آن را از انتهای ثابت طناب، رسم کنید.



شکل ۴ــ۲۰

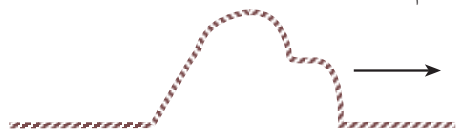
بازتاب از انتهای آزاد : اگر انتهای طناب آزاد باشد، وقتی تپ به آن می‌رسد، انتهای طناب را در جهت خود به‌حرکت درمی‌آورد. در شکل ۴ــ ۲۱ تپ تابشی، انتهای طناب را بالا می‌کشد. در این حالت همان طور که شکل نشان می‌دهد، انتهای طناب به قلّه‌ای می‌رسد که جابه‌جایی آن از وضع تعادل، دو برابر جابه‌جایی سایر نقطه های طناب است. در این حالت، انتهای طناب، مانند چشمهٔ موجی عمل می‌کند که در طناب، تپی در جهت تپ تابشی ایجاد می‌کند که در خلاف جهت آن در طناب منتشر می‌شود. درست مانند آن که انتهای طناب را با دست گرفته و بالا برده و به‌جای اول برگردانیم؛ بنابراین، در انتهای آزاد، برجستگی به‌صورت برجستگی و فرورفتگی به‌صورت فرورفتگی، بازتاب می‌شود.



شکل ۴ــ ۲۱ــ انتهای طناب آزاد است.

تمرین ۴ـ۷

تپی مانند شکل ۴ــ۲۲ در طنابی در حال انتشار است. شکل تپ بازتابی آن را از انتهای آزاد طناب، رسم کنید.



شکل ۴ــ۲۲

۴ــ۵ــ اصل برهم نهی موج ها

وقتی در یک مکان شلوغ و پُر سر و صدا در حال حرکت هستید، صداهای مختلفی از چشمه‌های صوتی متفاوت به گوش شما می‌رسد. هرچند انسان قادر است، گوش خود را روی صدای خاصی متمرکز کند و آن صدا را بشنود، اما صداهای مختلف همگی و با هم در هوا منتشر می‌شوند و انتشار یک صوت، مانع انتشار صوت های دیگر نمی‌شود.

به شکل ۴ــ۲۳ نگاه کنید، در سطح آب دریاچه، موج‌هایی هم‌زمان در حال انتشارند. این موج‌ها، هر یک به‌طور مستقل به انتشار خود ادامه می‌دهند.

شکل ۴ــ۲۳

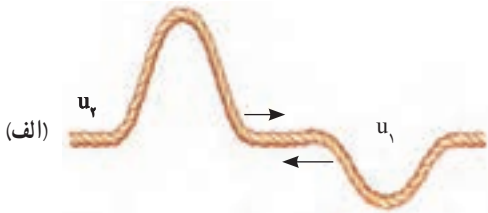
مثال‌های بالا به‌طور عملی نشان‌دهندهٔ اصلی به‌نام **اصل برهم نهی** هستند. مطابق این اصل :

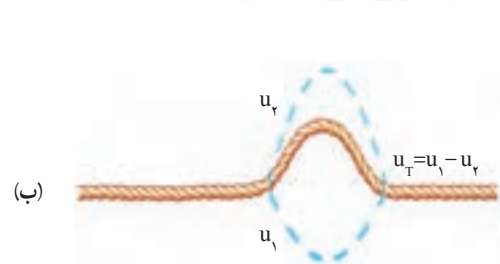
هر موج در حال انتشار، بدون آنکه برای انتشار سایر موج ها مزاحمتی ایجاد کند، از آنها عبور کرده و به انتشار خود ادامه می‌دهد. درست مانند آنکه هیچ موج دیگری در محیط منتشر نمی‌شود. در نقطه‌ای که دو و یا چند موج با هم تلاقی می‌کنند، جابه‌جایی ذرّه‌ای از محیط که در آن نقطه است، برابر برایند جابه‌جایی های حاصل از هریک از موج هاست.

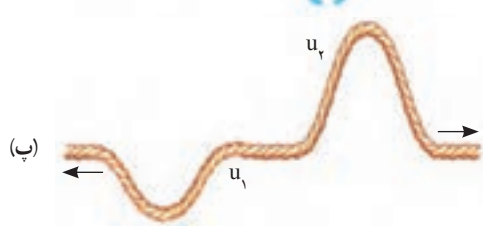
$$\vec{u}_T = \vec{u}_1 + \vec{u}_2 + \cdots \qquad (۴ــ ۱۸)$$

به حالت‌های مختلف شکل ۴ــ۲۴ نگاه کنید. در حالت (الف) دو تپ عرضی در طول طناب به‌طرف یکدیگر در حال انتشارند. این دو تپ در حالت (ب) به یکدیگر رسیده‌اند و چون جابه‌جایی حاصل از دو تپ، هم‌جهت‌اند، برایند آنها برابر مجموع اندازهٔ جابه‌جایی های حاصل از هریک شده است. در حالت (ب) می گوییم : **برهم نهی موج ها سازنده است**. در حالت (پ) دو تپ از یکدیگر عبور کرده و به انتشار خود ادامه داده‌اند.

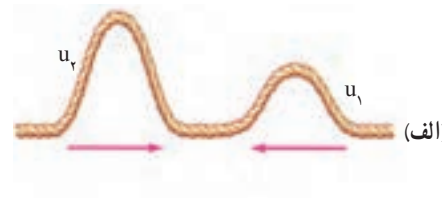
در حالتی که جابه‌جایی ها در خلاف جهت یکدیگر باشند جابه‌جایی برایند برابر تفاضل اندازهٔ جابه‌جایی هایی است که هر تپ به تنهایی در جزیی از طناب که با هم به آن رسیده‌اند، ایجاد می کند. به حالت های مختلف شکل ۴ــ۲۵ توجه کنید. در حالت (ب) می گوییم : **برهم نهی موج ها، ویرانگر است.**

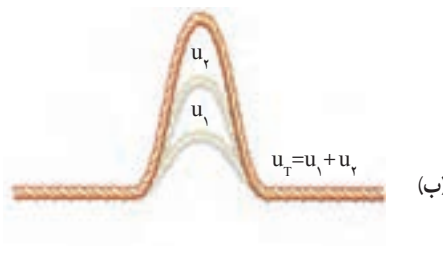


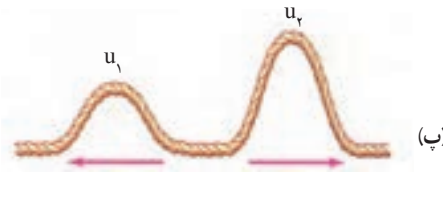




شکل ۴ــ۲۵





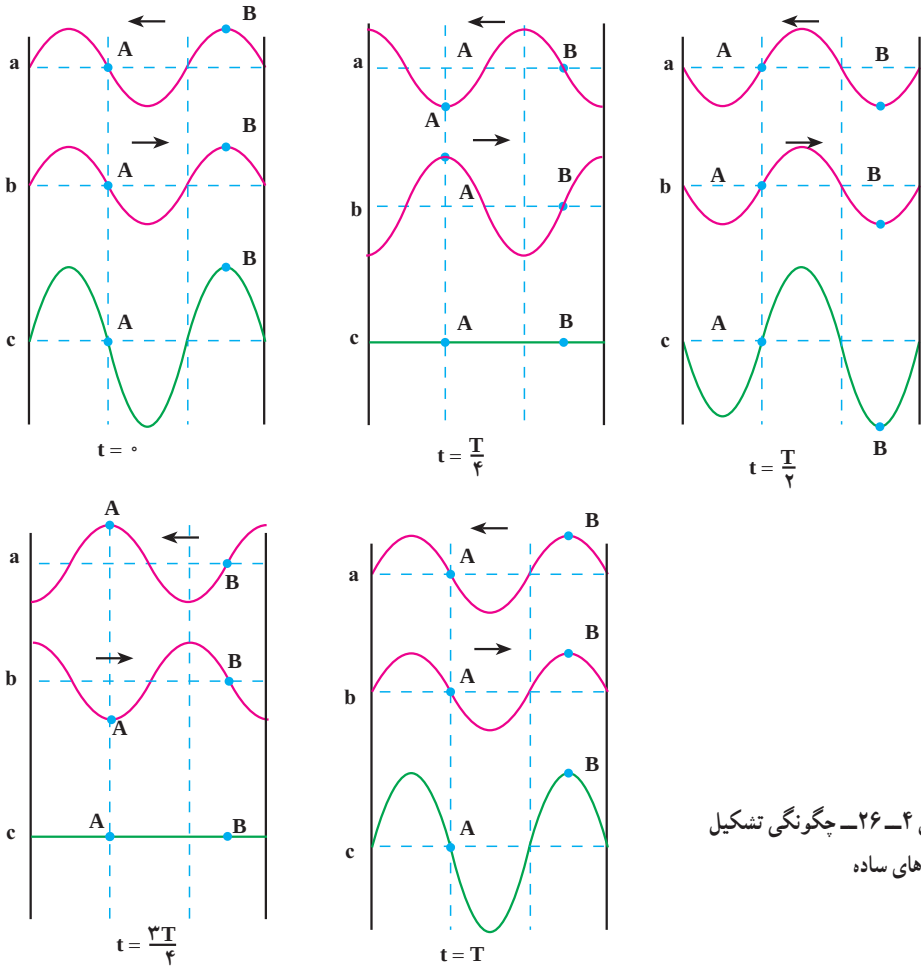


شکل ۴ــ۲۴

برهم نهی موج ها در یک بُعد؛ موج های ایستاده : فرض کنید که دو چشمهٔ موج با دامنه و بسامد یکسان A و f یکی در ابتدا و دیگری در انتهای یک طناب کشیده شده، شروع به نوسان کرده و نوسان‌هایی هم راستا ایجاد کنند. موج های حاصل از این دو چشمهٔ یکسان، به سوی یکدیگر، منتشر می‌شوند. وقتی هر یک از دو موج در تمام طول طناب گسترده شده باشد، به هر جزءِ طناب در هر لحظه دو موج می‌رسد. بنا به اصل برهم نهی، جابه‌جایی هر جزءِ طناب در هر لحظه، برابر برایند جابه‌جایی هایی است که هر یک از دو موج در آن لحظه در آن جزء ایجاد می‌کنند. وضعیت نوسانی هر نقطه بستگی به مکان آن نقطه در طناب دارد. از برهم نهی چنین دو موجی در طناب، شکل خاصی به‌وجود می‌آید که به آن **موج ایستاده** گفته می‌شود.

گره و شکم : به بعضی از نقطه های طناب در هر لحظه دو موج می‌رسد که در آن نقطه جابه‌جایی های یکسان اما در خلاف جهت ایجاد می‌کنند. درنتیجه برهم نهی دو موج در چنین نقطه هایی ویرانگر و جابه‌جایی آنها از وضع تعادل صفر است. به این نقطه ها که همواره ساکن می‌مانند **گره** می‌گویند و آنها را با N نشان می‌دهند. جای گره‌ها در طول طناب، ثابت است.

به حالت‌های مختلف شکل ۴ــ۲۶ توجه کنید. در این حالت‌ها و در هریک از لحظه‌های مشخص شده، موجی را که از راست به چپ روی طناب منتشر می‌شود با a و موجی را که از چپ به راست در حال انتشار است با b و حاصل برهم نهی این دو موج را با c نشان داده و هر یک را جداگانه رسم کرده‌ایم. در واقع، حالت های c وضعیت طناب را هنگامی که موج های a و b روی آن منتشر می‌شوند، در بازه های زمانی $\frac{T}{۴}$ (T دورهٔ موج است) نشان می‌دهد.



شکل ۴ــ۲۶ــ چگونگی تشکیل موج های ساده

در حالت‌های مختلف شکل ۴ــ۲۶ به نقطهٔ A توجه کنید. موج های a و b در هر لحظه به این نقطه، جابه‌جایی هایی هم اندازه اما در خلاف جهت می‌دهند. درنتیجه، همان‌گونه که حالت‌های c در لحظه های مختلف نشان می‌دهد، نقطهٔ A همواره ساکن می‌ماند. نقطهٔ A یک گره است.

پرسش ۴ـ۲

در شکل ۴ــ۲۶ گره‌های دیگری نیز وجود دارند. آنها را مشخص کنید.

به بعضی نقطه‌های دیگر طناب نیز در هر لحظه دو موج می‌رسد، با این تفاوت که در این نقطه‌ها برهم نهی به گونه‌ای است که باعث می‌شود موج برایند، با بیشینهٔ دامنه نوسان کند. به این نقطه‌ها **شکم، یا پادگره**، می‌گویند و آنها را با A نشان می‌دهند. جای شکم‌ها نیز، مانند گره‌ها، ثابت است. در حالت‌های مختلف شکل ۴ــ۲۶ یکی از شکم‌ها را با نام B مشخص کرده‌ایم. نقطهٔ B در مکانی واقع شده است که برهم نهی حاصل از دو موج a و b آن را با بیشینهٔ دامنه به نوسان وا می‌دارد. نقطهٔ B یک شکم است.

پرسش ۴ـ۳

آیا در حالت‌های مختلف شکل ۴ــ۲۶ شکم دیگری نیز وجود دارد؟ اگر پاسخ شما مثبت است، آن را مشخص کنید.

محاسبه نشان می‌دهد که وقتی در طنابی یک موج ایستاده تشکیل می‌شود، فاصلهٔ دو گرهٔ متوالی برابر فاصلهٔ دو شکم متوالی و برابر نصف طول موج است. همچنین فاصلهٔ یک گره و شکم متوالی برابر ربع طول موج است. به همین دلیل برای آن که موج ایستاده در طناب ایجاد شود باید بین طول طناب و طول موج رابطهٔ معینی برقرار باشد. این رابطه به بسامد نوسان‌ها، سرعت انتشار موج در طناب (درنتیجه به نیروی کشش طناب و جرم واحد طول آن) و طول طناب بستگی دارد. علاوه‌بر این کمیت‌ها، این رابطه به ثابت و یا آزاد بودن انتهای طناب نیز بستگی دارد. در ادامه سعی می‌کنیم این رابطه را به‌دست آوریم.

یکی از روش‌های ایجاد دو موجِ کاملاً یکسان که در خلاف جهت یکدیگر در طناب کشیده شده منتشر شوند، آن است که یک‌سر طنابِ را به کمک یک دیاپازون به نوسان درآوریم. این نوسان‌ها از انتهای طناب، بازتاب شده و با موج‌های فرودی بر هم نهاده می‌شوند و موج ایستاده را به‌وجود می‌آورند. برای بررسی، می‌توان دو حالت الف) دو سر طناب ثابت و ب) یک سر ثابت و سر دیگر آزاد را درنظر گرفت. در این کتاب تنها وضعیتی که دو سر طناب ثابت است بررسی می‌شود. در این بررسی فرض شده است که تعداد گره‌ها و شکم‌ها در طول طناب کمترین تعداد ممکن باشد.

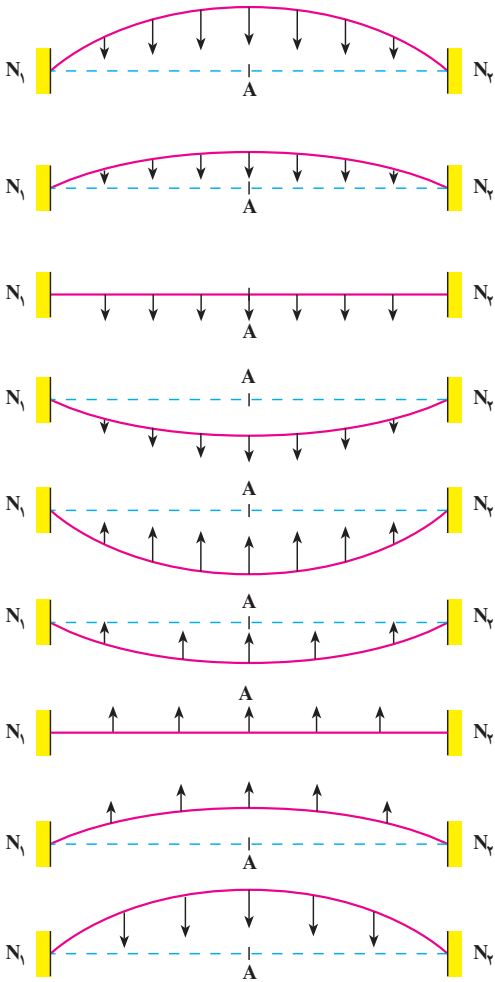
چون انتهای ثابت نمی‌تواند نوسان کند، در دو انتهای(دو سر) طناب، همواره گره ایجاد می‌شود. حالت های مختلف شکل ۴ــ۲۷ وضعیت طناب را در لحظه های مختلف و در یک دوره نشان می‌دهد.

در این شکل ها خط چین N_1AN_2، وضعیت تعادل طناب را نشان می‌دهد.

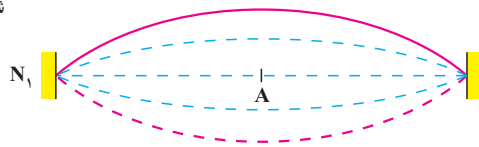
در شکل ۴ــ۲۸ حالت‌های مختلف شکل ۴ــ۲۷ نشان داده شده است.

اگر طول طناب L باشد، با توجه به آنچه که بیان شد، فاصلهٔ دو گرهٔ متوالی برابر نصف طول موج است. در این حالت می‌توان نوشت :

$$L = \frac{\lambda}{2} \qquad (۱۹ــ۴)$$



شکل ۴ــ۲۷



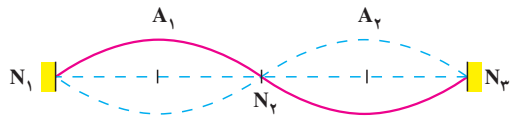
شکل ۴ــ۲۸

اگر بسامد نوسان f و سرعت انتشار موج در طناب v باشد، با استفاده از رابطهٔ $\lambda = \frac{v}{f}$ خواهیم داشت :

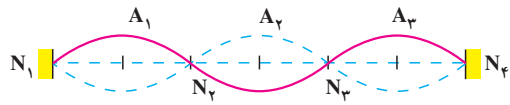
$$2L = \frac{v}{f}$$

$$f_1 = \frac{v}{2L} \qquad (۲۰ــ۴)$$

در آلات موسیقی سیمی (زهی) مانند تار، ویلون و... ارتعاش‌های ایجاد شده توسط مضراب و یا آرشه و... در سیم منتشر می‌شود و از دو انتهای ثابتِ تار بازتاب می‌یابد که از برهم نهی آنها در طول سیم موج ایستاده تشکیل می‌شود. اگر یک سیم (تار مرتعش)، به‌گونه‌ای مرتعش شود که مانند شکل ۴ــ۲۷ یک شکم در وسط و دو گره در طرفین آن تشکیل شود، گفته می‌شود که تار بسامد اصلی خود را تولید کرده است. این بسامد از رابطهٔ ۴ــ۲۰ به‌دست می‌آید. یک طناب (یا یک تار) را می‌توان به‌گونه‌ای به نوسان درآورد که تعداد گره‌ها و شکم های تشکیل شده در طول آن از حالت اصلی بیشتر باشد. شکل های ۴ــ۲۹ و ۴ــ۳۰ وضعیت هایی را نشان می‌دهد که در آنها به‌ترتیب دو و یا سه شکم تشکیل شده است.



شکل ۴ــ۲۹



شکل ۴ــ۳۰

با کمی دقت معلوم می‌شود که : وقتی روی طنابی موج ایستاده تشکیل می‌شود، در حالی که دو انتهای آن ثابت است، **طول طناب مضرب صحیحی از نصف طول موج است.**

$$L = n\frac{\lambda_n}{۲} \qquad (۴ــ۲۱)$$

$$n = ۱,۲,۳,\ldots$$

رابطهٔ اخیر را می‌توان برحسب بسامد به‌صورت زیر نوشت :

$$f_n = \frac{nv}{۲L} = nf_۱ \qquad (۴ــ۲۲)$$

روشن است که به‌ازای $n = ۱$، بسامد اصلی به‌دست می‌آید. اگر $n = ۲$ باشد $(f_۲ = ۲f_۱)$ به آن هماهنگ و یا مُد دوم و به همین ترتیب سوم، چهارم و... گفته می‌شود.

مثال ۴ـ ۷

دو سر طنابی ثابت شده است. وقتی طناب را به ارتعاش درمی‌آوریم، در آن موج ایستاده تشکیل می‌شود. اگر طول طناب ۶۰cm و در آن ۳ گره ایجاد شده باشد؛ الف) طول موج و ب) بسامد نوسان طناب را به‌دست آورید. سرعت انتشار موج در طناب ۲۴۰ m/s است.

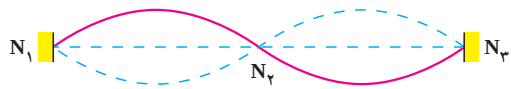
پاسخ

الف) شکل ۴ـ۳۱ وضعیت نوسانی طناب را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، معلوم می‌شود که n = ۲ است. با استفاده از رابطهٔ ۴ـ۲۱ داریم :

$$L = n\frac{\lambda_n}{۲}$$

$$۶۰ = ۲\frac{\lambda_۲}{۲}$$

$$\Rightarrow \lambda_۲ = ۶۰\,cm$$



شکل ۴ـ ۳۱

ب) با استفاده از رابطهٔ $\lambda = \frac{v}{f}$ داریم :

$$۰/۶ = \frac{۲۴۰}{f}$$

$$\Rightarrow f = ۴۰۰\,Hz$$

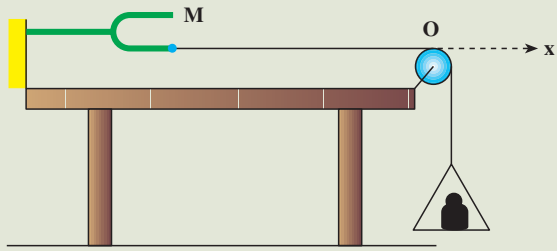
همان‌طور که دیدیم برای آنکه در طول طناب موج ایستاده تشکیل شود، باید رابطهٔ ۴ـ۲۱ برقرار شود. برای برقراری این رابطه می‌توان طول طناب و یا نیروی کششی طناب و درنتیجه سرعت انتشار موج در طناب را تغییر داد.

مطالعهٔ آزاد

اگر در آزمایشگاه دبیرستان شما، دیاپازونی با نوسان پایدار (مانند آنچه که پیشتر توضیح داده شد) موجود است، آزمایش زیر را انجام دهید و موج ایستاده را در طناب مشاهده کنید.

مطابق شکل ۴ـ۳۲ یک سر طناب نازکی را به دیاپازون وصل کنید و سر دیگر آن را از روی قرقرهٔ ثابتی بگذرانید و به آن کفه‌ای آویزان کنید. وزن کفه و وزنهٔ درون آن، نیروی کشش را در طناب ایجاد می‌کند. وقتی دیاپازون را به نوسان درمی‌آورید، در

مطالعهٔ آزاد



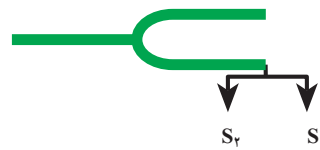
شکل ۴ــ۳۲

طناب موج ایجاد می‌شود. موج ها از انتهای ثابت O بازتاب می‌یابند و با موج های فرودی، برهم نهاده می‌شوند. با تغییر وزنهٔ درون کفه، می‌توانید نیروی کشش طناب و در نتیجه سرعت انتشار موج را در آن تغییر دهید. با این کار، بیشترین مقدار وزنه را که به ازای آن در نقطه های O و M گره و در وسط آنها شکم تشکیل می‌شود، به‌دست آورید. با کاهش وزنهٔ درون کفه، حالت هایی را به‌وجود آورید که تعداد گره و شکم ها بیشتر شوند. با جایگزین کردن دیاپازونی که بسامد دیگری دارد چه تغییری در آزمایش رخ می‌دهد؟ نتیجهٔ این آزمایش را چگونه توجیه می‌کنید؟

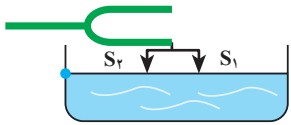
۴ــ۶ــ برهم نهی موج ها در دو بُعد ــ تداخل موج ها در سطح آب

در بخش قبل، برهم نهی دو موج کاملاً یکسان را در طناب یا تار بررسی کردیم. در این بخش به بررسی برهم نهی موج هایی می‌پردازیم که در دو بُعد، مثلاً در سطح آب، منتشر می‌شوند.

با یک دیاپازون، دو چشمهٔ موج S_1 و S_2 را ایجاد می‌کنیم (شکل ۴ــ۳۳). طول سوزن های S_1 و S_2 با هم برابرند.



شکل ۴ــ۳۳

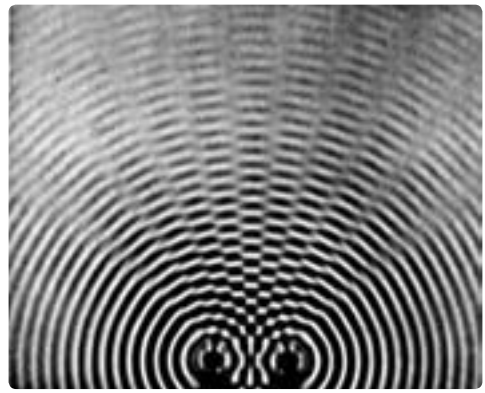


شکل ۴ــ۳۴

اکنون دیاپازون را مطابق شکل ۴ــ۳۴ با سطح آب درون تشتکی در تماس قرار می‌دهیم و برای جلوگیری از بازتاب موج از روی دیواره های تشتک، دور تا دور دیواره را اسفنج نازکی می چسبانیم. در این صورت، موج ها وقتی به دیواره می رسند، توسط اسفنج، جذب می‌شوند. حال اگر دیاپازون را به نوسان درآوریم، موج های دایره‌ای حاصل از هریک از دو چشمهٔ S_1 و S_2 در سطح آب منتشر می‌شوند. در نتیجه به هر ذرّهٔ آب که در سطح آب تشتک قرار دارد، هم‌زمان دو موج می رسد. بنابراین وضعیت نوسانی ذرّه‌های آب، حاصل برهم نهی دو موجی است که با هم به هر ذرّه می‌رسند. در اینجا هم مانند تشکیل موج های ایستاده روی طناب، بعضی از ذرّه های سطح آب در هر لحظه دو موج دریافت می کنند که این دو موج می خواهند در هر ذرّه جابه‌جایی های هم‌اندازه اما در خلاف جهت یکدیگر ایجاد کنند، در نتیجه، برهم نهی دو موج در این نقاط، ویرانگر است و این ذرّه‌ها مانند گره ها، ساکن می‌مانند. مکان بعضی ذرّه‌ها طوری است که برهم نهی دو موجی که در هر لحظه به آنها می‌رسند، سازنده است و ذرّه‌های واقع در این مکان ها مانند شکم ها در موج ایستاده روی طناب، با بیشینهٔ دامنه، نوسان می کنند. در طناب که محیطی یک بُعدی است، تعدادی نقطهٔ گره و شکم به طور متوالی تشکیل می‌شود، امّا در اینجا که سطح آن دو بُعدی است، نقطه های گره مشابه و نیز نقطه های شکم مشابه بی‌شماری وجود دارد.

شکل ۴ــ۳۵ تصویری را نشان می‌دهد که حاصل برهم نهی آزمایشی مشابه آزمایش یادشدهٔ بالا است.

این پدیده را **تداخل موج ها** می نامیم. شرط ایجاد چنین وضعیتی، یعنی شرط ایجاد تداخل موج ها آن است که **دو چشمهٔ موج، هم بسامد و هم فاز** باشند.


شکل ۴ــ ۳۵

۱ــ موج طولی و عرضی را تعریف کنید. تحقیق کنید که چه نوع موجی می‌تواند در جامد، مایع و یا گاز منتشر شود.

۲ــ نوسان‌های حاصل از چشمهٔ موجی با بسامد ۲۰۰Hz با سرعت ۱۰۰ m/s در یک محیط منتشر می‌شود. اگر چشمهٔ موج دیگری با بسامد ۱۵۰Hz را جایگزین چشمهٔ اولی کنیم، نوسان‌های آن با چه سرعتی در این محیط منتشر می‌شود؟ برای پاسخ خود دلیل بیاورید.

۳ــ شکل ۴ــ۳۶ موجی عرضی را در یک لحظه نشان می‌دهد که در جهت مثبت محور x در امتداد طناب تحت کششی در حال انتشار است. روی این شکل چند نقطه از طناب با حروف مشخص شده است.

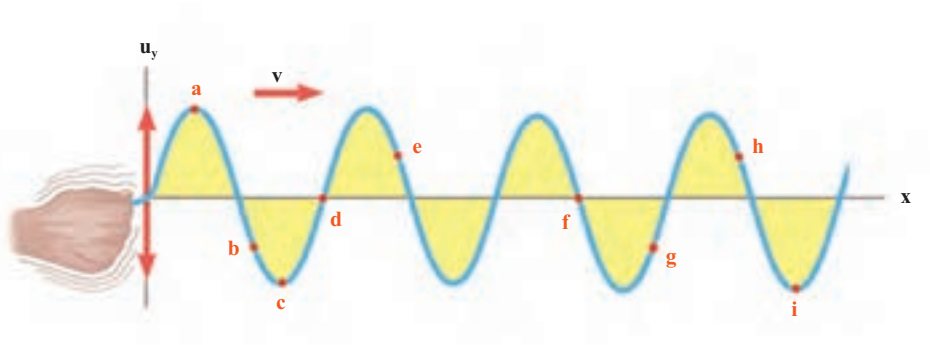
الف) نقاط هم‌فاز را بنویسید.

ب) نقاط با فاز مخالف را بنویسید.

پ) شتاب نوسانی در کدام‌یک از نقاط صفر است؟

ت) جهت سرعت نوسانی کدام‌یک از نقاط برخلاف مثبت محور y است؟

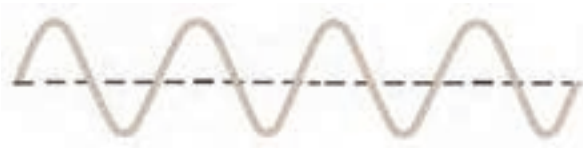
ث) دست کم یک نقطه با نام o روی شکل مشخص کنید که با سرعت بیشینه در جهت y+ در نوسان است.



شکل ۴ــ۳۶

۴ــ سرعت انتشار موج در طنابی به طول L با نیروی کشش F برابر v است. اگر طول طناب را نصف کنیم، اما نیروی کشش را ثابت نگه داریم سرعت انتشار در آن چند برابر می‌شود؟

۵ــ شکل ۴ــ۳۷، نقش یک موج را در یک لحظه نشان می‌دهد. این شکل را در دفتر خود کپی کنید و بر روی آن موج دیگری رسم کنید که طول موج آن دو برابر و دامنهٔ آن نصف باشد. دامنه و طول موج را روی شکل مشخص کنید.



شکل ۴ــ۳۷

۶ــ سیمی به چگالی $۷/۸\,g/cm^۳$ و سطح مقطع $۰/۵mm^۲$ بین دو نقطه با نیروی ۱۵۶N کشیده شده است. سرعت انتشار موج را در این سیم محاسبه کنید.

۷ــ دو موج با بسامدهای ۵۰Hz و ۷۵Hz در یک محیط منتشر می‌شوند.

الف) سرعت انتشار موج دوم چند برابر سرعت انتشار موج اول است؟

ب) طول موج برای موج دوم چند برابر طول موج برای موج اول است؟

۸ــ جرم سیم پیانویی به طول ۰/۸ متر برابر ۶ گرم و نیروی کشش آن ۴۳۲N است. این سیم به‌گونه‌ای مرتعش می‌شود که در طول آن، دو شکم تشکیل می‌شود، بسامد صوتی را که ایجاد می‌شود محاسبه کنید. بسامد اصلی این سیم چند هرتز است؟

موج‌های صوتی

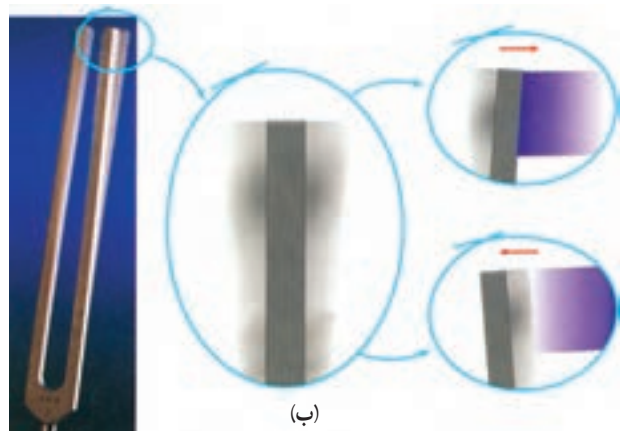
فصل ۵

صوت

۵ــ۱ــ موج صوتی

یکی از مهم‌ترین موج‌هایی که ما در زندگی روزمره با آن سر و کار داریم موج صوتی است. برای مثال، از طریق این موج‌ها با یکدیگر گفت‌وگو می‌کنیم، با به صدا در آوردن بوق ماشین، به عابری که از خیابان عبور می‌کند هشدار می‌دهیم و ... .

برای اینکه بدانیم موج‌های صوتی چگونه ایجاد می‌شوند فرایند تولید صوت به‌وسیلهٔ یک دیاپازون را تشریح می‌کنیم. یک دیاپازون را مطابق شکل ۵ــ۱ــ الف و ب در نظر بگیرید. قبل از ارتعاش دیاپازون هوای مجاور آن در حال تعادل است و فشار و چگالی آن در همه‌جا ثابت و به ترتیب برابر P_0 و ρ_0 است. اکنون دیاپازون را مرتعش می‌کنیم. هنگامی که شاخهٔ آن مطابق شکل ۵ــ۱ــ پ به طرف راست حرکت می‌کند، لایهٔ هوای مجاور خود را متراکم می‌کند و چگالی و فشار آن را نسبت به حالت تعادل افزایش می‌دهد که این لایهٔ متراکم نیز به نوبهٔ خود لایهٔ مجاورش را متراکم می‌کند.



شکل ۵ــ۱

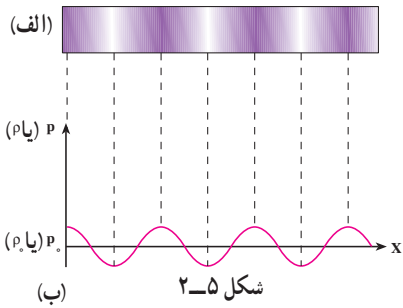
به این ترتیب یک آشفتگی یا تپ ایجاد می‌شود که در آن فشار و چگالی بیشتر از حالت تعادل است. این تپ تراکمی (پرفشار) در هوا منتشر می‌شود. هنگامی که شاخهٔ دیاپازون برمی‌گردد، همان‌طور که در شکل ۵ــ۱ــ ت می‌بینید، لایهٔ هوای مجاور آن منبسط می‌شود و چگالی و فشار این لایه نسبت به حالت تعادل کاهش می‌یابد. این لایهٔ انبساط یافته نیز به‌صورت یک تپ انبساطی (کم‌فشار) در هوا منتشر

می‌شود. بنابراین هنگامی که دیاپازون مرتعش می‌شود تپ‌های متوالی تراکمی و انبساطی (شکل ۵ــ۲) در هوا منتشر می‌کند. نمودار تغییرات فشار (چگالی) برحسب فاصله در یک لحظه از زمان در شکل ۵ــ۲ــ ب نشان داده شده است.

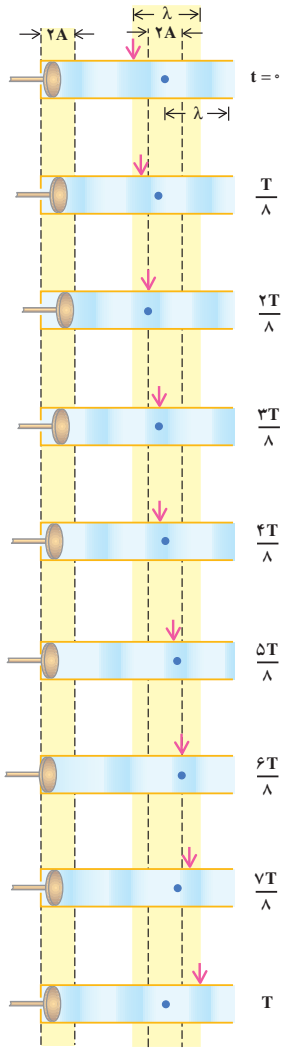
در مورد انتشار موج در طناب یا سطح آب دیدیم که آشفتگی یا تپ به‌صورت برجستگی و یا فرورفتگی بود. اما در حالت انتشار صوت در هوا، آشفتگی یا تپ به‌صورت لایه‌های تراکمی و انبساطی یا لایه‌های پرفشار و کم‌فشار است. همچنین، دیدیم که هنگام انتشار موج در محیط ذره‌های محیط منتقل نمی‌شوند، بلکه حول نقطهٔ تعادل خود حرکت نوسانی انجام می‌دهند؛ مثلاً، در شکل ۴ــ۷ دیدیم که اگر به یک نقطه از محیط نگاه کنیم، این نقطه (که با رنگ قرمز نشان داده شده است) درحین انتشار موج حول حالت تعادل خود نوسان می‌کند، ولی اگر به یک نقطه از موج که با پیکان مشخص شده است نگاه کنیم، این نقطه با سرعت ثابت در محیط حرکت می‌کند.

در انتشار صوت نیز ذرّه‌های هوا منتقل نمی‌شوند بلکه حول نقطهٔ تعادل خود نوسان می‌کنند. لایه‌های تراکمی و انبساطی نیز در اثر این نوسان‌ها به وجود می‌آید.

در شکل ۵ــ۳ انتشار یک موج صوتی در یک لوله، در بازه‌های زمانی $\frac{T}{8}$، نشان داده شده است. در این شکل یکی از ذرّه‌های هوا (محیط) با رنگ آبی مشخص شده است. این نقطه، درحین انتشار موج پس از یک نوسان کامل به محل اولیهٔ خود برمی‌گردد. در حالی اگر یک نقطه از موج را مثلاً در ناحیهٔ متراکم که درشکل ۵ــ۳ با پیکان مشخص شده است درنظر بگیریم، می‌بینیم که با سرعت ثابت در هوا حرکت می‌کند، چون در انتشار صوت ذره‌های هوا در راستای انتشار نوسان می‌کنند. این **موج‌ها طولی‌اند.**



شکل ۵ــ۲

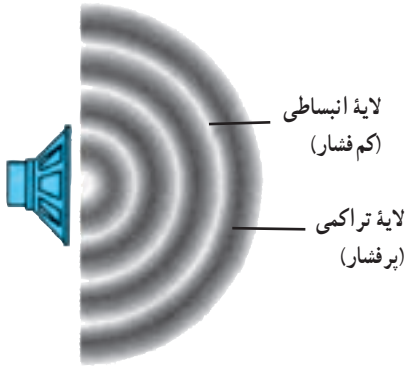


شکل ۵ــ۳

فعالیت ۵ـ۱

مثال‌هایی از انتشار صوت در مایع‌ها و جامدها ذکر کنید.

هر جسم مرتعش در هوا، خود یک چشمهٔ تولید موج‌های صوتی است. چشمهٔ صوت ممکن است به سادگی یک دیاپازون و یا به پیچیدگی حنجرهٔ انسان باشد. در هنگام صحبت در اثر ارتعاش تارهای صوتی در حنجره امواج صوتی در هوا ایجاد می‌شوند.



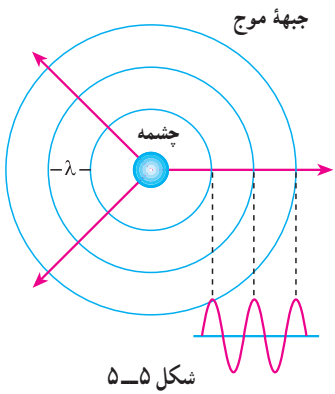
شکل ۵ــ۴

هنگامی که یک چشمهٔ صوت مرتعش می‌شود، صوت ایجاد شده در تمام جهت‌ها منتشر می‌شود. لایه‌های تراکمی (پرفشار) و انبساطی (کم‌فشار) یک موج صوتی که از یک بلندگوی کوچک در هوا منتشر می‌شوند، در شکل ۵ــ۴ نشان داده شده است.

پرسش ۵ـ۱

مثال‌هایی ذکر کنید که نشان دهد امواج صوتی در هوا در تمام جهت‌ها منتشر می‌شوند.

اگر یک چشمهٔ صوت، صوت را به‌طور یکنواخت در تمام جهت‌ها گسیل کند، صوت به‌صورت موج کروی در فضا منتشر می‌شود. جبهه‌های موج این امواج به‌صورت کره‌هایی به‌مرکز چشمهٔ صوت در شکل ۵ــ۵ نشان داده شده‌اند. جبهه‌های موج در این شکل نقاط پرفشار را نشان می‌دهند.



شکل ۵ــ۵

حدود شنوایی انسان

انسان نمی‌تواند هر موج صوتی با هر بسامدی را بشنود بلکه تنها می‌تواند موج‌هایی را که بسامد آنها بین ۲۰ تا ۲۰,۰۰۰ هرتز است، بشنود. بعضی حیوان‌ها مانند سگ‌ها گسترهٔ وسیع‌تری از بسامدها (۱۵ تا ۵۰,۰۰۰ هرتز) را می‌شنوند. خفاش‌ها تا بسامد ۱۰۰,۰۰۰ هرتز را نیز می‌شنوند. موج‌های صوتی با بسامد پایین‌تر از ۲۰ Hz را **فروصوت** و بالاتر از ۲۰,۰۰۰ Hz را **فراصوت** می‌نامند. موج‌های فراصوت کاربردهای فراوانی در پزشکی و صنعت دارند.

۵ــ۲ــ سرعت صوت

در فصل چهارم دیدیم که سرعت انتشار موج در یک محیط (طناب) به ویژگی‌های محیط انتشار موج (کشش طناب و جرم واحد طول آن) بستگی دارد، سرعت صوت نیز به ویژگی‌های فیزیکی محیطی که صوت در آن منتشر می‌شود وابسته است. صوت علاوه بر گازها در مایعات و جامدات نیز منتشر می‌شود. سرعت انتشار صوت در مواد مختلف در جدول ۵ــ۱ داده شده است. چنان که می‌بینید هرچه مادّه متراکم‌تر باشد، سرعت انتشار صوت در آن بیشتر است؛ زیرا در مادهٔ متراکم، مولکول‌ها به یکدیگر نزدیک‌ترند و تپ ایجاد شده می‌تواند در زمان کمتری به نقطهٔ مجاور خود منتقل شود.

جدول ۵ــ۱ــ سرعت صوت در ماده‌های مختلف*

		دما($^\circ C$)	سرعت (m/s)
گازها	اکسیژن	۰	۳۱۶
	هوا	۰	۳۳۱
	هوا	۲۰	۳۴۳
	نیتروژن	۰	۳۳۴
	هلیم	۰	۹۶۵
مایع‌ها	جیوه	۲۵	۱۴۵۰
	آب	۲۵	۱۴۹۸
	آب دریا	۲۵	۱۵۳۱
جامدها	سرب	ــ	۲۱۰۰
	طلا	ــ	۳۰۰۰
	آهن	ــ	۵۰۰۰ ــ ۶۰۰۰
	شیشه	ــ	۵۰۰۰ ــ ۶۰۰۰

* در مواردی که تغییر سرعت با دما قابل ملاحظه نیست، دمای مربوط به اندازه‌گیری در جدول ذکر نشده است.

می‌توان نشان داد که سرعت انتشار صوت در گازها از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \qquad (۵ــ۱)$$

که در آن T دمای گاز برحسب کلوین، R ثابت عمومی گازها و M جرم مولکولی گاز است. γ نیز ضریب اتمیسیتهٔ گاز نام دارد که برای گازهای مختلف در جدول ۵ــ۲ داده شده است.

جدول ۵ــ۲ــ ظرفیت گرمایی مولی در حجم و فشار ثابت γ و M

	گاز	γ	M g/mol
تک‌اتمی	He	۱/۶۷	۴
	Ar	۱/۶۷	۴۰
دو اتمی	H_2	۱/۴۱	۲
	N_2	۱/۴۰	۲۸
	O_2	۱/۳۹	۳۲

مثال ۵ــ۱

سرعت انتشار صوت را در هوا و در دمای $27^\circ C$ به‌دست آورید (برای هوا، $M = 29 g$ ، $\gamma = 1/4$ و $R \simeq 8/3\ J/mol.K$)

پاسخ

با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۱ داریم :

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} = \sqrt{\frac{1/4(8/3)(273+27)}{29\times 10^{-3}}} \simeq 347\ m/s$$

تمرین ۵ـ۱

با استفاده از اطلاعات جدول ۵ــ۲ سرعت صوت را در گازهای اکسیژن، نیتروژن و هلیم در دمای صفر درجهٔ سلسیوس محاسبه و نتیجهٔ به‌دست آمده را با مقادیر جدول ۵ــ۱ مقایسه کنید.

مطالعهٔ آزاد

کاربرد موج‌های صوتی

برای تعیین محل جسم‌هایی که زیر آب قرار دارند، از بازتاب موج‌های صوتی استفاده می‌شود. این روش که به نام روش پژواک تپ معروف است کاربردهای پزشکی نیز دارد.

اساس این روش آن است که یک موج صوتی را به عمق آب می‌فرستند و با یک آشکارساز، بازتاب یا پژواک آن را اندکی بعد دریافت می‌کنند. سپس زمان رفت و برگشت موج را به دقت اندازه می‌گیرند و از روی آن فاصلهٔ جسمی را که موج را بازتابانده است تعیین می‌کنند. (سرعت صوت در آب مشخص است) با این روش عمق دریاها، محل صخره‌های زیرآب، محل کشتی‌های غرق شده، زیردریایی‌ها و حتی محل تجمع گروهی از ماهی‌ها را که باهم حرکت می‌کنند می‌توان تعیین کرد.

با این روش می‌توان ساختار داخلی زمین را نیز مشخص کرد. برای این منظور یک انفجار زیرزمینی ایجاد می‌کنند و با آشکارسازی بازتاب موج‌های تولید شده در اثر انفجار می‌توان ساختار نواحی مختلف زمین را تعیین کرد. این روش در اکتشاف نفت و موادمعدنی به کار می‌رود.

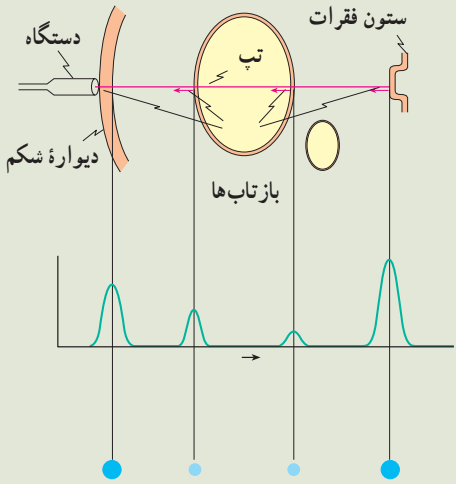
در کاربردهای بالا اغلب از بسامدهای بیش از ۲۰ kHz که در ناحیهٔ فراصوتی قرار دارد استفاده می‌شود؛ زیرا این موج‌ها علاوه بر این که قابل شنیدن نیستند دارای طول موج کوتاه‌اند و اجسام با ابعاد کوچک را می‌توان با استفاده از آنها آشکار کرد.

در پزشکی هم از این موج‌ها برای از بین بردن بافت‌های ناخواسته و یا اجسام نامطلوب در بدن (مانند غده‌ها و یا سنگ‌های کلیه) استفاده می‌شود. این موج‌ها بر روی مادهٔ ناخواسته متمرکز می‌شوند؛ برای مثال، تابش متمرکز این موج‌ها بر روی سنگ کلیه

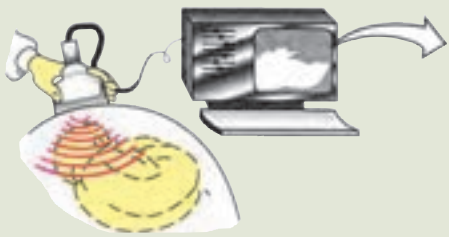
باعث می‌شود که سنگ به پاره‌های کوچک شکسته شده و به تدریج از بدن دفع گردند. بدون این که احتیاجی به عمل جراحی باشد.

از موج‌های فراصوتی همچنین در تشخیص بیماری نیز استفاده می‌شود. بدین ترتیب که یک تپ فراصوتی به داخل بدن بیمار فرستاده می‌شود. این تپ از مرزها و فصل مشترک‌های بین اعضای داخل بدن بازتاب می‌یابد که با آشکارسازی آن می‌توان اطلاع لازم را در مورد بیماری عضو موردنظر کسب کرد. این روش برای تشخیص محل غده‌ها و سایر عوامل غیرعادی در بدن، عملکرد قلب و دریچه‌های آن، وضعیت جنین، سنگ کلیه و غیره به کار می‌رود.

روش کار به این ترتیب است که با دستگاه خاصی مانند بلندگو، تپ الکتریکی را به ارتعاش‌های مکانیکی تبدیل می‌کنند و به این وسیله یک تپ صوتی ایجاد می‌شود. بخشی از این تپ از فصل مشترک بافت‌های مختلف در بدن بازتابیده می‌شود (شکل ۵ــ۶). آشکارسازی تپ‌های بازتابیده، با همان دستگاه صورت می‌گیرد که موج‌های صوتی را به تپ‌های الکتریکی تبدیل می‌کند. تپ‌ها را می‌توان روی یک مونیتور مشاهده کرد (شکل ۵ــ۷). تصویر یک جنین که با استفاده از فراصوت تهیه شده نیز در این شکل نشان داده شده است.



شکل ۵ــ۶



شکل ۵ــ۷

۵ــ۳ــ لوله‌های صوتی

پیش از این دیدیم که وقتی یک موج عرضی در طنابی که یک انتهای آن ثابت است ایجاد می‌کنیم، این موج از انتهای ثابت بازتابیده می‌شود و از برهم نهی موج‌های فرودی و بازتابی موج ایستاده تشکیل می‌شود. همچنین، در انتهای ثابت که جابه‌جایی طناب صفر است گره تشکیل می‌شود، ولی اگر انتهای طناب آزاد باشد در آن‌جا شکم ایجاد می‌شود.

با موج‌های طولی نیز می‌توان موج ایستاده تشکیل داد. این موج را می‌توان در یک فنر و یا یک ستون هوا (مثلاً هوای داخل یک لوله) ایجاد کرد. در این بخش، چگونگی ایجاد موج‌های ایستاده را در ستون هوای داخل یک لوله مورد بررسی قرار می‌دهیم. چنین لوله‌ای را لولهٔ صوتی می‌نامند.

هنگامی که در دهانهٔ لولهٔ صوتی، هوا می‌دمیم، در هوای داخل آن، موج صوتی منتشر می‌شود. این موج از دو انتهای لوله بازتابیده می‌شود و از برهم نهی موج‌های فرودی و بازتابیده، موج ایستاده تشکیل می‌شود. حال اگر انتهای لوله بسته باشد، چون مولکول‌های هوا نمی‌توانند در این انتها نوسان طولی داشته باشند بنابراین در انتهای بسته گره ایجاد می‌شود. اگر، برعکس، انتهای لوله باز باشد مولکول‌ها می‌توانند آزادانه در آن نوسان کنند و در صورتی که قطر لوله در مقایسه با طول موج صوت کوچک باشد، در این انتها شکم تشکیل می‌شود. بسته به این که یک انتهای لولهٔ صوتی باز و انتهای دیگر بسته و یا این که هر دو انتهای آن باز باشد، دو حالت متفاوت به‌وجود می‌آید که به بررسی آنها می‌پردازیم :

الف) یک انتهای لوله باز و انتهای دیگر آن بسته است. در این حالت در انتهای باز شکم و در انتهای بسته گره تشکیل می‌شود. در ساده‌ترین حالت، مطابق شکل ۵ــ۸ــ الف فقط یک گره و شکم در داخل لوله تشکیل می‌شود (در این شکل موج‌های صوتی داخل لوله برای سهولت نمایش به صورت موج‌های عرضی نشان داده شده‌اند. بیشینهٔ دامنه در این شکل حالتی را نشان می‌دهد که در آن جابه‌جایی ذرّات لایهٔ هوا بیشینه است) در این حالت طول لوله، L، با فاصلهٔ گره تا شکم برابر است یعنی :

$$L = \frac{\lambda_1}{4} \qquad (۵ــ۲)$$

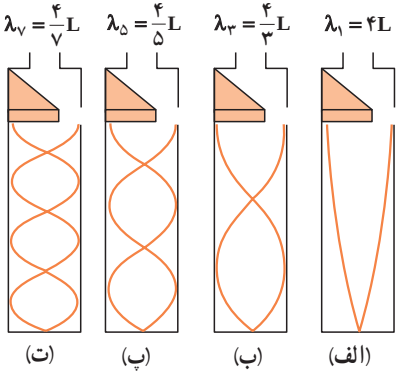
و یا طول موج صوت برابر است با :

$$\lambda_1 = 4L \qquad (۵ــ۳)$$

اگر سرعت صوت در داخل لوله v باشد، بسامد این صوت، f_1، از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L} \qquad (۵ــ۴)$$

موج ایستادهٔ ایجاد شده در این حالت، کمترین بسامد را دارد و **صوت اصلی** نامیده می‌شود. مضرب‌های درست این صوت را **هماهنگ‌های صوت اصلی** می‌نامند. همان‌طور که در تار مرتعش دیدیم، این هماهنگ‌ها هنگامی ایجاد می‌شوند که مطابق شکل ۵ــ۸ــ ب، پ، ... تعداد بیشتری گره و شکم



شکل ۵ــ ۸

در لوله تشکیل می‌شود یعنی ممکن است در داخل لوله دوگره، سه گره، ... n گره تشکیل شود. در این صورت، همان‌گونه که در این شکل می‌بینید، طول لوله به ترتیب برابر است با $\frac{\lambda_3}{4}3$ ، $\frac{\lambda_5}{4}5$ ، ... ، $\frac{\lambda_{2n-1}}{4}(2n-1)$ و در حالی که n گره در داخل لولهٔ صوتی تشکیل می‌شود، طول موج مربوط به ۱ – ۲n امین هماهنگ با رابطهٔ زیر داده می‌شود :

$$\lambda_{2n-1} = \frac{4L}{2n-1} \quad , \quad n = 1,2,3,... \qquad (۵ــ۵)$$

و بسامد این صوت برابر است با :

$$f_{2n-1} = \frac{(2n-1)v}{4L} = (2n-1)f_1 \quad , \quad n = 1,2,3,... \qquad (۵ــ۶)$$

ملاحظه می‌شود در لوله‌ای که یک انتهای آن بسته است فقط هماهنگ‌های فرد صوت اصلی ایجاد می‌شود؛ یعنی، بسامد امواج ایستاده در داخل این لوله به صورت f_1، $3f_1$، $5f_1$ و ... است. این حالت‌ها نوسان‌های طبیعی هوای داخل لولهٔ صوتی که یک انتهای آن بسته است به‌شمار می‌روند.

مثال ۵ــ۲

در یک لولهٔ صوتی که یک انتهای آن بسته است، می‌خواهیم یک صوت اصلی با بسامد ۳۴۰ Hz ایجاد کنیم. الف) طول لوله باید چه‌قدر باشد؟ ب) بسامد هماهنگ‌های سوم و پنجم را حساب کنید. سرعت صوت در هوا را ۳۴۰ m/s فرض کنید.

پاسخ

الف) با استفاده از رابطهٔ $v = \lambda f$ داریم :

$$\lambda_1 = \frac{v}{f_1} = \frac{340}{340} = 1\ m$$

در این صورت با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۲ طول لوله برابر است با :

$$L_1 = \frac{\lambda}{4} = 0/25\ m$$

ب) با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۶ برای $n = 2$ و $n = 3$ داریم :

$$f_3 = (2\times 3-1)\times 340 = 1700\ Hz \quad و \quad f_5 = (2\times 2-1)340 = 1020\ Hz$$

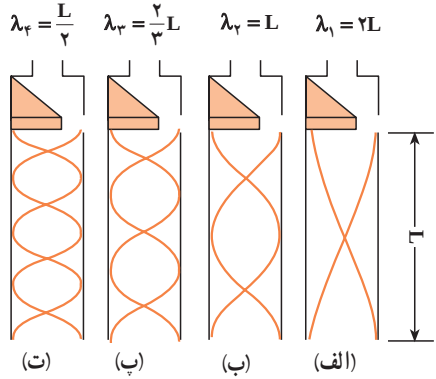
ب) هر دو انتهای لوله باز است. در این حالت در هر دو انتها شکم تشکیل می‌شود. برای صوت اصلی، همان‌طور که در شکل ۵ــ۹ــ الف نشان داده شده است، دو شکم در دو انتها و یک گره در وسط لوله تشکیل می‌شود. در این حالت طول لوله برابر فاصلهٔ دو شکم است. در این‌صورت داریم :

$$L = \lambda_1/2 \qquad (۵ــ۷)$$

یعنی، طول موج صوت برابر با $\lambda = 2L$ است.

در نتیجه بسامد اصلی برابر است با :

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L} \qquad (۵ــ۸)$$



شکل ۵ــ۹

هماهنگ‌های دیگر این صوت هنگامی پدیدار می‌شوند که مطابق شکل ۵ــ۹ــب، پ و... در داخل لوله دو گره $(L = 4\frac{\lambda_2}{4})$، سه گره $(L = 6\frac{\lambda_3}{4})$، ... ، n گره $(L = 2n\frac{\lambda_n}{4})$ تشکیل شود. طول موج صوت فرودی هنگامی که n گره تشکیل شده است، از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad n = 1,2,\ldots \qquad (۵ــ۹)$$

و بسامد این صوت برابر است با :

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n\frac{v}{2L} = nf_1 \qquad n = 1,2,\ldots \qquad (۵ــ۱۰)$$

ملاحظه می‌کنید که تمام هماهنگ‌ها در لوله‌ای که هر دو انتهای آن باز است ایجاد می‌شوند. در چنین لوله‌ای، بسامد نوسان‌های طبیعی هوای داخل آن به صورت f_1، $2f_1$، $3f_1$ و ... است.

تمرین ۵ــ۲

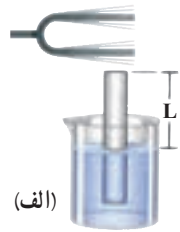
بسامد صوت اصلی و هماهنگ‌های دوم و سوم را در یک لولهٔ صوتی به طول ۱m که هر دو انتهای آن باز است تعیین کنید (سرعت صوت را در هوا ۳۴۰ m/s فرض کنید).

در قسمت قبل دیدیم که برای ایجاد موج‌های ایستاده، باید در دهانهٔ لولهٔ صوتی بدمیم. در واقع، از این طریق به راحتی نمی‌توان امواج ایستاده در لوله ایجاد کرد. روش مناسب و مؤثر برای انجام این کار این است که از پدیدهٔ تشدید استفاده کنیم. در فصل سوم با پدیدهٔ تشدید آشنا شدیم و دیدیم که اگر یک نوسانگر را با یک نیروی دوره‌ای به نوسان درآوریم، هنگامی که بسامد نیرو با بسامد طبیعی نوسانگر برابر باشد، تشدید رخ می‌دهد و در این حالت، بیشترین انرژی ممکن به نوسانگر منتقل می‌شود. برای ایجاد موج‌های ایستاده در لولهٔ صوتی نیز می‌توانیم از این روش استفاده کنیم و هوای داخل لوله را با اعمال یک نیروی دوره‌ای به آن، به نوسان درآوریم. برای این کار کافی است که یک دیاپازون را در نزدیکی دهانهٔ لوله به نوسان درآوریم. اگر بسامد نوسان این دیاپازون با هریک از بسامدهای طبیعی لولهٔ صوتی برابر باشد، تشدید رخ خواهد داد. بدین وسیله می‌توان موج ایستاده با بسامد موردنظر را در لولهٔ صوتی ایجاد کرد.

فعالیت ۵ـ۲

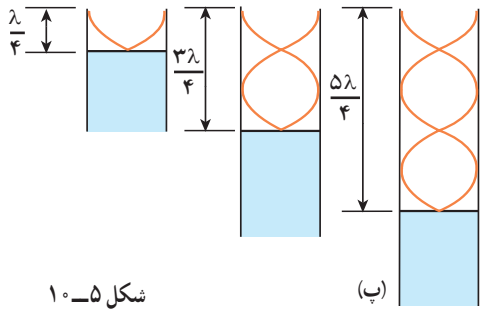
در شکل ۵ــ۱۰ــ الف و ب می‌توان با تغییر مکان لیوان یا لوله، طول لولهٔ صوتی را تغییر داد.

با توجه به شکل پ توضیح دهید که در هریک از سه حالت شکل پ چگونه موج ایستاده تشکیل می‌شود.



(الف)

(ب)



(پ)

شکل ۵ــ۱۰

فعالیت ۵ـ۳

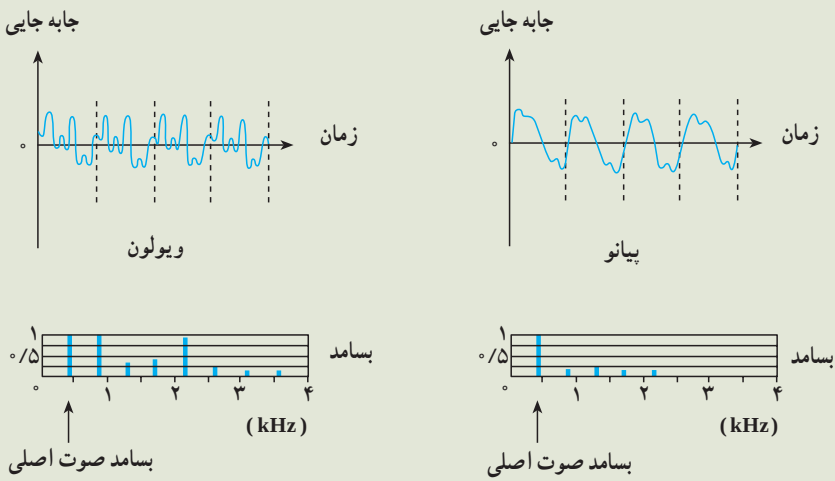
با استفاده از یک لولهٔ صوتی، آزمایشی را برای اندازه‌گیری سرعت صوت در هوا طراحی کنید.

مطالعهٔ آزاد

صوت‌های موسیقی

صوتی را که می‌شنویم به خصوصیت‌های گوش و ساز و کار شنوایی و نیز ویژگی‌های فیزیکی صوت بستگی دارد. معمولاً صوتی را که انسان با دستگاه شنوایی خود درک می‌کند برحسب سه مشخصهٔ بلندی، ارتفاع و طنین بیان می‌کنند. برای تعریف این مشخصه‌ها به بررسی صوتی که یک تار مرتعش تولید می‌کند می‌پردازیم.

هنگامی که یک تار را مرتعش می‌کنیم، تنها هماهنگ اوّل آن ایجاد نمی‌شود، بلکه هماهنگ‌های دیگر آن نیز به‌وجود می‌آیند و از برهم نهی این هماهنگ‌ها یک موج مرکب ایجاد می‌شود. آنچه که ما پس از مرتعش کردن یک تار می‌شنویم از این موج مرکب حاصل می‌شود. در شکل ۵ــ ۱۱ نسبت موج صوتی حاصل از پیانو و ویولون نشان داده شده است. در این شکل، نسبت دامنهٔ هماهنگ‌ها به دامنهٔ صوت اصلی نیز آمده است. در هر دو مورد بسامد صوت اصلی ۴۴۰ هرتز است؛ ولی تعداد و دامنهٔ هماهنگ‌هایی که در ساختن این موج مرکب سهیم‌اند در این دو مورد متفاوت است. در نتیجه شکل موج مرکب حاصل با یکدیگر فرق می‌کنند. اکنون به توصیف مشخصه‌های صوت می‌پردازیم. طنین صوت به‌شکل موج مرکب بستگی دارد. یعنی طنین به نوع، تعداد و دامنهٔ هماهنگ‌هایی که ایجاد شده‌اند وابسته است. ارتفاع صوت با بسامد موج اصلی که موج مرکب از آن ساخته می‌شود تعیین می‌شود و بلندی صوت، همان‌طور که دیدیم، به شدت صوت و خصوصیت‌های شنوایی شنونده بستگی دارد.



شکل ۵ ــ ۱۱

اکنون به توصیف صوت‌های موسیقی می‌پردازیم. برای این منظور لازم است چند مفهوم را تعریف کنیم.

۱ــ صوت موسیقی یا نت، صوتی است که (مانند شکل ۵ــ ۱۱) از ارتعاش‌های منظم تشکیل شده است و اثر خوشایندی بر گوش انسان دارد.

۲ــ فاصلهٔ موسیقی، نسبت بسامد دو نت را فاصلهٔ موسیقی می‌نامند. تجربه نشان می‌دهد که هر فاصله‌ای برای انسان خوشایند نیست.

۳ــ گام موسیقی، مجموعه‌ای از چند نت است که فاصلهٔ آنها برای گوش خوشایند است. گام‌های متفاوتی در موسیقی وجود دارد. اکنون به توصیف گام طبیعی (زارلن) می‌پردازیم.

گام طبیعی از هشت نت $do_1, re, mi, fa, sol, la, si, do_2$ تشکیل شده است که فاصلهٔ آنها از یک نت مبنا (do_1) که کمترین بسامد را دارد، به‌صورت زیر است:

$$\frac{re}{do_1}=\frac{۹}{۸}, \frac{mi}{do_1}=\frac{۵}{۴}, \frac{fa}{do_1}=\frac{۴}{۳}, \frac{sol}{do_1}=\frac{۳}{۲}, \frac{la}{do_1}=\frac{۵}{۳}, \frac{si}{do_1}=\frac{۱۵}{۸}$$ و $\frac{do_2}{do_1}=۲$، بسامد do_2 دو برابر بسامد do_1 است و اکتاو do_1 نامیده می‌شود. اگر do_2 رانت مبنا بگیریم، با رعایت فاصله‌های فوق می‌توان گام دوم را ساخت. به همین ترتیب

می‌توان بر مبنای $do_۲$ که اکتاو $do_۲$ است گام سوم را ساخت و به همین ترتیب ادامه داد.

به‌عنوان مثال، اگر بسامد نت مبنا را ۶۵/۲۵ هرتز اختیار کنیم، با استفاده از نسبت‌های بالا می‌توانیم بسامد نت‌های دیگر را به‌دست آوریم؛ در این صورت داریم:

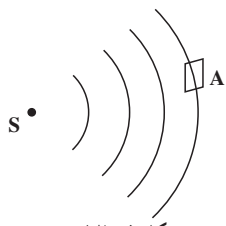
$$\frac{re_۱}{do_۱} = \frac{۹}{۸}$$

$$re_۱ = \frac{۹}{۸} do_۱ = ۷۳/۴۱ Hz$$

به همین ترتیب بسامدهای ۸۱/۵۶ ، ۸۷ ، ۹۷/۸۸ ، ۱۰۸/۷۵ و ۱۲۲/۳۴ هرتز به‌ترتیب برای $me_۱$، $fa_۱$، $sol_۱$، $la_۱$، $si_۱$ به‌دست می‌آیند. برای $do_۲$ که اکتاو $do_۱$ است بسامد ۱۳۰/۵ هرتز محاسبه می‌شود. اکنون می‌توانیم بر مبنای $do_۲$ گام بعدی را بسازیم. برای نتهای این گام به ترتیب مقدارهای ۱۴۶/۸۱ ، ۱۶۳/۱۳ ، ۱۷۴ ، ۱۹۵/۷۵ ، ۲۱۷/۵ ، ۲۴۴/۶۹ هرتز به‌دست می‌آیند. هریک از این نت‌ها اکتاو نت متناظر در گام اول است (چرا؟) به همین ترتیب برای گام سوم به‌ترتیب مقدارهای ۲۶۱ ، ۲۹۳/۶ ، ۳۲۶/۲۵ ، ۳۴۸ ، ۳۹۱/۵ ، ۴۳۵ ، ۴۸۹/۳۸ هرتز به‌دست می‌آیند. این مثال، نت‌های گام طبیعی را بر مبنای قرارداد $la_۳ = ۴۳۵ Hz$ به‌دست می‌دهد. اکنون به‌عنوان تمرین تعیین کنید که بسامدهای ۱۰۴۴ و ۸۷۰ هرتز بسامد چه نت‌هایی هستند و در کدام گام قرار دارند؟

۵ــ۴ــ شدت صوت

در بخش ۴ــ۴ دیدیم که موج‌ها (در طناب یا سطح آب) با خود انرژی حمل می‌کنند و این انرژی با مجذور دامنه و مجذور بسامد موج متناسب است. این بیان در مورد موج‌های صوتی نیز درست است. در شکل ۵ــ۱۲ چشمهٔ صوتی S را می‌بینید که موج‌های صوتی را در فضا منتشر می‌کند. فرض کنید انرژی E در زمان t به سطح A که عمود بر راستای انتشار صوت است برسد.



شکل ۵ــ۱۲

شدت صوت بنا به تعریف عبارت است از : مقدار انرژی‌ای که در واحد زمان به واحد سطح عمود بر راستای انتشار می‌رسد؛ درنتیجه، شدت صوت I در مکانی که سطح A قرار گرفته با رابطهٔ زیر بیان می‌شود :

$$I = \frac{E}{At} \qquad (۵ــ۱۱)$$

رابطهٔ ۵ــ۱۱ را می‌توان با استفاده از تعریف توان ($P=\frac{E}{t}$) به‌صورت زیر نوشت :

$$I=\frac{P}{A} \qquad (۵ــ۱۲)$$

یکای شدت موج در SI وات بر مترمربع (W/m^2) است.

مثال ۵ــ۳

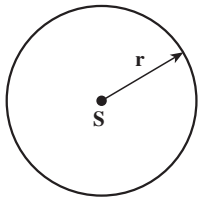
به سطح یک میکروفون که مساحت آن $3cm^2$ است در مدت ۵ ثانیه $1/5\times10^{-11}J$ انرژی صوتی می‌رسد. شدت صوت در سطح میکروفون چه مقدار است؟ (سطح میکروفون عمود بر راستای انتشار صوت است).

پاسخ

با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۱۱ داریم :

$$I=\frac{E}{At}=\frac{1/5\times10^{-11}}{3\times10^{-4}\times5}=10^{-8}\ W/m^2$$

اکنون ممکن است این پرسش پیش بیاید که : چرا هرچه از چشمهٔ صوت دور می‌شویم صدا ضعیف‌تر می‌شود؟ برای پاسخ دادن به این سؤال چشمهٔ صوت S را در نظر می‌گیریم که موج‌های کروی در فضا ایجاد می‌کند (شکل ۵ــ۱۳).

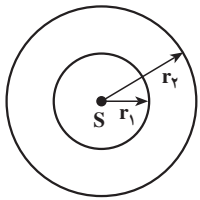


شکل ۵ــ۱۳

فرض کنید توان چشمهٔ صوت P باشد و چشمه در تمام جهت‌های فضا، موج را به‌صورت یکسان گسیل کند. شدت صوت در روی کره‌ای به شعاع r چه‌قدر است؟ اگر از اتلاف انرژی صوتی در هوا صرف‌نظر کنیم، در واحد زمان انرژی P به سطح کره‌ای به مساحت $4\pi r^2$ می‌رسد. درنتیجه شدت صوت بر روی این کره برابر است با :

$$I=\frac{P}{4\pi r^2} \qquad (۵ــ۱۳)$$

این رابطه نشان می‌دهد که با دور شدن از چشمهٔ S شدت صوت کاهش می‌یابد. حال برای این که ببینیم این کاهش به چه نسبتی صورت می‌گیرد، دو جبههٔ موج کروی به شعاع‌های r_1 و r_2 در نظر می‌گیریم (شکل ۵ــ۱۴).



شکل ۵ــ۱۴

انرژی‌ای که در واحد زمان به سطح کره‌ای با شعاع r_1 می‌رسد (P_1) با انرژی‌ای که در واحد زمان به سطح کره‌ای با شعاع r_2 می‌رسد (P_2) برابر است. بنابراین داریم :

$$P_1 = P_2 \qquad (۱۴_۵)$$

شدت صوت روی سطح کرهٔ ۱ برابر است با :

$$I_1 = \frac{P_1}{۴\pi r_1^2}$$

و روی سطح کرهٔ ۲ برابر است با :

$$I_2 = \frac{P_2}{۴\pi r_2^2}$$

با جای‌گذاری این رابطه‌ها در رابطهٔ ۵ــ۱۴ داریم :

$$۴\pi r_1^2 I_1 = ۴\pi r_2^2 I_2$$

و یا

$$\frac{I_2}{I_1} = (\frac{r_1}{r_2})^2 \qquad (۱۵_۵)$$

همان‌طور که این رابطه نشان می‌دهد، شدت صوت با مجذور فاصله از چشمهٔ صوت نسبت عکس دارد.

مثال ۵ــ۴

شدت صوت یک سخنران در یک سالن در فاصلهٔ ۴ متری $۱۰^{-۶}\ W/m^2$ است. شدت صوت او در فاصلهٔ ۲۰ متری چه‌قدر است؟

پاسخ

با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۱۵ داریم :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

با جای‌گذاری مقادیر r_2 و r_1 و I_1 داریم :

$$\frac{I_2}{۱۰^{-۶}} = (\frac{۴}{۲۰})^2 = \frac{۱}{۲۵}$$

$$I_2 = ۴ \times ۱۰^{-۸}\ W/m^2$$

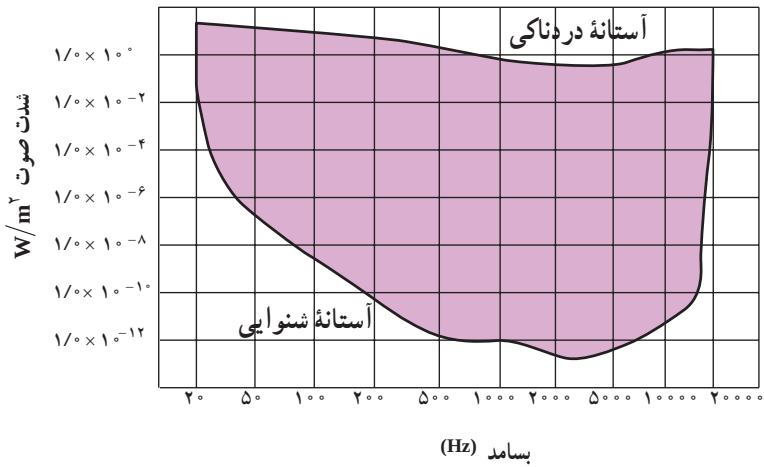
یعنی در مقایسه با فاصلهٔ ۴ متری، شدت صوت در فاصلهٔ ۲۰ متری ۲۵ مرتبه کاهش می‌یابد. به نظر شما آیا این بدان معنا است که صوت در فاصلهٔ ۴ متری ۲۵ بار بلندتر از صوت در فاصلهٔ ۲۰ متری شنیده می‌شود؟

شدت صوت برای برخی صوت‌ها در جدول ۵ــ۳ آمده است.

جدول ۵ــ۳ــ شدت صوت و تراز شدت صوت برای برخی صوت‌ها

صدا	شدت صوت W/m^2	تراز شدت صوت dB
شدت صوت مبنا	10^{-12}	۰
نفس کشیدن	10^{-11}	۱۰
برگ درختان در نسیم	10^{-10}	۲۰
صحبت کردن از فاصلهٔ یک متری	10^{-8}	۴۰
همهمه در فروشگاه	10^{-6}	۶۰
سروصدای خودروها در خیابان شلوغ	10^{-5}	۷۰
آستانهٔ دردناکی (برای بسامد ۱۰۰۰Hz)	۱	۱۲۰
مسلسل	۱۰	۱۳۰
غرش هواپیمای جت درحین بلندشدن	10^{2}	۱۴۰
راکت فضایی، در موقع بلندشدن	10^{5}	۱۷۰

آهسته‌ترین صدایی (کمترین شدت) را که انسان می‌تواند بشنود آستانهٔ شنوایی می‌نامند، و بلندترین صدایی (بیشینهٔ شدت) که انسان می‌تواند بشنود بدون اینکه گوش او به درد آید آستانهٔ دردناکی می‌نامند. آستانهٔ شنوایی و آستانهٔ دردناکی به بسامد بستگی دارند. نمودار شدت صوت در آستانهٔ شنوایی و دردناکی را به‌صورت تابعی از بسامد، در شکل ۵ــ۱۵ مشاهده می‌کنید.



شکل ۵ــ۱۵

پرسش ۵ـ۲

با استفاده از نمودار شکل ۵ــ۱۵ تعیین کنید که آستانهٔ شنوایی و دردناکی در بسامد ۱۰,۰۰۰ هرتز تقریباً چه‌قدر است.

هرچه شدت صوت بیشتر باشد، مقدار انرژی‌ای که گوش دریافت می‌کند بیشتر است و انسان صدا را بلندتر احساس می‌کند، با این حال، این به معنای آن نیست که بلندی صوت با شدت آن نسبت مستقیم دارد؛ پس اگر شدت صوت دو برابر شود، بلندی صدایی که احساس می‌کنیم دو برابر نمی‌شود. در جدول ۵ــ۳ می‌بینید که شدت صوت در غرش هواپیما $10^{2}\ W/m^2$ و شدت صوت در گفت و گوی بین دو نفر $10^{-8}\ W/m^2$ است؛ یعنی، شدت غرش هواپیمای جت 10^{10} برابر شدت گفت وگو است. ولی می‌دانید که ما غرش هواپیما را هیچ‌گاه 10^{10} برابر بلندتر از گفت وگوی دو نفر احساس نمی‌کنیم. به این علت به تعریف **تراز شدت صوت** که درک انسان را از بلندی صوت بیان می‌کند نیاز داریم : **تراز شدت یک صوت عبارت است از لگاریتم (در پایه ده) نسبت شدت آن صوت به شدت صوت مبنا**. تراز شدت صوت را با β نشان می‌دهند و یکای آن را به افتخار **بل** فیزیک‌دان امریکایی مخترع تلفن، بل (B) و دسی‌بل (dB) نام‌گذاری کرده‌اند. هر بل برابر ده دسی‌بل است.

$$\beta = \log\frac{I}{I_0} \quad \text{بل (B)} \qquad (۱۶ــ۵)$$

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad \text{(dB) دسی‌بل} \qquad (۵ــ۱۷)$$

I_0 شدت صوت مبنا است که برابر با آستانهٔ شنوایی گوش سالم در بسامد ۱۰۰۰ هرتز ($10^{-12}\ W/m^2$) در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۵ــ۳ شدت پاره‌ای از صوت‌ها برحسب دسی‌بل بیان شده است.

مثال ۵ــ۵

در جدول ۵ــ۳ شدت صوت آستانهٔ دردناکی (برای بسامد ۱۰۰۰ Hz) $1\ W/m^2$ ذکر شده است. تراز شدت صوت را برای آن به‌دست آورید.

پاسخ

با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۱۷ داریم:

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{1}{10^{-12}} = 120\ dB$$

تمرین‌های فصل پنجم

۱ــ کدام‌یک از عامل‌های زیر بر سرعت صوت در هوا مؤثر است؟

الف) شکل موج ب) دامنهٔ موج پ) بسامد موج ت) دمای هوا

۲ــ آزمایشی برای اندازه‌گیری سرعت صوت در آب طراحی کنید.

۳ــ دلفین، مانند خفاش، از خود فراصوت گسیل می‌کند. طول موج صوت دلفین با بسامد $4 \times 10^5 Hz$ در آب چه‌قدر است؟

۴ــ ناظری در سطح زمین ایستاده است، صدای رعد ۵ ثانیه پس از مشاهدهٔ برق به گوش او می‌رسد. اگر دمای هوا $27^\circ C$ باشد، فاصلهٔ ناظر از محل ایجاد رعد و برق چه مقدار است؟

۵ــ دانش‌آموزی بین دو صخرهٔ قائم ایستاده است و فاصلهٔ او از صخرهٔ نزدیک‌تر ۲۴۰ متر است. دانش‌آموز فریاد می‌زند و اولین پژواک صدای خود را پس از ۱/۵ ثانیه و صدای پژواک دوم را ۱ ثانیه بعد از پژواک اول می‌شنود.

الف) سرعت صوت را در هوا به‌دست آورید. ب) فاصلهٔ بین دو صخره را محاسبه کنید.

۶ ــ یک انتهای یک لولهٔ صوتی، باز و انتهای دیگر بسته است. الف) طول لوله برای این که هوای داخل لوله در بسامد اصلی ۶۰Hz به تشدید درآید چه‌قدر است؟ ب) با رسم شکل، هماهنگ اصلی و هماهنگ‌های سوم و پنجم آن را نمایش دهید. پ) طول موج صوت اصلی و هماهنگ‌های سوم و پنجم آن را تعیین کنید. سرعت صوت را ۳۴۰ m/s در نظر بگیرید.

۷ــ تمرین ۶ را در حالتی که هر دو انتهای لولهٔ صوتی باز است حل کنید.

۸ ــ طول یک لولهٔ صوتی که هر دو انتهای آن باز است ۱/۷m است. بسامد هماهنگ سوم این لوله را محاسبه کنید. سرعت صوت را ۳۴۰ m/s در نظر بگیرید.

۹ــ یک چشمهٔ صوت موج‌های کروی در هوا گسیل می‌کند. الف) نسبت شدت صوت در دو نقطه که فاصلهٔ آنها از چشمهٔ صوت d_1 و $2d_1$ است چه‌قدر است؟ ب) کاهش شدت صوت گسیل‌شده از چشمه عملاً بیشتر از آن است که در قسمت (الف) به‌دست می‌آید. علت چیست؟

۱۰ــ دو نفر به فاصله‌های d_1 و d_2 از یک چشمهٔ صوت ایستاده‌اند. تراز شدت صوت برای این دو نفر به ترتیب ۲۰dB و ۱۰dB است. نسبت $\frac{d_2}{d_1}$ را حساب کنید.

۱۱ــ در فاصلهٔ ۲۰m از چشمهٔ صوتی تراز شدت صوت ۶۰dB است. با این فرض که جذب صوت به‌وسیلهٔ هوا قابل چشم‌پوشی است، در چه فاصله‌ای از این چشمه می‌توان صوت را به زحمت شنید. آیا به‌نظر شما پاسخ به‌دست آمده منطقی است؟

۱۲ــ پردهٔ صماخ گوش شخصی به قطر ۰/۷۵ سانتی‌متر، به مدت ۲ ساعت، صوتی با تراز ۹۰dB را جذب می‌کند. در این مدت پردهٔ گوش چه مقدار انرژی برحسب ژول جذب کرده است؟

موج‌های الکترومغناطیسی

فصل ۶

موج‌های الکترومغناطیسی

نگاهی به فصل : آیا می‌دانید انرژی حیاتی مورد نیاز گیاهان، جانوران، انسان و ... از چه طریق و چگونه به زمین می‌رسد؟

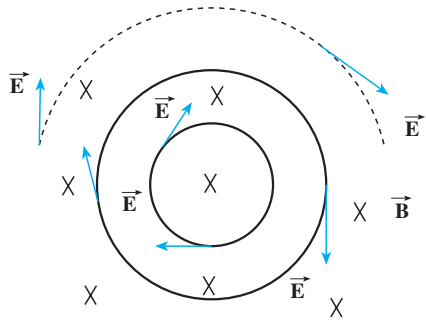
آیا می‌دانید رادیو، تلویزیون، تلفن، بی‌سیم، ماهواره‌ها و ... بر چه اساسی کار می‌کنند؟

شکل ۶ــ۱

هر موجود زنده‌ای در زمین به انرژی خورشید نیاز دارد، به‌طوری که بدون انرژی خورشید حیات روی کرهٔ زمین از بین می‌رود. این انرژی از طریق موج‌های الکترومغناطیسی به زمین می‌رسد و در تمام ارتباطات راه دور این موج‌ها به کار گرفته می‌شوند. با استفاده از سرعت بالای این امواج می‌توان خبر رخ دادن هر حادثه را کمتر از چند دهم ثانیه به هر نقطه از زمین رساند.

مایکل فارادی دانشمند انگلیسی (۱۸۶۷ــ۱۷۹۱میلادی) و جیمز کلارک ماکسول فیزیک‌دان اسکاتلندی (۱۸۷۹ــ۱۸۳۱میلادی) نقش عمده‌ای در کشف پدیده‌های الکترومغناطیسی و مطالعه برروی آنها داشتند.

در فیزیک (۳) و آزمایشگاه با قانون فارادی آشنا شدیم و دیدیم که اگر شار مغناطیسی گذرنده از یک مدار بسته تغییر کند، نیروی محرکه‌ای را در مدار ایجاد می‌کند که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار متناسب است؛ مثلاً اگر در شکل ۶ــ۲ میدان مغناطیسی $\vec{B}$ تغییر کند، در اثر تغییر شار یک نیروی محرکه در مدار القا می‌شود. در واقع و به‌طور عمیق‌تر می‌توان گفت که



شکل ۶ــ۲

در اثر تغییر میدان مغناطیسی یک میدان الکتریکی القایی در فضا ایجاد می‌شود که خط‌های آن در این شکل نشان داده شده‌اند این میدان حتی هنگامی که مدار نیز وجود ندارد ایجاد می‌شود؛ یعنی، میدان الکتریکی را تنها بارهای الکتریکی تولید نمی‌کنند، بلکه در اثر تغییر میدان مغناطیسی نیز به‌وجود می‌آید. در فیزیک (۳) و آزمایشگاه هم‌چنین دیدیم که هنگامی که میدان الکتریکی داخل یک رسانا وجود دارد، در آن اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد می‌کند درنتیجه می‌توان گفت : «نیروی محرکهٔ القایی از این میدان الکتریکی القایی حاصل می‌شود.» ماکسول پیش‌بینی کرد **همان‌طورکه در اثر تغییر میدان مغناطیسی در فضا، میدان الکتریکی تولید می‌شود، در اثر تغییر میدان الکتریکی نیز میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود؛** یعنی، علاوه‌بر جریان الکتریکی و آهنربا تغییر میدان الکتریکی نیز می‌تواند منشأ میدان مغناطیسی باشد. ماکسول با توجه به کارهای اورستد، آمپر، هانری و فارادی مبانی علم الکتریسیته و مغناطیس را تدوین کرد و وجود موج‌های الکترومغناطیسی و انتشار آنها در فضا را پیش‌بینی کرد. بعدها هرتز فیزیک‌دان آلمانی (۱۸۹۴ـ۱۸۵۷میلادی) وجود این موج‌ها را به‌طور تجربی نشان داد.

۶ـ۱ـ چگونگی تشکیل موج‌های الکترومغناطیس توسط یک آنتن

موج‌های الکترومغناطیس از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تشکیل شده‌اند. **عامل اصلی ایجاد موج‌های الکترومغناطیسی، ذرات باردار شتاب‌دارند؛** یعنی، وقتی ذرّهٔ بارداری شتاب‌دار می‌شود بخشی از انرژی خود را به‌صورت موج‌های الکترومغناطیسی گسیل می‌کند، گسیل موج‌های الکترومغناطیسی توسط اجسام را **تابش** می‌نامند.

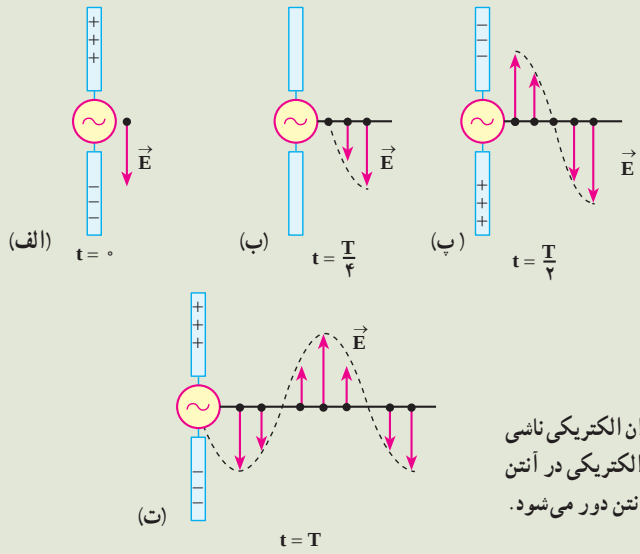
مطالعهٔ آزاد

چگونگی تولید موج‌های الکترو مغناطیسی توسط آنتن

در آنتن، یک منبع ولتاژ متناوب برای ایجاد نوسان بار الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد و این شیوه‌ای مرسوم برای شتاب‌دارکردن ذرّات است. از آنتن‌ها به‌عنوان چشمهٔ موج‌های الکترومغناطیس در ایستگاه‌های رادیویی، مخابراتی و ... استفاده می‌شود. شکل ۶ـ۳ نحوهٔ تولید یک موج الکترومغناطیس را در یک آنتن نشان می‌دهد. دو میلهٔ فلزی به یک مولد متناوب (ac) متصل شده‌اند. چون ولتاژ خروجی این مولد به صورت سینوسی است، بار روی میله‌ها دائماً تغییر می‌کند. در لحظهٔ $t = 0\,s$ بار روی میلهٔ بالایی بیشینه و مثبت و روی میلهٔ پایینی بیشینه و منفی است. سپس بار این میله‌ها کاهش می‌یابد

و در لحظهٔ $t=\frac{T}{۴}$ به صفر می‌رسد (شکل ۶ــ۳ــ ب) در ادامهٔ این حرکت، علامت بار میله‌ها معکوس می‌شود، یعنی بار میلهٔ بالایی منفی و بار میلهٔ پایینی مثبت می‌شود و مقدار آن نیز افزایش می‌یابد تا در لحظهٔ $t=\frac{T}{۲}$ به یک مقدار بیشینه برسد (شکل ۶ــ۳ــ پ). تغییر بار میله‌ها به همین ترتیب ادامه می‌یابد.

در زمان $t=۰s$ بار مثبت در میلهٔ بالایی و بار منفی در میلهٔ پایینی بیشینه است (شکل ۶ــ۳ــالف). پس میدان الکتریکی حاصل از این بارها نیز بیشینه است. میدان الکتریکی ایجاد شده در نزدیکی آنتن، در این لحظه، در این شکل نشان داده شده است.



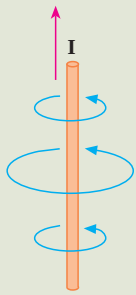
شکل ۶ــ۳ــ میدان الکتریکی ناشی از نوسان بارهای الکتریکی در آنتن با سرعت نور از آنتن دور می‌شود.

با کاهش بار روی میله‌ها، شدت میدان الکتریکی در نزدیکی میله‌ها، کاهش می‌یابد و میدان الکتریکی بیشینهٔ رو به پایینی که در لحظهٔ $t=۰s$ تولید شده بود از میله دور می‌شود. هنگامی که بارهای مثبت و منفی روی میله‌ها صفر است (مانند شکل ۶ــ۳ــ ب) میدان الکتریکی نیز صفر است. این وضعیت $\frac{۱}{۴}$ دوره ($t=\frac{T}{۴}$) بعد از شروع نوسان پیش می‌آید. با ادامهٔ این عمل، میلهٔ بالایی، بعد از زمان $t=۲\frac{T}{۴}$، دارای بیشترین مقدار بار منفی و میلهٔ پایینی دارای بیشترین بار مثبت می‌شود. در این حالت میدان الکتریکی ایجاد شده

رو به بالاست (شکل ۶ــ۳ــ پ) و با ادامه یافتن نوسان بار الکتریکی روی میله‌ها میدان الکتریکی مطابق شکل ۶ــ۳ــ ت تشکیل می‌شود. در تمام این مراحل میدان الکتریکی نزدیکِ آنتن با نوسان بار الکتریکی روی آن هم فاز است؛ یعنی، جهت میدان الکتریکی در زمانی که میلهٔ بالایی مثبت است رو به پایین و وقتی میلهٔ بالایی منفی است، رو به بالاست و اندازهٔ میدان در هر لحظه به مقدار بار روی میله در آن لحظه بستگی دارد.

با ادامهٔ نوسان بارهای الکتریکی روی میله‌ها، میدان‌های الکتریکی ایجاد شده با سرعت نور از آنتن دور می‌شوند. در شکل ۶ــ۳ الگویی از میدان الکتریکی را در لحظه‌های مشخص از نوسان مشاهده می‌کنید. همان گونه که می‌بینید در طول یک دوره از نوسان بار، میدان الکتریکی ایجاد شده در ابتدای دوره به اندازهٔ یک طول موج کامل جلو رفته است.

تغییر بارهای الکتریکی در میله‌ها سبب ایجاد جریان الکتریکی در میله‌ها و در نتیجه تولید یک میدان مغناطیسی در اطراف میله‌ها می‌شود. وقتی جریان در میله‌ها رو به بالاست (همان‌طور که در فیزیک ۳ و آزمایشگاه در مورد میدان حاصل از جریان در یک سیم دیدیم) خطوط میدان مغناطیسی تولید شده به‌صورت دایره‌هایی هم‌مرکز به دور آنتن‌اند (شکل ۶ــ۴). این خط‌ها بر میدان الکتریکی تولید شده در هر نقطه عمودند. با عوض‌شدن جهت جریان، جهت میدان مغناطیسی نیز وارونه می‌شود و با تغییر جریان نسبت به زمان، میدان مغناطیسی نیز همانند میدان الکتریکی در اطراف آنتن تغییر می‌کند.



شکل ۶ــ۴ــ چگونگی تشکیل خطوط میدان مغناطیسی در اطراف یک آنتن که از آن جریان الکتریکی متغیر می‌گذرد.

تا اینجا دیدیم که نوسان بارهای الکتریکی روی میله‌ها، در فضا میدان الکتریکی و مغناطیسی متغیر تولید می‌کند. اما علاوه‌بر اینها دو پدیدهٔ دیگر نیز رخ می‌دهد. همان‌طورکه دیدیم:

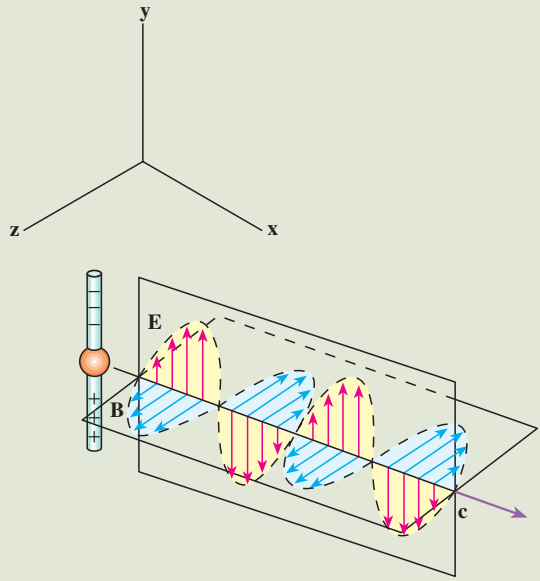
الف) میدان مغناطیسی متغیر با زمان، میدان الکتریکی تولید می‌کند.

ب) میدان الکتریکی متغیر با زمان ــ همان‌طور که ماکسول پیش‌بینی کرده بود ــ میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند.

مطالعهٔ آزاد

این میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی القایی هم‌فازند؛ یعنی، در هر نقطه هر دو میدان هم‌زمان با هم بیشینه یا کمینه می‌شوند (شکل ۶ــ۵). علاوه بر این میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر یکدیگر و هر دوی آنها بر راستای حرکت موج عمودند.

درنتیجهٔ این دو پدیده و مواردی که در بالا ذکر شد، یک موج‌الکترومغناطیسی ایجاد می‌شود که در فضا منتشر می‌شود (شکل ۶ــ۵).



شکل ۶ــ۵ــ یک موج الکترومغناطیسی گسیل شده از یک آنتن در یک لحظه از زمان. توجه کنید که میدان الکتریکی بر میدان مغناطیسی و هر دو بر راستای انتشار موج عمودند.

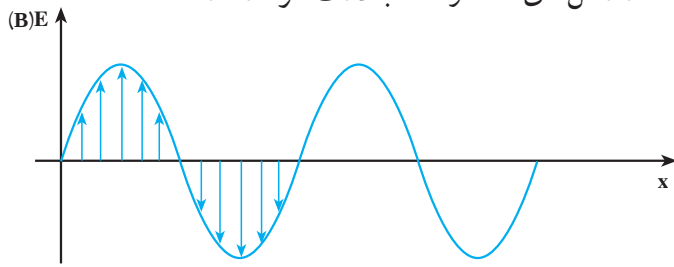
موج‌های الکترومغناطیسی نیز، مانند موج‌های مکانیکی، در زمان و مکان تغییر می‌کنند، با این تفاوت که در موج‌های مکانیکی ذرّه‌های تشکیل‌دهندهٔ محیط نوسان می‌کنند و در موج‌های الکترومغناطیسی، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در هر نقطه از فضا به‌طور نوسانی تغییر می‌کنند. همین موضوع سبب می‌شود که موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار خود، الزاماً به محیط مادّی نیاز نداشته باشند و در خلأ نیز منتشر شوند.

برای بیان چگونگی انتشار موج‌های الکترومغناطیسی نیز می‌توانیم، همان‌طور که در مورد موج‌های مکانیکی انجام دادیم، از نمودارهای میدان‌های الکتریکی (و یا مغناطیسی) برحسب مکان یا زمان استفاده کنیم. ابتدا تغییرات میدان الکتریکی را توصیف می‌کنیم.

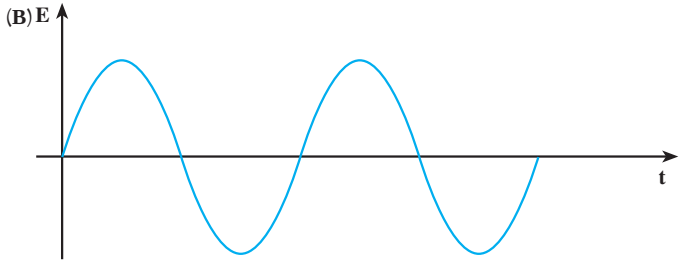
یک موج الکترومغناطیسی را در نظر می‌گیریم که در جهت محور x منتشر می‌شود. نمودار میدان الکتریکی برحسب مکان این موج در شکل ۶ــ۶ رسم شده است. این نمودار، میدان الکتریکی را در تمام نقطه‌ها در امتداد محور x و **در یک لحظه** نشان می‌دهد. می‌بینید که در جهت محور x، میدان

الکتریکی افزایش می‌یابد تا به یک مقدار بیشینه برسد، سپس کاهش می‌یابد و صفر می‌شود و در ادامه، همین تغییرات در جهت عکس صورت می‌گیرد.

تغییرات میدان الکتریکی در یک نقطه از فضا را نیز می‌توان با استفاده از نمودار میدان الکتریکی برحسب زمان نشان داد. این نمودار در شکل ۶ ــ۷ رسم شده است. مشاهده می‌کنید که مقدار میدان در این نقطه، از صفر تا مقدار بیشینه افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد و دوباره به صفر می‌رسد. پس از آن جهت میدان معکوس می‌شود. در این جهت نیز میدان از صفر تا مقدار بیشینه افزایش می‌یابد و دوباره کاهش می‌یابد تا به صفر برسد و این نوسان‌ها به همین ترتیب ادامه می‌یابد. نمودار میدان مغناطیسی برحسب مکان و میدان مغناطیسی برحسب زمان را نیز می‌توان مانند نمودارهای مربوط به میدان الکتریکی رسم کرد که باز هم نمودارهایی مانند شکل‌های ۶ــ۶ و ۶ــ۷ به دست خواهد آمد.

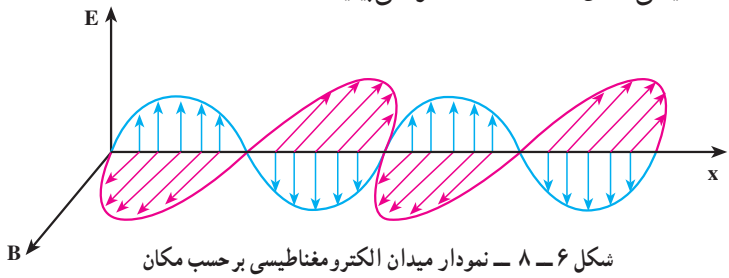


شکل ۶ــ۶ ــ نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی) برحسب مکان، یک موج الکترومغناطیسی در امتداد محور x، در یک لحظه از زمان.



شکل ۶ــ۷ ــ نمودار میدان الکتریکی(مغناطیسی) برحسب زمان، یک موج الکترومغناطیسی در یک نقطه از محور x.

در شکل ۶ــ ۸ نمودارهای میدان الکترومغناطیسی برحسب مکان که در آن هم میدان الکتریکی و هم میدان مغناطیسی نشان داده شده است را می‌بینید.



شکل ۶ ــ ۸ ــ نمودار میدان الکترومغناطیسی برحسب مکان

تعریف‌هایی که قبلاً در مورد موج‌های مکانیکی بیان کردیم، در مورد موج‌های الکترومغناطیسی هم به‌کار می‌روند؛ مثلاً، تعداد نوسان‌های میدان الکتریکی (و یا مغناطیسی) در واحد زمان و در هر نقطه از فضا، **بسامد** و زمانی که طول می‌کشد تا میدان الکتریکی (و یا مغناطیسی) یک نوسان کامل انجام دهد، **دوره** نامیده می‌شود. به همین ترتیب، **طول موج** فاصلهٔ بین دو نقطهٔ متوالی از موج است که در آن دو نقطه میدان‌های الکتریکی (و یا مغناطیسی) هم‌فازند. سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی نیز، همچون موج‌های مکانیکی از رابطهٔ $v = \lambda f$ به‌دست می‌آید.

پرسش ۶ـ۱

با توجه به شکل ۶ــ۵ توضیح دهید که موج‌های الکترومغناطیسی طولی‌اند یا عرضی؟

۶ــ۲ــ سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی

میدان مغناطیسی و الکتریکی حاصل از جریان نوسانی در یک آنتن به‌طور هم‌زمان به تمام نقاط نمی‌رسد، بلکه با سرعت مشخصی منتشر می‌شوند. ابتدا این میدان‌ها در نقاط نزدیک و سپس به نقاط دورتر می‌رسند. ماکسول نشان داد که سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی در خلأ از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \qquad (۶ــ۱)$$

که در آن ε_0 ضریب گذردهی الکتریکی در خلأ و μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ است. از فیزیک (۳) و آزمایشگاه به یاد دارید که $\varepsilon_0 \simeq 8/85 \times 10^{-12}\ C^2/N.m^2$ و $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ T.m/A$ است.

با قرار دادن مقادیر بالا در رابطهٔ ۶ــ۱ سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیس در خلأ به‌دست می‌آید :

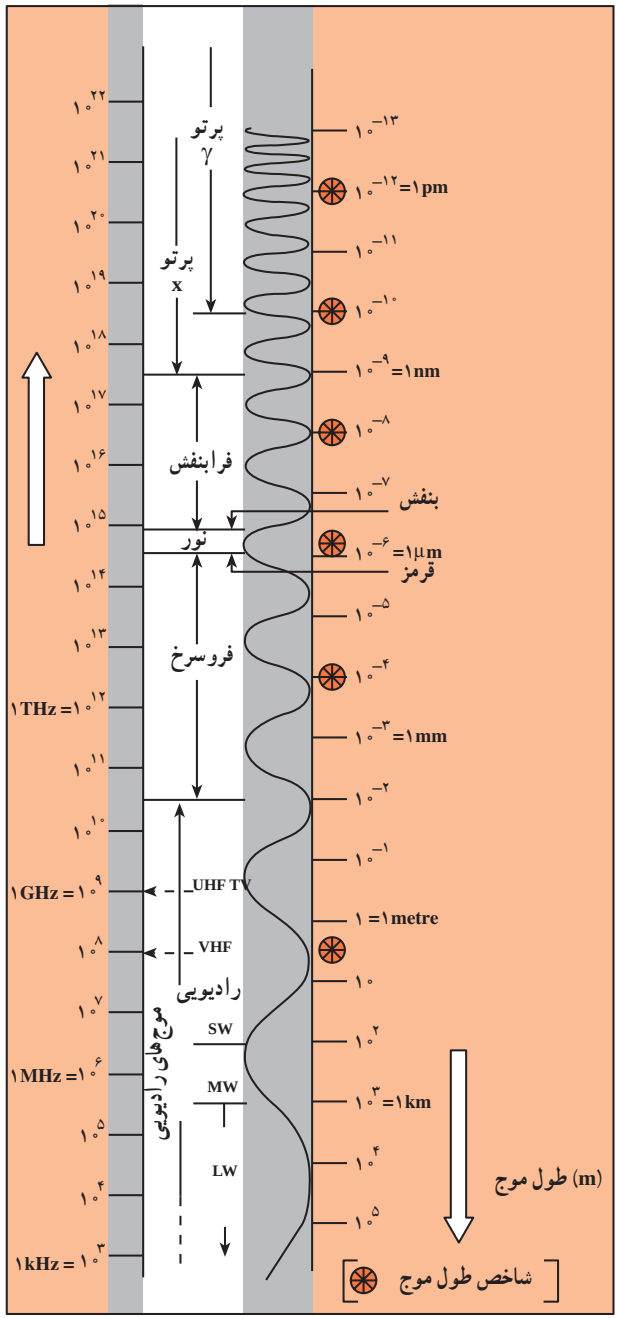
$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8/85 \times 10^{-12} \times 4\pi \times 10^{-7}}} \simeq 3 \times 10^8\ m/s$$

که این مقدار برابر سرعت انتشار نور در خلأ است.

۶ـ۳ ـ طیف موج‌های الکترومغناطیسی

موج‌های الکترومغناطیسی طیف گسترده‌ای از نظر بسامد (و طول موج) دارند. به نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی، نام‌هایی از قبیل : موج‌های رادیویی، نوری، تابش گرمایی، فرابنفش، γ ،X و ... اتلاق می‌شود. در هریک از این ناحیه‌ها تابش به طریق خاصی تولید و آشکار می‌شود. جدول ۶ـ۱ نحوهٔ تولید، کاربرد و آشکارسازی نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد؛ مثلاً، نور که گسترهٔ کوچکی از این طیف است، مستقیماً بر شبکیهٔ چشم اثر می‌کند و از این طریق آشکار می‌شود اما آشکارسازی موج‌های رادیویی توسط وسیله‌های الکترونیکی خاصی مانند رادیو، تلویزیون و ... صورت می‌گیرد.

شکل ۶ـ۹ گسترهٔ (طیف) موج‌های الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. این موج‌ها، طیف پیوسته‌ای را تشکیل می‌دهند. با وجود تفاوت بسیار زیاد در بسامد، نحوهٔ تولید و آشکارسازی آنها، ماهیت و قانون‌های حاکم بر همهٔ آنها یکسان است.



شکل ۶ـ۹ـ طیف موج‌های الکترومغناطیسی

جدول ۶ ــ۱ــ نحوهٔ تولید، آشکارسازی و کاربرد طیف موج های الکترومغناطیسی

نام و حدود طول موج	چشمه	وسایل آشکارسازی	بعضی از ویژگی‌های خاص و کاربرد
پرتو گاما (γ) $1pm = 10^{-12}m$	هستهٔ مواد رادیواکتیو و پرتوهای کیهانی	شمارش‌گر گایگر ــ مولر و فیلم عکاسی	فوتون‌های با انرژی بسیار بالا و با قدرت نفوذ بسیار زیاد، خیلی خطرناک کاربرد : بافت‌های سرطانی را ازبین می‌برد، برای پیدا کردن ترک در فلزات، برای ضدعفونی کردن تجهیزات و وسایل
پرتوی ایکس (X) $100pm = 10^{-10}m$	لامپ پرتو X	فیلم عکاسی و صفحهٔ فلوئورسان	فوتون‌های بسیار پرانرژی و با قدرت نفوذ زیاد، خیلی خطرناک کاربرد : استفاده در پرتونگاری، استفاده در مطالعهٔ ساختار بلورها، معالجهٔ بیماری‌های پوستی، استفاده در پرتودرمانی
فرابنفش (UV) $10nm = 10^{-8}m$	خورشید، جسم‌های خیلی داغ، جرقهٔ الکتریکی، لامپ بخار جیوه	فیلم عکاسی، فوتوسل	ویژگی‌ها : توسط شیشه جذب می‌شود، سبب بسیاری از واکنش‌های شیمیایی می‌شود، یاخته‌های زنده را از بین می‌برد. کاربرد : لامپ‌های UV در پزشکی
نور مرئی $0/6\mu m = 6 \times 10^{-7}m$ (سبز)	خورشید، جسم‌های داغ، لیزرها	چشم، فیلم عکاسی، فوتوسل	ویژگی‌ها : در دیدن اجسام نقش اساسی دارد، برای رشد گیاهان و عمل فتوسنتز نقش حیاتی دارد. کاربرد : در سیستم‌های مخابراتی (لیزر و تارهای نوری) مورد استفاده قرار می‌گیرد.
فروسرخ (IR) $100\mu m = 10^{-4}m$	خورشید، جسم‌های گرم و داغ	فیلم‌های مخصوص عکاسی	ویژگی : هنگامی که جذب می‌شود، پوست را گرم می‌کند. کاربرد : برای گرم کردن، برای فیلم‌برداری و عکاسی در مه و تاریکی، عکاسی IR توسط ماهواره‌ها
رادیویی 3m (VHF)	اجاق‌های مایکروویو، آنتن‌های رادیویی و تلویزیونی	رادیو و تلویزیون	کاربرد : در آشپزی، رادیو، تلویزیون، مخابرات ماهواره‌ای و در رادارها برای آشکارسازی هواپیما، موشک و کشتی

پرسش ۲ـ۷

با استفاده از شکل ۶ــ۹ موج‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی را به ترتیب افزایش طول موج، نام ببرید.

در شکل ۶ــ۹ بیشترین بسامد در بالای طیف و کمترین بسامد در پایین طیف قرار دارد. کوتاه‌ترین طول موج در بالای طیف، مربوط به پرتوهای گاما که در حدود $۱۰^{-۱۳}$ متر است و بر عکس بلندترین طول موج مربوط به موج‌های رادیویی است که در حدود $۱۰^{۵}$ متر است.

مثال ۱ـ۷

محدودهٔ طول موج، امواج الکترومغناطیسی مرئی از ۰/۴ میکرون ($۱۰^{-۶}$m=۱میکرون) مربوط به طول موج بنفش تا ۰/۷ میکرون مربوط به طول موج نور قرمز است. محدودهٔ بسامد نور مرئی را به‌دست آورید.

پاسخ

با استفاده از رابطهٔ $c = \lambda f$ داریم :

$$f_{\text{بنفش}} = \frac{c}{\lambda_{\text{بنفش}}} = \frac{۳\times۱۰^{۸}}{۴\times۱۰^{-۷}} = ۷/۵\times۱۰^{۱۴}\,\text{Hz}$$

$$f_{\text{قرمز}} = \frac{c}{\lambda_{\text{قرمز}}} = \frac{۳\times۱۰^{۸}}{۷\times۱۰^{-۷}} \simeq ۴/۳\times۱۰^{۱۴}\,\text{Hz}$$

یعنی گسترهٔ بسامد نور مرئی بین $۴/۳\times۱۰^{۱۴}$Hz تا $۷/۵\times۱۰^{۱۴}$Hz است.

فعالیت ۶ـ۱

جمله‌های زیر را کامل کنید.

۱ــ میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر یکدیگر ...

۲ــ میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هر دو بر ..... عمودند. بنابراین موج‌های الکترومغناطیسی از نوع موج‌های .....

۳ــ نوسان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با یکدیگر .....

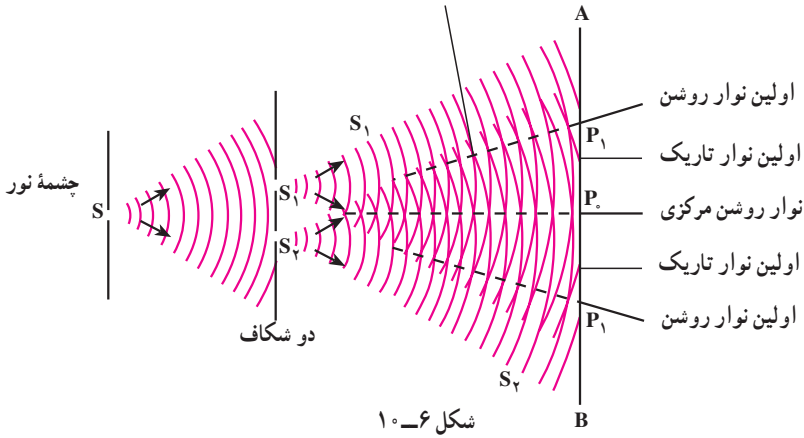
۴ــ موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار نیاز به ..... و انرژی را از محلی به محل دیگر منتقل می‌کنند.

۵ــ همهٔ موج‌های الکترومغناطیسی با سرعت ..... منتشر می‌شوند.

۶ــ۴ــ تداخل موج‌های نوری

در فصل نوسان و موج با تداخل موج‌های مکانیکی آشنا شدیم و در آن‌جا دیدیم که اگر دو سوزن که به فاصلهٔ نزدیکی از هم قرار دارند با بسامد معیّنی بر سطح آب درون یک ظرف همزمان ضربه بزنند، موج‌هایی در سطح آب به‌وجود می‌آید که در همهٔ جهت‌ها منتشر می‌شود. برهم‌نهی این موج‌ها را تداخل نامیدیم و گفتیم در نقطه‌هایی که دو موج هم‌فاز باشند **تداخل سازنده** و در نقاطی که دو موج در فاز مخالف باشند **تداخل ویرانگر** به وجود می‌آید. همین آزمایش را با نور نیز می‌توان انجام داد. یانگ، فیزیک‌دان انگلیسی، در آزمایش‌هایی که بین سال‌های ۱۸۰۲ تا ۱۸۰۴ انجام داد، دریافت که پدیدهٔ تداخل در نور هم مشاهده می‌شود.

شکل ۶ــ۱۰ طرح آزمایش یانگ را نشان می‌دهد. در پشت شکاف باریک S یک چشمهٔ نور تک‌رنگ (لامپ روشن) قرار می‌دهیم. این شکاف خود مانند یک چشمهٔ نور عمل می‌کند. در فاصلهٔ کمی از شکاف S، دو شکاف موازی S_1 و S_2 که با S نیز موازی و هم‌فاصله‌اند، قرار می‌دهیم. نور رسیده به شکاف‌های S_1 و S_2 همانند دو چشمهٔ هم‌بسامد، هم‌دامنه و هم‌فاز عمل می‌کنند و نور را در جهت‌های مختلف گسیل می‌کنند. نورهای گسیل شده از دو چشمهٔ S_1 و S_2 با یکدیگر تداخل کرده و نوارهای تداخلی روشن و تاریک را بر روی پردهٔ AB که در مقابل شکاف‌ها قرار دارد تشکیل می‌دهند.



شکل ۶ــ۱۰

دو موجی که به نقطهٔ P_0 روی محور تقارن دو شکاف می‌رسند، هم‌فازاند زیرا آنها دو راه مساوی S_1P_0 و S_2P_0 را تا پرده پیموده‌اند. تداخل این دو موج سازنده است و درنتیجه در محل P_0 روی پرده یک نوار روشن تشکیل می‌شود. این نوار روشن را نوار روشن مرکزی می‌نامیم. برای اینکه ببینیم در چه شرایطی نوار روشن و در چه شرایطی نوار تاریک تشکیل می‌شود نقطهٔ P را در شکل ۶ــ۱۱ در نظر می‌گیریم. پرتوهایی که از S_1 و S_2 به این نقطه می‌رسند، دو راه نامساوی S_1P و S_2P را می‌پیمایند. اختلاف فاز پرتوها را می‌توان از روی اختلاف راه آنها تعیین کرد.

$$\Delta\varphi = k(d_2 - d_1) = \frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1)$$

اگر $\Delta\varphi$ مضرب زوجی از π باشد؛ یعنی

$$\Delta\varphi = \pm 2n\pi,\ n = 0,1,\ldots \qquad (۶ــ۲)$$

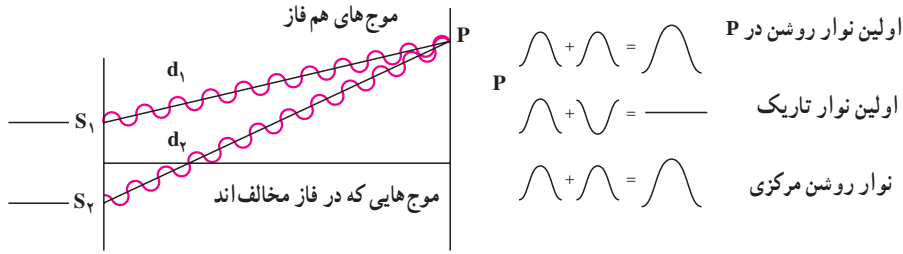
یا :

$$\frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) = \pm 2n\pi$$

$$\Longrightarrow\ d_2 - d_1 = \pm n\lambda = \pm 2n\frac{\lambda}{2}$$

در این صورت دو پرتویی که به پرده می‌رسند هم‌فازند و تداخل سازنده ایجاد می‌شود و در این نقطه‌ها نوار روشن تشکیل می‌شود. در رابطهٔ ۶ــ۲ به‌ازای $n = 0$، اختلاف راه و اختلاف فاز صفر است و نوار روشنی که تشکیل می‌شود همان نوار مرکزی است.

به‌ازای $n = 1$، اختلاف فاز 2π است و اولین نوار روشن در دو طرف نوار مرکزی به‌دست می‌آید و به همین ترتیب می‌توان نوارهای روشن بعدی را به‌ازای $n = 2,3,\ldots$ به‌دست آورد.



شکل ۶ــ۱۱

حال اگر $\Delta\varphi$ مضرب فردی از π باشد؛ یعنی :

$$\Delta\varphi = \pm(2m-1)\pi \quad , \quad m = 1,2,\ldots \qquad (۶ــ۳)$$

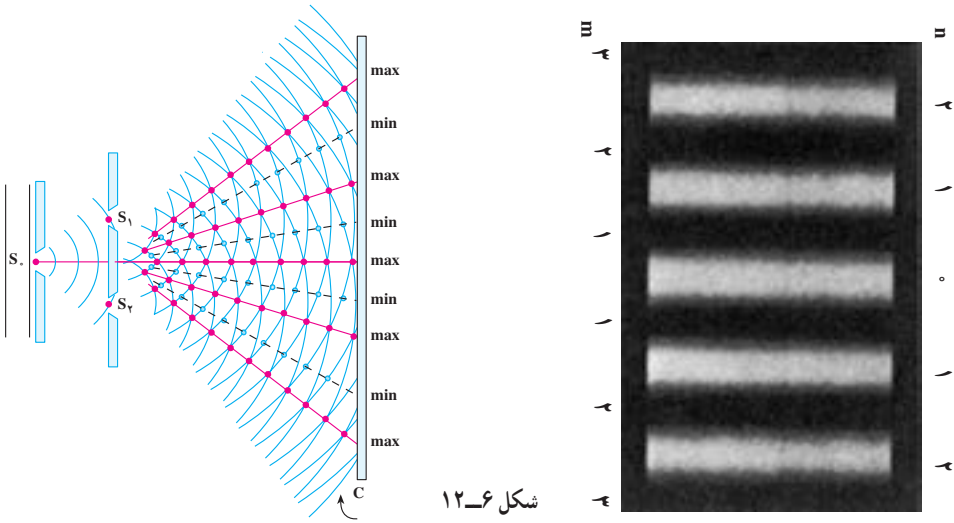
یا :

$$\frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) = \pm(2m-1)\pi$$

$$d_2 - d_1 = \pm(2m-1)\frac{\lambda}{2}$$

در این صورت دو موجی که به پرده می‌رسند در فاز مخالف هم خواهند بود و تداخل ویرانگر صورت می‌گیرد و درنتیجه در این نقاط نوار تاریک خواهیم داشت. در رابطهٔ ۶ــ۳، $m = 1$ مربوط به اولین نوار تاریک است که در دو طرف نوار روشن مرکزی قرار می‌گیرد. این نوار تاریک میان نوار روشن مرکزی و اولین نوار روشن قرار دارد.

نوارهای روشن و تاریک را که روی پرده تشکیل می‌شوند، طرح تداخلی می‌نامند. شکل ۶ــ۱۲ طرح تداخلی دو شکاف یانگ را نشان می‌دهد. در دو طرف شکل، شمارهٔ نوارهای روشن که با مقادیر مختلف n و شمارهٔ نوارهای تاریک که با مقادیر مختلف m داده می‌شوند نیز آمده است.

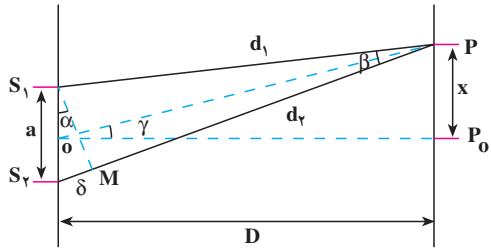


شکل ۶ــ۱۲

تمرین ۶ـ۱

نشان دهید اختلاف راه برای مکان‌هایی که نوار تداخلی روشن داریم، مضرب زوجی از نصف طول موج، $\delta = ۲n\frac{\lambda}{۲}$ ، و برای مکان‌هایی که نوار تاریک داریم، مضرب فردی از نصف طول موج، $\delta = (۲m-۱)\frac{\lambda}{۲}$ ، است

اندازه‌گیری طول موج : با استفاده از آزمایش یانگ می‌توان طول موج نور را اندازه‌گیری کرد. در شکل ۶ـ۱۳ طرحی از این آزمایش رسم شده است. در این شکل، فاصلهٔ دو شکاف از هم a و فاصلهٔ شکاف‌ها از پرده D است. فرض کنید نوار روشن nام در نقطهٔ P در فاصلهٔ x از نوار مرکزی روی پرده تشکیل شده است. دایره‌ای به مرکز P و به شعاع $PS_۱$ رسم می‌کنیم، دایره، $PS_۲$ را در نقطهٔ M قطع می‌کند. اختلاف راه نوری بین دو پرتو $PS_۲$ و $PS_۱$ برابر است با :



شکل ۶ـ۱۳

$$\delta = S_۲M = d_۲ - d_۱$$

اگر فاصلهٔ پرده از صفحهٔ دو شکاف بسیار بزرگتر از فاصلهٔ دو شکاف، یعنی $D >> a$ باشد، زاویهٔ γ و نیز زاویهٔ β (بین پرتوهایی که به P می‌رسند) بسیار کوچک خواهند بود و می‌توان $S_۱M$ را عمود بر $S_۲P$ و OP در نظر گرفت. در این صورت، زاویه‌های α و γ با یکدیگر برابرند، درنتیجه :

$$\tan\alpha = \tan\gamma \quad \text{و} \quad \tan\gamma = \frac{x}{D}$$

$$\tan\alpha = \sin\alpha = \frac{\delta}{a}$$

چون زاویهٔ α کوچک است :

بنابراین :

$$\frac{x}{D} = \frac{\delta}{a} \qquad (۴ـ۶)$$

برای نوار روشن nام :

$$\frac{x}{D} = \frac{n\lambda}{a} \qquad (۵ـ۶)$$

که از آن رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$\lambda = \frac{xa}{nD} \qquad (۶ــ۶)$$

با اندازه‌گیری فاصلهٔ نوار روشن از نوار مرکزی می‌توان طول موج را اندازه گرفت.

پرسش ۶ـ۳

به نظر شما اگر آزمایش یانگ را با نور سفید انجام دهیم، طرح تداخلی چگونه خواهد بود؟

مثال ۶ـ۲

آزمایش یانگ را با نور زرد سدیم انجام داده‌ایم. فاصلهٔ دو شکاف یانگ از یکدیگر $a = ۱/۲mm$ و فاصلهٔ شکاف تا پرده $۱/۲m$ است؛ اگر فاصلهٔ نوار روشن بیستم از وسط نوار مرکزی $۱۱/۸mm$ باشد، طول موج نور زرد سدیم چند متر است؟

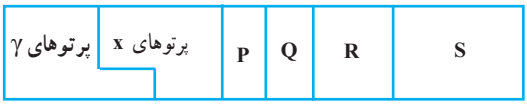
پاسخ

با استفاده از رابطهٔ ۶ــ۶ داریم :

$$\lambda = \frac{ax}{nD} = \frac{۱/۲\times ۱۰^{-۳} \times ۱۱/۸\times ۱۰^{-۳}}{۲۰\times ۱/۲} \simeq ۵/۹\times ۱۰^{-۷}\,m$$

$$= ۰/۵۹\mu m$$

۱ــ شکل ۶ــ۱۴ طیف موج‌های الکترومغناطیسی را با یک مقیاس تقریبی نشان می‌دهد.



شکل ۶ــ۱۴

الف) نام قسمت‌هایی از طیف را که تنها با حروف علامت‌گذاری شده‌اند، بنویسید.

ب) اگر در طول طیف از چپ به راست (از پرتوهای γ به طرف S) حرکت کنیم، چه خاصیتی از پرتوها افزایش یا کاهش می‌یابد و یا ثابت می‌ماند؟

۲ــ چهار وجه اشتراک و دو تفاوت برای نور فروسرخ و امواج رادیویی بیان کنید.

۳ــ الف) از یک ایستگاه رادیویی موج الکترومغناطیسی به طول موج ۷۵m گسیل می‌شود. بسامد این موج را حساب کنید.

ب) موج‌های رادیویی با بسامد ۱۲MHz چه طول موجی دارند؟

۴ــ الف) طول موج نور نارنجی $۶/۴۲ \times ۱۰^{-۷}m$ است، بسامد این نور چند هرتز است؟

ب) بسامد نور قرمز در حدود $۴/۲۸ \times ۱۰^{۱۴}Hz$ است، طول موج این نور در هوا و آب را حساب کنید. (سرعت نور در هوا را $۳ \times ۱۰^{۸}m/s$ و در آب را $۲/۲۵ \times ۱۰^{۸}m/s$ فرض کنید.)

۵ــ گسترهٔ طول موج‌های رادیویی زیر را به‌دست آورید.

الف) باند AM در گسترهٔ بسامدی ۵۴۰ تا ۱۶۰۰ کیلوهرتز

ب) باند FM در گسترهٔ بسامدی ۸۸ تا ۱۰۸ مگاهرتز

۶ــ آزمایش یانگ را با نور تک‌رنگ سبز انجام داده و نوارهای تداخلی را بر روی پردهٔ موازی با سطح شکاف‌ها تشکیل داده‌ایم. برای این‌که فاصلهٔ دو نوار روشن متوالی را زیاد کنیم می‌توانیم :

۱) به جای نور سبز از نور تک‌رنگ قرمز استفاده کنیم.

۲) به جای نور سبز از نور تک‌رنگ بنفش استفاده کنیم.

۳) فاصلهٔ پرده از شکاف‌ها را زیاد کنیم.

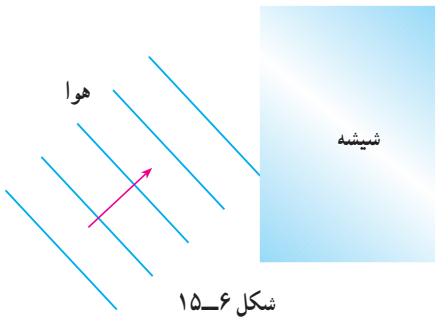
۴) فاصلهٔ دو شکاف را از هم کم کنیم.

۷ــ اگر آزمایش یانگ عیناً در آب انجام گیرد چه تغییری در وضعیت نوارها نسبت به هوا حاصل می‌شود؟ توضیح دهید.

۸ــ یک صافی مقابل چراغ جیوه قرار می‌دهیم، به‌طوری که تمام طول موج‌ها به جز ناحیهٔ سبز آن جذب می‌شود. با این نور سبز، طرح تداخلی آزمایش یانگ را به فاصلهٔ دو شکاف $a = ۰/۶mm$ روی پرده‌ای به فاصله $D = ۲/۵m$ از دو شکاف تشکیل می‌دهیم؛ اگر فاصلهٔ دو نوار روشن پهلوی هم $۲/۲۷mm$ باشد، طول موج نور سبز را حساب کنید.

۹ــ در آزمایش دو شکاف یانگ، فاصلهٔ دو شکاف $۰/۴mm$ و فاصلهٔ پرده تا دو شکاف $۸۰cm$ است؛ اگر طول موج نور $۰/۶\mu m$ باشد فاصلهٔ نوار دهم روشن از نوار مرکزی راحساب کنید.

۱۰ــ در شکل ۶ــ۱۵ موج‌های نور فرودی از هوا وارد شیشه می‌شوند. بعضی از آنها در سطح جدایی دو محیط بازتابیده و بعضی شکسته شده وارد شیشه می‌شوند. با استدلال توضیح دهید کدام‌یک از کمیت‌های زیر برای موج‌های بازتابیده و موج‌های شکسته شده یکسان است؟



شکل ۶ــ۱۵

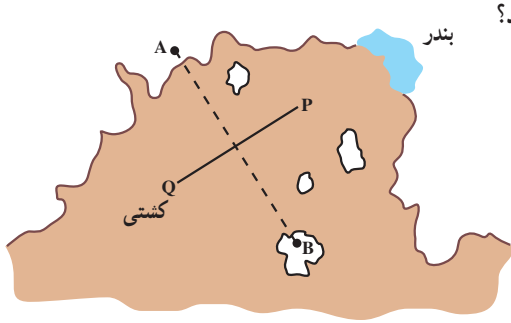
الف) سرعت ب) طول موج
پ) امتداد ت) شدت نور
ث) بسامد

۱۱ــ در شکل ۶ــ۱۶ یک خط ساحلی با دو ایستگاه رادیویی دریانوردی زمینی A و B دیده می‌شود که در فاصلهٔ زیادی از هم قرار گرفته‌اند. هر دو ایستگاه پیوسته سیگنال‌های رادیویی هم‌فاز گسیل می‌کنند که بسامد آنها $۱/۵MHz$ است.

الف) طول موج این سیگنال‌ها چند متر است؟

ب) یک کشتی از مسیر QP به‌سوی بندر در حرکت است. هنگامی که این کشتی به نقطه‌ای درست در وسط خط فرضی AB می‌رسد، سیگنالی دریافت می‌کند که دامنهٔ آن درست دو برابر دامنهٔ هر موجی است که از یک ایستگاه به‌تنهایی دریافت می‌کرد. این مشاهده چه موضوعی را دربارهٔ سیگنال‌های گسیل شده از A و B نشان می‌دهد؟

پ) توضیح دهید در شرایط هوای مه‌آلود چگونه می‌توان از این سیگنال‌های رادیویی برای ادامهٔ مسیر استفاده کرد؟



شکل ۶ــ۱۶

آشنایی با فیزیک اتمی

فصل ۷

آشنایی با فیزیک اتمی

نگاهی به فصل : پیش از این در درس فیزیک با بسیاری از قانون‌های فیزیک آشنا شده‌ایم و دریافته‌ایم که چگونه با استفاده از این قانون‌ها می‌توان بسیاری از پدیده‌های طبیعی را تجزیه و تحلیل کرد. از جمله دیدیم که به کمک قانون‌های نیوتون می‌توان حرکت هر جسم را تحت تأثیر نیروهای وارد بر آن پیش‌بینی کرد، و یا با استفاده از قانون گرانش، نیروی گرانشی بین جرم‌های مختلف را مشخص نمود، و یا با استفاده از قانون کولن، نیروی الکتریکی بین بارهای الکتریکی را به‌دست آورد و بالاخره با استفاده از قانون فارادی، می‌توان اثرهای مغناطیسی جریان‌های الکتریکی را توجیه کرد.

شما می‌توانید با مراجعه به کتاب‌های فیزیک خود که تاکنون خوانده‌اید، قانون‌های دیگری را که فرا گرفته‌اید، به این فهرست بیفزایید.

فیزیک‌دانان تا آخر سدهٔ نوزدهم میلادی توانسته بودند برای بسیاری از پدیده‌های طبیعی توجیه‌های قانع کننده‌ای ارائه کنند. مجموعهٔ آن قانون‌ها و نظریه‌ها را «فیزیک کلاسیک» می‌نامند که امروز هم در حل بسیاری از مسائل فیزیک و توجیه پدیده‌های طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اما در سال‌های پایانی سدهٔ نوزدهم میلادی دانشمندان پدیده‌هایی را مشاهده کردند که دیگر با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند. امروزه به مجموعهٔ نظریه‌ها و قانون‌هایی که به توجیه این پدیده‌ها می‌پردازد، فیزیک جدید (یا نوین) می‌گویند.

شالودهٔ فیزیک جدید را نظریه‌های «نسبیت» و «کوانتومی» تشکیل می‌دهد. نظریهٔ نسبیت مربوط به مطالعهٔ پدیده‌ها در سرعت‌های بسیار زیاد و نزدیک به سرعت نور است. نظریهٔ کوانتومی نیز به مطالعهٔ پدیده‌ها در مقیاس‌های بسیار کوچک، مانند مولکول‌ها، اتم‌ها و ذرّه‌های ریزی که اتم‌ها را می‌سازند، می‌پردازد. ذرّه‌هایی که اتم‌ها را می‌سازند، ذرّه‌های زیر ــ اتمی نامیده می‌شوند. این نام اشاره بر آن دارد که این ذرّه‌ها اجزای اتم‌ها هستند و از اتم‌ها کوچک‌ترند.

نظریه‌های نسبیت و کوانتومی هر دو طی بیست و پنج سال اول سدهٔ بیستم مطرح شدند. نظریهٔ نسبیت را برای نخستین بار آلبرت اینشتین عرضه کرد. نظریهٔ کوانتومی نیز نتیجهٔ پژوهش‌های فیزیک‌دانان بسیاری از جمله ماکس پلانک، آلبرت اینشتین، نیلس بور ،اروین شرودینگر، ورنر هایزنبرگ، پل دیراک، ولف گانگ پائولی، ماکس بورن و ... بوده است.

در این فصل ضمن معرفی و بررسی برخی از پدیده‌هایی که با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند،

به معرفی مفهوم برخی از نظریه‌های ساده‌تر که در فیزیک کوانتومی مطرح است می‌پردازیم. بررسی دقیق‌تر و مشروح این نظریه‌ها و قانون‌های مربوط به آنها کاری تخصصی و فراتر از سطح این کتاب است.

۷ــ۱ــ نظریهٔ کوانتومی

آیا تاکنون به نوری که از زغال افروخته و یا فلز گداخته‌ای گسیل می‌شود توجه کرده‌اید؟ این پدیده نشان می‌دهد که اجسام در دماهای بالا از سطح خود نور مرئی گسیل می‌کنند. آزمایش‌های دقیق فیزیکی نشان می‌دهد که : از سطح همهٔ اجسام در **هر دمایی** تابش‌های الکترومغناطیسی گسیل می‌شود.

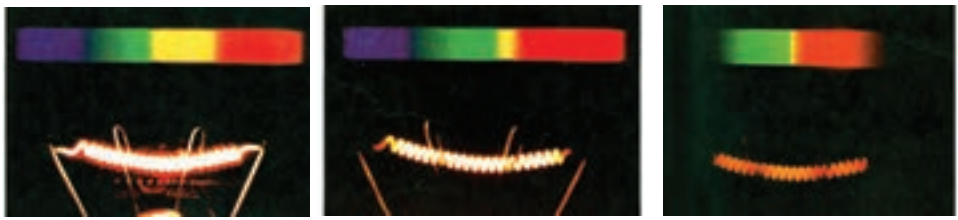
گسیل تابش‌های الکترومغناطیسی از سطح جسم‌ها را **تابش گرمایی** نیز می‌نامند. در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که چگونه می‌توان با عبور یک نور سفید از منشور، آن را به رنگ‌های مختلف (که در نتیجه طول موج‌های مختلف دارند) تجزیه کرد و طیف آن را به‌دست آورد. اگر بین طول موج‌هایی که در یک طیف وجود دارد فاصله‌ای نباشد، آن طیف را **طیف پیوسته** می‌گوییم.

آزمایش نشان می‌دهد که تابش گسیل شده از هر جسم به دمای آن و برخی از خصوصیت‌های سطح آن بستگی دارد و در آن همهٔ طول موج‌ها از فروسرخ، مرئی و فرابنفش به‌صورت یک طیف پیوسته وجود دارد.

در دمای پایین، مثلاً در دمای اتاق یا کمی بالاتر، بیشترین تابش گسیل شده دارای طول موج‌هایی در ناحیهٔ فروسرخ است، به همین دلیل ما نمی‌توانیم با چشم خود وجود این تابش را تشخیص دهیم و فقط گرمای آن را حس می‌کنیم. هرچه دمای جسم بالاتر رود، طول موج‌هایی که بیش از همه تابش می‌شود، به‌تدریج از طول موج‌های بلند به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر و به طرف نور مرئی نزدیک می‌شوند. وقتی دمای جسم به اندازهٔ کافی بالا رود، از آن نور قرمزرنگی گسیل می‌شود، (شکل ۷ــ۱).

شکل ۷ــ۱

در دماهای باز هم بالاتر، اجسامی مانند رشتهٔ تنگستن داغ درون لامپ روشنایی، نور سفید (یعنی نوری با طیف پیوسته که همهٔ طول موج‌های نور مرئی را در طیف خود دارد) گسیل می‌کنند (شکل ۷ــ۲).



(پ) (ب) (الف)

شکل ۷ــ۲ــ رشتهٔ داغ تنگستن و طیفی که از آن گسیل می‌شود. با افزایش دما از (الف) به (ب) و سپس به (پ) طیف گسیل شده تغییر می‌کند و نور گسیل شده از قرمز به سفید تغییر رنگ می‌دهد.

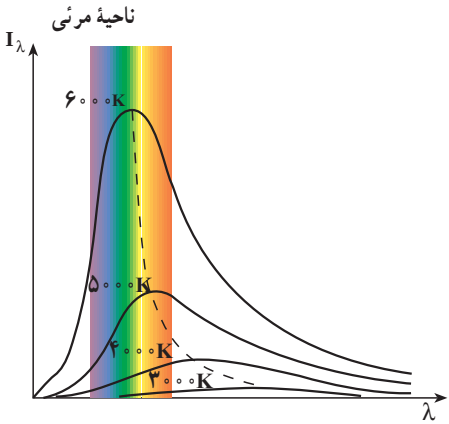
پرسش ۷ــ۱

آیا می‌توانید بگویید در جایی که نشسته‌اید تابش گسیل شده از چه اجسامی بر شما می‌تابد (فرود می‌آید)؟ آیا از خود شما نیز در این حال تابش گسیل می‌شود؟

شدت تابشی : دیدیم که هر جسم همواره در حال گسیل تابش است و طول موج و انرژی تابش گسیل‌شده از آن، هم به دما و هم به ویژگی‌های سطح آن جسم بستگی دارد. **بنا به تعریف، شدت تابشی، یک جسم برابر است با مقدار کل انرژی تابش‌های الکترو مغناطیسی‌ای که در بازهٔ زمانی یک ثانیه از واحد سطح آن جسم گسیل می‌شود.**

مقدار تابش گسیل شده را با کمیتی به نام **تابندگی** مشخص می‌کنند. **تابندگی یک جسم در هر طول موج برابر است با مقدار انرژی تابش‌های الکترومغناطیسی با طول موج‌های بین λ و $\lambda+\Delta\lambda$ که در واحد زمان از واحد سطح جسم بر یکای گسترهٔ طول موج گسیل می‌شود. اگر یکای طول موج را میکرون (μm) و یکای سطح را سانتی‌مترمربع (cm^2) اختیار کنیم، یکای تابندگی $W/cm^2.\mu m$ خواهد شد.**

تابندگی یک جسم (I_λ) در طول موج‌ها و دماهای مختلف اندازه‌گیری شده و نتیجهٔ آن در شکل ۷ــ۳ برای چهار دمای مختلف با تقریب رسم شده است. گسترهٔ طول موج‌های مرئی نیز در این شکل مشخص شده است. سطح زیر نمودار تابندگی برحسب طول موج برابر با شدت تابشی جسم است. همان‌طور که از شکل پیداست با افزایش دما سطح زیر منحنی بیشتر می‌شود.



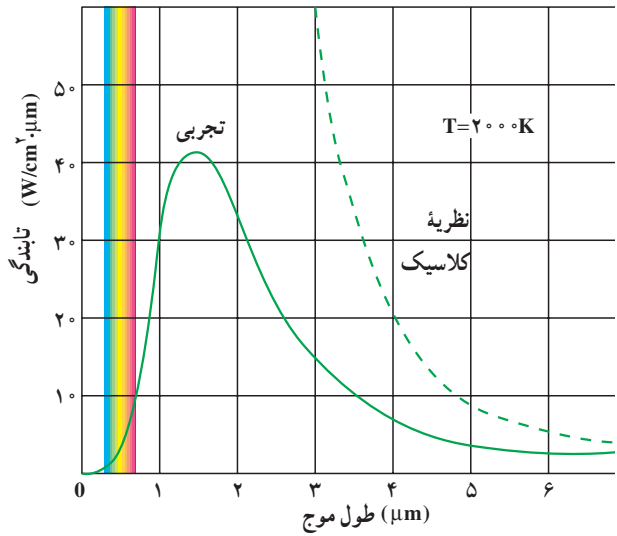
شکل ۷ــ۳ــ نمودار تقریبی تابندگی پرتوی گسیل‌شده از جسم بر حسب طول‌موج

فعالیت ۷ـ۱

با بررسی شکل ۷ــ۳ در گروه خود، الف) تابندگی جسم را برای یک طول موج معین، در دماهای مختلف، با یکدیگر مقایسه کنید. ب) مشخص کنید که آیا در یک دمای معین همهٔ طول موج‌ها با تابندگی یکسان تابش می‌شوند یا نه؟ پ) اگر نتیجهٔ دیگری از این بررسی به‌دست آورده‌اید به کلاس گزارش کنید.

همان‌طور که در شکل ۷ــ۳ می‌بینید، ***هرچه دمای جسم بیشتر باشد، بیشینهٔ منحنی، یعنی طول موجی که با بیشترین تابندگی گسیل می‌شود، به طرف طول موج‌های کوتاه‌تر می‌رود، علاوه بر این، شدت تابشی کل گسیل شده نیز با افزایش دما بیشتر می‌شود.***

ناتوانی فیزیک کلاسیک در توجیه نظری تابش جسم : در فصل موج‌های الکترومغناطیسی دیدیم که چگونه حرکت شتاب‌دار ذره‌های باردار در آنتن منجر به گسیل موج الکترومغناطیسی در فضا می‌شود. بنا به نظریهٔ فیزیک کلاسیک تابش گرمایی که از سطح یک جسم گسیل می‌شود نیز از نوسان‌های ذره‌های بارداری که درون جسم و در نزدیکی سطح آن، واقع‌اند سرچشمه می‌گیرد.



شکل ۷ــ۴

تا ابتدای سدهٔ بیستم میلادی، فیزیک‌دانان نتوانسته بودند با به‌کار بردن قانون‌ها و مفهوم‌های فیزیک کلاسیک، از جمله موج‌های الکترومغناطیسی گسیل شده از سطح یک جسم، منحنی‌های تجربی شکل ۷ــ۳ را توجیه کنند. به‌عبارت دیگر از محاسبه‌های آنان نتیجه شد که تابندگی با توان چهارم طول موج نسبت عکس دارد. این موضوع سبب می‌شود که در طول موج‌های کوتاه تابندگی جسم به سمت بی‌نهایت میل کند که با نتیجه‌های تجربی شکل ۷ــ۳ سازگاری نداشت. در شکل ۷ــ۴ منحنی حاصل از محاسبه‌های نظری براساس فیزیک کلاسیک (خط چین) همراه با یک منحنی تجربی برای دمای ۲۰۰۰ کلوین نشان داده شده است.

فعالیت ۷ــ۲

در گروه خود دو منحنی شکل ۷ــ۴ را مورد بحث قرار دهید و موارد ناسازگاری بین آن دو را مشخص کنید.

همان‌طور که در شکل ۷ــ۴ پیداست و پیش از این نیز توضیح داده شد، هر چه دمای جسم بالاتر باشد، λ_m یعنی طول موجی که تابندگی با آن طول موج بیشینه است، کوچک‌تر خواهد بود. آزمایش نشان می‌دهد که میان λ_m و دمای مطلق جسم، رابطهٔ زیر برقرار است که **قانون جابه‌جایی وین** نام دارد.

$$\lambda_m T = \text{مقدار ثابت} = ۲/۹ \times ۱۰^{-۳} m.K \qquad (۷ــ۱)$$

واژهٔ جابه‌جایی در این قانون، مربوط به چگونگی حرکت یا جابه‌جایی بیشینهٔ تابندگی با تغییر دمای جسم است.

مثال ۷ـ۱

دمای بدن انسان $37^{\circ}C$ است با محاسبه نشان دهید بیشینهٔ تابندگی بدن انسان در چه ناحیه‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی است.

پاسخ

$$\lambda_m T = ۲/۹ \times ۱۰^{-۳} m.K$$

$$\lambda_m = \frac{۲/۹ \times ۱۰^{-۳}}{۲۷۳ + ۳۷}$$

$$\Rightarrow \lambda_m \simeq ۹/۳۵ \times ۱۰^{-۶} m$$

با استفاده از شکل ۶ـ۹، این طول موج در محدودهٔ فروسرخ است.

یکی از ناسازگاری‌های بین نتایج محاسبات مبتنی بر فیزیک کلاسیک و نتیجه‌های تجربی، آن است که محاسبه‌های کلاسیکی پیش‌بینی می‌کنند که مقدار انرژی تابشی گسیل‌شده با طول موج بسیار کوتاه باید نامتناهی باشد. اما همان‌طور که در نمودار تجربی می‌بینید مقدار این انرژی بسیار کوچک است.

در سال ۱۹۰۰ میلادی پلانک با ارائهٔ نظریهٔ کوانتومی خود دربارهٔ تابش توانست نتیجه‌های تجربی به دست آمده را توجیه کند. اساس نظریهٔ پلانک بر این فرض استوار بود که **انرژی تابشی جسم کوانتومی** است. در ادامه، نخست واژهٔ کوانتوم و مفهوم کمیت کوانتومی را معرفی می‌کنیم. سپس سعی می‌کنیم با بیان بسیار ساده شده‌ای به شرح نظریهٔ پلانک بپردازیم.

کمیّت کوانتومی : ما در زندگی روزمره با کمیت‌های متفاوتی سروکار داریم که برخی از آنها مقدارهای پیوسته و برخی دیگر مقدارهای گسسته اختیار می‌کنند؛ برای مثال، طول یک پارچه، مساحت یک زمین و یا حجم یک ظرف کمیت‌های پیوسته‌اند و هر مقداری را می‌توانند اختیار کنند. می‌توانیم ۲ متر یا ۲/۲ متر و یا ۲/۲۵ متر و ... پارچه داشته باشیم. از سوی دیگر، کمیت‌هایی مانند تعداد دانش‌آموزان یک کلاس و یا تعداد سکه‌های موجود در صندوق یک دستگاه تلفن سکه‌ای کمّیت‌هایی گسسته‌اند و تنها می‌توانند مقدارهای خاصی اختیار کنند؛ برای مثال، ما نمی‌توانیم ۲۴/۳ دانش‌آموز در یک کلاس و یا ۹۲/۵ عدد سکه در یک مجموعه از سکه‌ها داشته باشیم. در فیزیک کمیّت‌های گسسته را «کوانتومی» می‌نامند. کمترین مقدار یک کمّیّت کوانتومی را مقدار پایه یا «کوانتوم» آن کمّیّت می‌خوانند.

برای مثال، در مبحث الکتریسیته دیده‌ایم که مقدار بار الکتریکی موجود در یک جسم باردار مضرب درستی از بار یک الکترون ($e = 1/6 \times 10^{-19} C$) است. به این ترتیب می گوییم که بار الکتریکی هر جسم باردار یک کمیّت کوانتومی است و هر کوانتوم آن برابر بار الکتریکی یک الکترون است.

در فصل ۵ همین کتاب نیز دیدیم که بسامد حاصل از موج ایستاده در طنابی که دو سر آن ثابت شده است به‌صورت $f_n = nf_1$ و درواقع مضرب صحیحی از مقدار پایهٔ آن، یعنی بسامد هماهنگ اول است و بنابراین بسامد امواج ایستاده تشکیل شده در طناب نیز کمیتی گسسته است.

نظریهٔ پلانک دربارهٔ تابش : بنابر نظریهٔ پلانک مقدار انرژی‌ای که جسم به‌صورت تابش‌های الکترومغناطیسی گسیل می کند همواره مضرب درستی از یک مقدار پایه است و این مقدار پایه به بسامد موج الکترومغناطیسی بستگی دارد. به این ترتیب داریم :

$$E = nhf \qquad (۲_۷)$$

در این رابطه n یک عدد صحیح مثبت است و ضریب h مقدار ثابتی است که ثابت پلانک نام دارد. نخستین برآورد این ثابت توسط پلانک به کمک تطبیق نتیجهٔ محاسبه با منحنی‌های تجربی مربوط به تابش جسم صورت گرفت. هم‌اکنون مقدار پذیرفته شده برای این ثابت برابر با $h = 6/63 \times 10^{-34} Js$ است.

hf ***کوانتوم انرژی*** تابشی گسیل شده با بسامد f است و n که تعداد کوانتوم‌ها را مشخص می کند، عدد کوانتومی نام دارد.

در رابطهٔ ۷ــ۲ اگر ثابت پلانک را برحسب ژول ثانیه قرار دهیم، انرژی برحسب ژول به‌دست می‌آید؛ ولی در بحث دربارهٔ اجزای سازندهٔ اتم‌ها، ژول به دلیل آنکه یکای بزرگی است مناسب نیست و معمولاً از یکای دیگری برای انرژی به نام الکترون ولت (eV) استفاده می‌شود. **یک الکترون ولت برابر مقدار انرژی موردنیاز برای عبور یک الکترون از اختلاف پتانسیل ۱ ولت در خلأ است.** درحالی که یک ژول برابر با مقدار انرژی بار الکتریکی برابر یک کولن در عبور از اختلاف پتانسیل یک ولت است. در نتیجه رابطهٔ بین الکترون ولت و ژول به‌صورت زیر است :

$1eV = 1/6 \times 10^{-19} J = (1V) \times (1/6 \times 10^{-19} C)$ = انرژی یک الکترون در عبور از اختلاف پتانسیل یک ولت

تمرین ۷ــ۱

ثابت پلانک را برحسب eV.s به‌دست آورید.

تمرین ۷ـ۲

نور زرد با بسامد تقریبی $۶ \times ۱۰^{۱۴} Hz$، بسامد اصلی نور خورشید را تشکیل می‌دهد. انرژی‌ای که هر کوانتوم این نور (فوتون) حمل می‌کند برحسب eV چه‌مقدار است؟

تمرین ۷ـ۳

انرژی یک کوانتوم رنگ معینی از نور مرئی، برابر $۵ \times ۱۰^{-۱۹} J$ است. رنگ این نور را مشخص کنید.

تمرین ۷ـ۴

بیشترین طول موج گسیلی که از بدن انسان تابش می‌شود برابر $\lambda = ۹۴۰ \mu m$ است.

الف) بسامد این تابش چه‌مقدار است؟

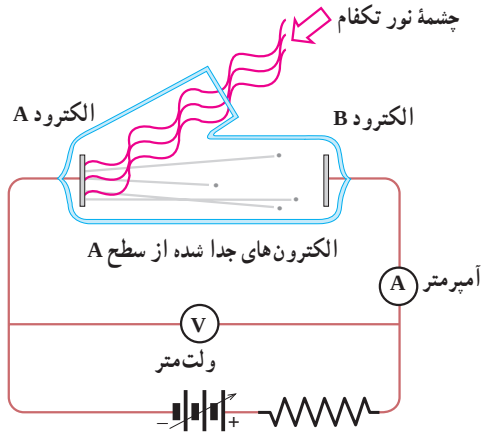
ب) نوع این تابش در چه گستره‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی قرار دارد؟

پ) انرژی‌ای که توسط هر کوانتوم این تابش الکترومغناطیسی حمل می‌شود برحسب eV چه‌مقدار است؟

۷ـ۲ـ فوتون و پدیدهٔ فوتوالکتریک

در سال ۱۸۸۷ میلادی، هانریش هرتز دانشمند آلمانی، مشاهده کرد که وقتی نوری با طول موج بسیار کوتاه ــ مانند نور فرابنفش ــ به کلاهک فلزی یک الکتروسکوپ (برق‌نما) باردار منفی می‌تابد، باعث تخلیهٔ الکتروسکوپ (برق‌نما) می‌شود. آزمایش‌های دیگر نشان دادند که این تخلیهٔ الکتریکی، به دلیل جدا شدن الکترون‌ها از سطح کلاهک فلزی روی داده است. این پدیده، یعنی جدا کردن الکترون‌ها از سطح یک فلز توسط تاباندن نور بر آن را پدیدهٔ **فوتوالکتریک** و الکترون‌های گسیل شده از سطح فلز را **فوتوالکترون** می‌نامند.

برای بررسی پدیدهٔ فوتوالکتریک از دستگاهی مطابق شکل ۷ــ۵ استفاده می کنیم. در این دستگاه دو الکترود فلزی A و B در یک محفظهٔ خلأ قرار دارند و از بیرون به یک منبع ولتاژ قابل تنظیم متصل شده‌اند. الکترود A در مقابل یک چشمهٔ نور تکفام (تک بسامد) قرار دارد.



شکل ۷ــ۵

آزمایش نشان می‌دهد که اگر نوری بر الکترود A بتابد هر قدر هم که ولتاژ بالا باشد، جریانی در مدار مشاهده نمی‌شود. ولی هنگامی که نوری با بسامد مناسب به الکترود A بتابد جریان در مدار برقرار می‌شود.

وجود این جریان را می‌توانیم به این صورت تفسیر کنیم که تاباندن نور باعث جدا شدن فوتوالکترون‌ها از سطح الکترود A و گسیل آنها شده است. براساس قوانین فیزیک کلاسیک، اگر شدت نور برای گسیل فوتوالکترون‌ها از الکترود A کافی باشد، اثر فوتوالکتریک باید در هر بسامدی رخ دهد. درحالی که آزمایش نشان می‌دهد، اگر بسامد نوری که بر A فرود می‌آید کمتر از بسامد معینی(موسوم به بسامد قطع) باشد، اثر فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. برای توجیه پدیدهٔ فوتوالکتریک باید به تفسیر کوانتومی آن بپردازیم.

پیش از این دیدیم که بنا بر فرضیهٔ پلانک انرژی تابشی یک موج الکترومغناطیسی گسیل شده با بسامد f، تنها می‌تواند مضرب درستی از یک مقدار پایه به نام کوانتوم انرژی (hf) باشد. اینشتین در سال ۱۹۰۵ میلادی برای تفسیر پدیدهٔ فوتوالکتریک، با استفاده از فرضیهٔ پلانک فرض کرد که هر موج الکترومغناطیسی با بسامد f از بسته‌های متمرکز یا کوانتوم‌های انرژی تشکیل شده است که آنها را **فوتون** می‌نامند.

فوتون‌های نور با رنگ‌های مختلف انرژی یکسان ندارند. فوتون بنفش انرژی بیشتر و فوتون

قرمز انرژی کمتری دارد. اگر بسامد یک موج الکترومغناطیسی برابر f باشد، انرژی فوتون آن برابر خواهد بود با

$$E = hf \qquad (۳_۷)$$

براساس پیشنهاد اینشتین انرژی یک موج الکترومغناطیسی با بسامد f تنها می‌تواند مضرب درستی از انرژی یک فوتون باشد؛ یعنی :

$$E = nhf \qquad (۴_۷)$$

در این صورت می‌گوییم این موج از n فوتون تشکیل شده است.

مثال ۷ـ۲

الف) انرژی فوتون نور زرد با طول موج میانگین ۵۸۹nm را برحسب الکترون‌ولت به‌دست آورید. ثابت پلانک برابر است با $h = ۴/۱۴ \times ۱۰^{-۱۵} eVs$.

ب) تعداد فوتون‌هایی را که در یک ثانیه از یک لامپ زرد ۶۰ واتی گسیل می‌شوند، محاسبه کنید.

پاسخ

الف) موج‌های الکترومغناطیسی با سرعت نور حرکت می‌کنند؛ از این رو داریم :

$$\lambda f = c$$

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

$$= \frac{۴/۱۴ \times ۱۰^{-۱۵} \times ۳ \times ۱۰^{۸}}{۵۸۹ \times ۱۰^{-۹}}$$

$$= ۲/۱۱ \text{ eV}$$

ب)

$$E_T = Pt = ۶۰ \times ۱ = ۶۰ J = ۳۷/۵ \times ۱۰^{۱۹} eV$$

$$E_T = nhf = nE$$

$$۳۷/۵ \times ۱۰^{۱۹} = n \times ۲/۱۱$$

$$n \simeq ۱/۸ \times ۱۰^{۲۰}$$

یعنی در هر ثانیه $۱/۸ \times ۱۰^{۲۰}$ فوتون از این لامپ گسیل می‌شود که عدد بسیار بزرگی است.

اینشتین همچنین فرض کرد که در پدیدهٔ فوتوالکتریک،هر فوتون (با انرژی hf) صرفاً با یک الکترون بر هم کنش می‌کند؛ به‌طوری‌که اگر انرژی فوتون به قدر کافی بزرگ باشد، بخشی از آن صرف جداکردن الکترون از فلز می‌شود و مابقی آن به انرژی جنبشی الکترون جداشده تبدیل می‌شود. این فرض اینشتین را می‌توان به کمک قانون پایستگی انرژی، به‌صورت زیر نوشت :

$$hf=W+K \qquad (۵_۷)$$

که در آن W انرژی لازم برای جداکردن الکترون از سطح فلز و K انرژی جنبشی الکترون جداشده است. برخی از الکترون‌ها در فلز کمتر مقیداند و برای خارج کردن آنها از فلز کار کمتری لازم است. اگر حداقل کار لازم برای خارج کردن الکترون‌ها از یک فلز خاص برابر $W_{\circ}$ باشد، انرژی جنبشی سریع‌ترین فوتوالکترون‌های گسیل‌شده از آن برابر خواهد بود با :

$$K_{\text{بیشینه}} = hf - W_{\circ} \qquad (۶_۷)$$

$W_{\circ}$ را **تابع کار** فلز می‌نامند و همان‌گونه که گفتیم حداقل کار لازم برای خارج کردن یک الکترون از فلز است.

در رابطهٔ ۷ــ۶ اگر hf از $W_{\circ}$ کوچک‌تر باشد، هیچ الکترونی از فلز کَنده نمی‌شود. در نتیجه hf باید حداقل برابر $W_{\circ}$ باشد. به این ترتیب، بسامد قطع از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$f_{\circ} = \frac{W_{\circ}}{h} \qquad (۷_۷)$$

مثال ۷ــ۳

تابع کار تنگستن ۴/۵۲eV است.

الف) بسامد و طول موج قطع تنگستن را حساب کنید.

ب) بیشینه انرژی جنبشی الکترون‌ها را هنگامی که طول موج ۱۹۸nm به‌کار می‌رود، حساب کنید.

پاسخ

الف) بسامد قطع برابر است با

$$f_{\circ} = \frac{W_{\circ}}{h} = \frac{۴/۵۲ \times ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}\,J}{۶/۶۳ \times ۱۰^{-۳۴}\,J.s}$$

$$= ۱/۰۹ \times ۱۰^{۱۵}\,s^{-۱}$$

با توجه به رابطهٔ $\lambda_{\circ} = \frac{c}{f_{\circ}}$ ، طول موج قطع برابر است با

$$\lambda_{\circ} = \frac{۳ \times ۱۰^{۸}}{۱/۰۹ \times ۱۰^{۱۵}} = ۲/۷ \times ۱۰^{-۷}\,m$$

$$= ۲۷۰\,nm$$

ب)

$$K_{\text{بیشینه}} = hf - W_{\circ}$$

$$= \frac{hc}{\lambda} - W_{\circ}$$

$$= \frac{۱۲۴۰\,eV.nm}{۱۹۸\,nm} - ۴/۵۲\,eV$$

$$= ۱/۷۴\,eV \simeq ۲/۷ \times ۱۰^{-۱۹}\,J$$

تمرین ۷ـ۵

طول موج قطع برای اثر فوتوالکتریک در یک فلز معین برابر ۲۵۴nm است.

الف) تابع کار این فلز برحسب الکترون ــ ولت چه‌مقدار است؟

ب) آیا اثر فوتوالکتریک به ازای $\lambda > ۲۵۴nm$ مشاهده خواهد شد یا به ازای $\lambda < ۲۵۴nm$؟ چرا؟

تمرین ۷ـ۶

تابع کار فلز روی ۴/۳۱eV است. هرگاه نور بر سطحی از جنس روی بتابد و فوتوالکترون‌ها مشاهده شوند،

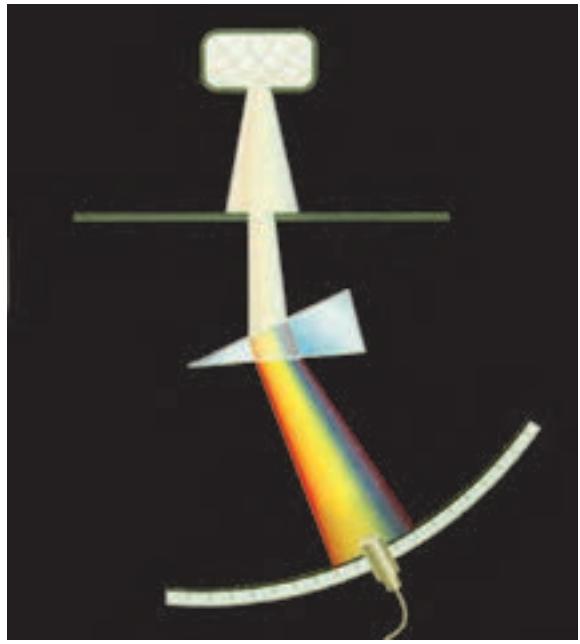
الف) بلندترین طول موجی که سبب گسیل فوتوالکترون‌ها می‌شود چه‌مقدار است؟

ب) وقتی نور به طول موج ۲۲۰nm به‌کار گرفته شود، انرژی جنبشی بیشینهٔ فوتوالکترون‌ها چقدر می‌شود؟

۷ــ۳ــ طیف اتمی

علاوه‌بر آنچه تا اینجا به آنها اشاره کردیم، پدیده‌های دیگری نیز هستند که فیزیک کلاسیک قادر به تفسیر آنها نبود. لذا فیزیک‌دانان با فرض‌های غیرکلاسیکی ــ مانند فرضیه‌های پلانک و اینشتین که قبلاً به آنها اشاره شد ــ توانستند این پدیده‌ها را به‌خوبی تفسیر کنند. توصیف این پدیده‌ها فراتر از سطح این کتاب است و ما در اینجا تنها به عنوان نمونه طیف گسیل شده از اتم‌ها را که بر مبنای فیزیک کلاسیک قابل تفسیر نیست، ذکر می‌کنیم.

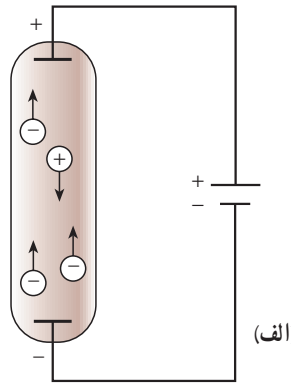
در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه با پاشیدگی نور در منشور آشنا شدید و دیدید که نیوتون برای نخستین بار با گذراندن نور خورشید از منشور «طیف نور سفید» را تشکیل داد. نیوتون نشان داد که نور سفید آمیزه‌ای از رنگ‌های مختلف است. اکنون می‌دانیم نور سفید از طول موج‌های مختلفی، از نور بنفش با طول موج حدود ۰/۴μm تا نور قرمز با طول موج حدود ۰/۷μm، تشکیل شده است. طیف نور سفید که یک طیف پیوسته است در شکل ۷ــ۶ نشان داده شده است.

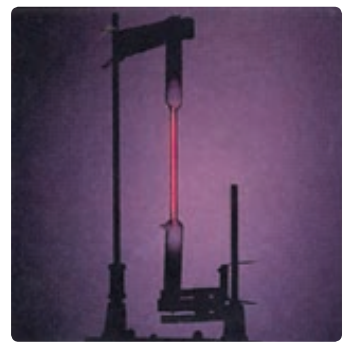


شکل ۷ــ۶

به همین ترتیب می‌توان طیف هر نوری را که از رنگ‌های مختلف تشکیل شده باشد، توسط پاشیدگی در منشور شناسایی کرد. پیش از این با تابش گرمایی که از سطح جسم‌های جامد گسیل می‌شود، آشنا شدیم و دیدیم که این تابش دارای طیف پیوسته است.

اکنون به بررسی نوع دیگری از تابش می‌پردازیم. این تابش توسط لامپ‌های حاوی بخار بسیار رقیق عنصرها گسیل می‌شود. این لامپ‌ها مطابق شکل ۷ــ۷ــ الف به‌صورت لوله‌های باریک شیشه‌ای هستند که درون آنها یک گاز رقیق در فشار کم وجود دارد. دو الکترود به نام‌های کاتد و آند در دو انتهای لوله قرار دارند. اگر بین این دو الکترود ولتاژ بالایی برقرار شود، اتم‌های گاز درون لامپ مطابق شکل ۷ــ۷ــ ب و پ شروع به گسیل نور می‌کنند. نوری که از لامپ‌های حاوی بخارعنصرهای متفاوت گسیل می‌شود، با یکدیگر تفاوت دارد. برای مثال نوری که اتم‌های بخار جیوه گسیل می‌کنند، همان‌گونه که در شکل ۷ــ۷ نشان داده شده است به رنگ نیلی ــ آبی است. اگر این نور را مطابق شکل۷ــ۷ از منشور بگذرانیم و طیف آن را تشکیل دهیم، می‌بینیم که این طیف پیوسته نیست، بلکه تنها از چند خط رنگی جدا از هم با طول موج‌های معین تشکیل شده است.

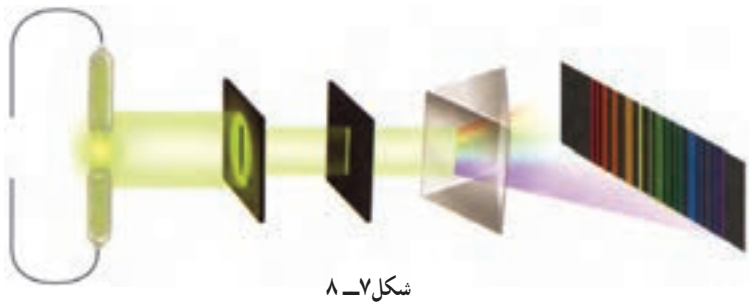



(ب)

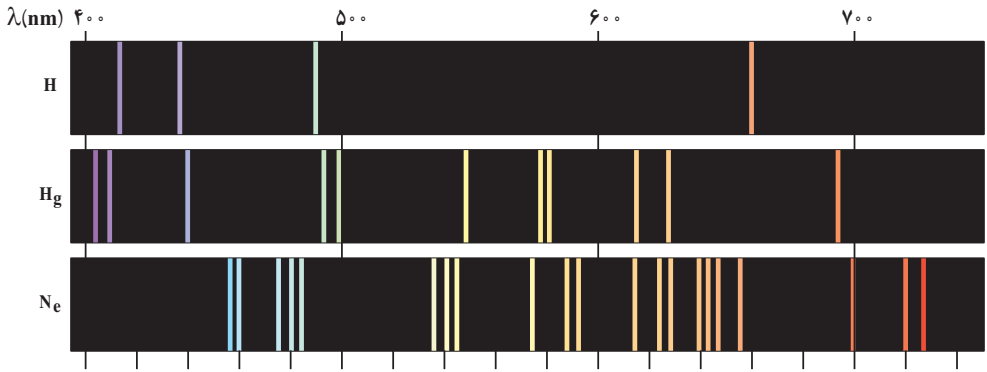
(پ)

شکل۷ــ۷

اگر درون لامپ به جای بخار جیوه، بخار عنصر دیگری باشد، بازهم در طیف حاصل خط‌های رنگی جدا از هم دیده می‌شود، ولی این خط‌ها هم از نظر تعداد و هم از نظر طول موج با خط‌های طیف حاصل از لامپ بخار جیوه تفاوت دارد. طیف نور گسیل شده از بخار هر عنصر را ***طیف اتمی*** آن عنصر می‌نامند. پس می‌توان گفت که طیف اتمی عنصرهای مختلف باهم تفاوت دارد. طیف اتمی چند عنصر در شکل ۷ــ۸ نشان داده شده است. طیف اتمی حاصل از نور گسیل شده از بخار عنصرها را طیف گسیلی (یا نشری) آن اتم‌ها می‌نامند.



شکل۷ــ ۸



شکل۷ــ۹

طیف اتمی جیوه، خط‌هایی در ناحیهٔ فرابنفش دارد؛ یعنی، یک لامپ بخار جیوه مقدار زیادی نور فرابنفش نیز گسیل می‌کند. چون تابش فرابنفش برای انسان مضر است، نباید به‌طور مستقیم در معرض نور گسیل شده از لامپ بخار جیوه قرار گرفت.

درون لامپ‌های فلورسان نیز بخار جیوه وجود دارد، امّا دیوارهٔ درونی این لامپ‌ها با پوشش نازکی از یک مادهٔ شیری رنگ (مخلوطی از بورات کادمیوم، سیلیکات روی و تنگستات کلسیم) پوشانده

شده است. این ماده دارای این ویژگی است که اگر نور تکفام در ناحیهٔ فرابنفش بر آن بتابد، از خود نور سفید گسیل می‌کند. پس نوری که از لامپ فلورسان گسیل می‌شود، نور سفید است. در کاربردهای متداول، از لامپ بخار جیوهٔ بدون پوشش فلورسان به‌عنوان لامپ روشنایی استفاده نمی‌شود.

طیف جذبی : در سال ۱۸۱۴ میلادی فرانهوفر، فیزیک‌دان آلمانی، کشف کرد که اگر به‌دقت به طیف خورشید بنگریم، خط های تاریکی در طیف پیوستهٔ آن مشاهده خواهیم کرد (شکل ۷ــ۱۰). این مطلب نشان می‌دهد که بعضی از طول موج‌ها در نوری که از خورشید به‌زمین می‌رسد، وجود ندارد و به‌جای آنها، در طیف پیوستهٔ خورشید خط‌های تاریک (یا سیاه) دیده می‌شود.

اکنون می‌دانیم که گازهای عنصرهای موجود در جوّخورشید، بعضی از طول موج‌های گسیل‌شده از خورشید را جذب می‌کنند و نبود آنها در طیف پیوستهٔ خورشید به‌صورت خط‌های تاریک ظاهر می‌شود. طیف نور سفیدی را که بعضی از خط‌ها با طول موج‌های آن جذب شده باشد، **طیف جذبی** می‌نامیم.

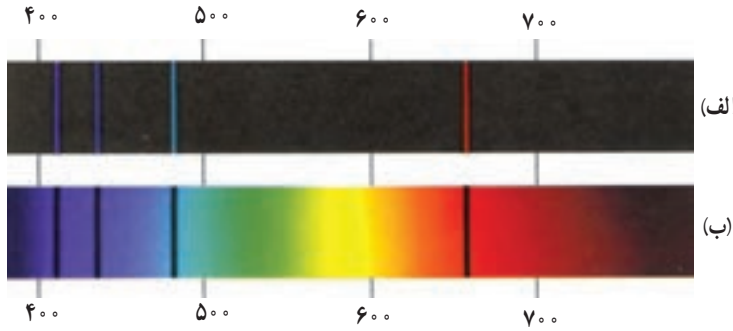
در اواسط سدهٔ نوزدهم، معلوم شد که اگر نور سفید از داخل بخار عنصری عبور کند و سپس طیف آن تشکیل شود، در طیف آن، خط‌های تاریکی ظاهر می‌شود. این خط‌ها (طول موج‌ها) توسط اتم‌های بخار عنصر جذب شده‌اند. مطالعهٔ طیف‌های گسیلی و جذبی عنصرهای مختلف نشان می‌دهد که :

۱ــ در طیف گسیلی و در طیف جذبی اتم‌های هر عنصر طول موج‌های معینی وجود دارد که از ویژگی‌های مشخصهٔ آن عنصر است؛ یعنی، طیف‌های گسیلی و جذبی هیچ دو عنصری مثل هم نیست.

۲ــ اتم هر عنصر دقیقاً همان طول موج‌هایی را از نور سفید جذب می‌کند که اگر دمای آن به اندازهٔ کافی بالا رود و یا به هر صورت دیگر برانگیخته شود، آنها را تابش می‌کند.

شکل ۷ــ۱۰ــ خط‌های تاریکی که در طیف خورشید دیده می‌شود، خط‌های فرانهوفر نام دارد. طول موج‌های مربوط توسط جو خورشید از نور تابشی خورشید حذف شده است.

طیف‌های گسیلی (نشری) و جذبی اتم هیدروژن در شکل ۷ــ۱۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۷ــ ۱۱

الف) طیف گسیلی، خط‌های روشن معرف طول موج‌های گسیلی هستند.

ب) طیف جذبی، خط‌های تاریک در زمینهٔ روشن معرف طول موج‌های جذب شده هستند.

از آنچه گفته شد، نتیجه می‌گیریم که طیف اتمی هر عنصر خط‌ها یا طول موج‌های ویژهٔ خود را دارد، و طیف‌های گسیلی و جذبی هر عنصر مانند اثرانگشت افراد می‌تواند برای شناسایی اتم‌ها از یکدیگر به‌کار رود.

فعالیت ۷ـ۳

با بحث در گروه خود مشخص کنید که چگونه می‌توان با استفاده از طیف جذبی خورشید به وجود عنصرهای مختلف در جو خورشید پی برد؟

تهیه و بررسی طیف‌های گسیلی و جذبی را ***طیف نمایی*** می‌نامند. طیف نمایی ابزار توانمندی برای شناسایی عنصرهاست. در سال‌های پایانی سدهٔ نوزدهم میلادی چند عنصر ناشناخته، تنها به کمک طیف‌نمایی کشف شد، ولی علی‌رغم این کاربردهای موفق تجربی، در قرن نوزدهم نظریهٔ قابل قبولی برای تفسیر طیف اتمی وجود نداشت. به‌عبارت دیگر، این که چرا هر عنصر طیف مخصوص به خود را دارد، سؤالی بود که در فیزیک کلاسیک پاسخی برای آن یافت نمی‌شد.

درک ساز و کار جذب و گسیل نور به وسیلهٔ اتم‌ها از دیدگاه فیزیک کلاسیک آسان است؛ زیرا بنابر نظریه‌های کلاسیکی یک اتم در صورتی ***نور گسیل*** می‌کند که به طریقی ــ مانند برخورد با سایر اتم‌ها یا توسط میدان‌های الکتریکی ــ به الکترون‌های آن انرژی داده شود؛ در نتیجه الکترون‌ها با به‌دست آوردن انرژی ارتعاش می‌کنند و موج‌های الکترومغناطیسی به‌وجود می‌آورند؛ یعنی، نور گسیل می‌کنند. اما این که چرا اتم‌های همهٔ عنصرها موج‌های الکترومغناطیسی با طول موج‌های یکسان گسیل نمی‌کنند و این که چرا هر عنصر طول موج خاص خود را دارد از دیدگاه فیزیک کلاسیک قابل توجیه نیست.

درمورد جذب نور هم، از دیدگاه فیزیک کلاسیک، می‌توان گفت که وقتی نور به یک اتم می‌تابد، نوسان میدان الکتریکی ناشی از نور فرودی، باعث می‌شود که الکترون‌های اتم شروع به ارتعاش کنند و نور فرودی را جذب کنند. ولی باز هم در این دیدگاه هیچ توجیه قانع‌کننده‌ای برای این که «**چرا هر عنصر تنها طول موج‌های خاصی را که مشخصهٔ آن عنصر است جذب می‌کند و بقیهٔ طول موج‌ها را جذب نمی‌کند؟**» وجود ندارد.

نیلس بور، فیزیک‌دان دانمارکی، در سال ۱۹۱۳ میلادی با بیان فرضیه‌هایی دربارهٔ اتم‌ها، طیف اتمی را توجیه کرد و بار دیگر نشان داد که تجدید نظر اساسی در فیزیک کلاسیک ضروری است.

رابطهٔ ریدبرگ ــ بالمر : اتم هیدروژن ساده‌ترین اتم‌هاست و طیف آن اولین طیفی بود که به‌طور کامل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آنگستروم تا سال ۱۸۸۵ میلادی طول موج چهارخط از طیف اتم هیدروژن را با دقت زیاد اندازه گرفت. این طول موج‌ها در شکل ۷ــ۱۱ نشان داده شده‌اند. بالمر که یک معلم سوئیسی بود، این اندازه‌گیری‌ها را مطالعه کرد و نشان داد که طول موج خط‌های این طیف را می‌توان با دقت بسیار زیاد از رابطهٔ زیر به‌دست آورد :

$$\lambda = ۳۶۴/۵۶ \frac{n^۲}{n^۲ - ۴} \qquad (۷ــ۸)$$

که در آن λ طول موج خط‌های طیف برحسب نانومتر (nm) و n یکی از عددهای صحیح زیر است :

$$n = ۳,۴,۵,۶$$

گفتنی است که بالمر این رابطه را صرفاً با بررسی رابطه‌های ریاضی مختلف و بدون هیچ‌گونه تجربهٔ فیزیکی به‌دست آورد.

مثال ۷ـ۴

طول موج خط‌های طیفی شکل ۷ـ۱۱ را به کمک رابطهٔ بالمر به‌دست آورید.

پاسخ

داریم :

$$\lambda = ۳۶۴/۵۶\frac{n^۲}{n^۲-۴}$$

برای $n = ۳$ به‌دست می‌آوریم.

$$\lambda_۱ = ۳۶۴/۵۶\frac{۹}{۹-۴} = ۶۵۶/۲nm$$

برای $n = ۴$ داریم :

$$\lambda_۲ = ۳۶۴/۵۶\frac{۱۶}{۱۶-۴} = ۴۸۶/۰nm$$

و به همین ترتیب

$$n = ۵ \Longrightarrow \lambda_۳ = ۴۳۴/۰nm$$

$$n = ۶ \Longrightarrow \lambda_۴ = ۴۱۰/۱۳nm$$

کار عمده در زمینهٔ جست‌وجو برای طیف کامل اتم هیدروژن توسط ریدبرگ در حدود سال ۱۸۹۰میلادی انجام شد. ریدبرگ کار کردن با عکس طول موج را مناسب‌تر تشخیص داد؛ لذا رابطهٔ بالمر (معادلهٔ ۷ـ۸) را به صورت زیر نوشت :

$$\frac{۱}{\lambda} = R_H(\frac{۱}{۲^۲} - \frac{۱}{n^۲}) \qquad (۷ـ۹)$$

که در آن R_H ثابت ریدبرگ برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود و مقدار آن برابر است با :

$$R_H = ۰/۰۱۰۹(nm)^{-۱}$$

طول موج تمامی خط‌های طیف اتم هیدروژن را می‌توان از رابطهٔ زیر که به رابطهٔ ریدبرگ معروف است به‌دست آورد.

$$\frac{۱}{\lambda} = R_H(\frac{۱}{n'^۲} - \frac{۱}{n^۲}) \quad n > n' \qquad (۷ـ۱۰)$$

با قرار دادن $n' = ۲$ رابطهٔ بالمر (۷ـ۹) به‌دست می‌آید. خط‌های طیف مربوط به $n' = ۲$ را «رشتهٔ بالمر» می‌نامند.

خط‌های دیگر طیف اتم هیدروژن، با قرار دادن عددهای صحیح دیگر به جای n' به شرح زیر به‌دست می‌آیند.

به ازای $n'=1$ داریم :

$$\frac{1}{\lambda}=R_H\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{n^2}\right) \qquad n=2,3,4,...$$

این رشته را «رشتهٔ لیمان» می‌نامند.

همچنین به ازای $n'=3$ داریم :

$$\frac{1}{\lambda}=R_H\left(\frac{1}{3^2}-\frac{1}{n^2}\right) \qquad n=4,5,6,...$$

این رشته را نیز «رشتهٔ پاشن» می‌نامند. در جدول ۷ــ۱ رشته‌های طیف اتم هیدروژن داده شده‌اند.

جدول ۷ــ۱

نام رشته	مقدار n'	رابطهٔ ریدبرگ مربوط	مقدارهای n	گسترهٔ طول موج
لیمان	۱	$\frac{1}{\lambda}=R_H\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{n^2}\right)$	$n=2,3,4,...$	فرابنفش
بالمر	۲	$\frac{1}{\lambda}=R_H\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right)$	$n=3,4,5,...$	فرابنفش و مرئی
پاشن	۳	$\frac{1}{\lambda}=R_H\left(\frac{1}{3^2}-\frac{1}{n^2}\right)$	$n=4,5,6,...$	فروسرخ
براکت	۴	$\frac{1}{\lambda}=R_H\left(\frac{1}{4^2}-\frac{1}{n^2}\right)$	$n=5,6,7,...$	فروسرخ
پفوند	۵	$\frac{1}{\lambda}=R_H\left(\frac{1}{5^2}-\frac{1}{n^2}\right)$	$n=6,7,8,...$	فروسرخ

مثال ۷ـ۵

طول موج اولین خط طیفی اتم هیدروژن در رشتهٔ لیمان را که برای آن $n'=1$ و $n=2$ است به‌دست آورید و تعیین کنید که این خط در کدام گسترهٔ موج‌های الکترومغناطیسی واقع است.

پاسخ

برای $n'=1$ و $n=2$ طبق رابطهٔ ریدبرگ داریم :

$$\frac{1}{\lambda}=R_H\left(\frac{1}{1}-\frac{1}{4}\right)=\frac{3}{4}R_H$$

در نتیجه طول موج این خط برابر است با :

$$\lambda=\frac{4}{3R_H}=\frac{4}{3\times 0/0109(nm)^{-1}}=121nm$$

با مراجعه به طیف موج‌های الکترومغناطیسی در فصل ۲ مشاهده می‌کنیم که این خط طیفی در ناحیهٔ فرابنفش واقع است.

وجود خط‌های طیفی متفاوت برای اتم‌ها و رابطهٔ ساده و دقیقی مثل رابطهٔ ریدبرگ برای طیف اتم هیدروژن، لزوم داشتن الگویی برای اتم را نشان می‌داد. الگویی که بتوان به کمک آن این نتیجه‌های تجربی را توجیه کرد.

۷ـ۴ـ الگوهای اتمی

الگوی اتمی تامسون : تامسون، دانشمند انگلیسی که با آزمایش‌هایی موفق به کشف الکترون در سال ۱۸۹۶ میلادی شده بود، نخستین الگوی اتمی را در سال ۱۸۹۹ میلادی ارائه داد. در این الگو، اتم به صورت توزیع کروی یکنواختی از جرم و بار مثبت در نظر گرفته شد که الکترون‌ها (بارهای منفی) مانند کشمش‌های درون یک کیک کشمشی درون آن قرار دارند.

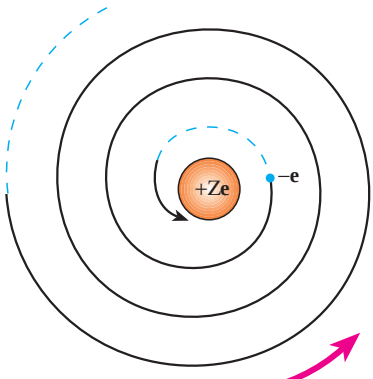
اگر چه تامسون براساس الگوی کیک کشمشی توانست برخی از ویژگی‌های اتم‌ها را توجیه کند، ولی رادرفورد با آزمایش‌هایی که به منظور تأیید و تکمیل الگوی کیک کشمشی تامسون انجام داد، به نتیجه‌هایی دست یافت که با چنین الگویی سازگار نبود. آزمایش‌های وی نشان دادند که بار مثبت اتم

باید در بخش کوچکی در مرکز اتم متمرکز باشد. رادرفورد براساس این نتیجه‌ها در سال ۱۹۱۲میلادی الگوی دیگری برای ساختار اتم ارائه کرد.

الگوی اتمی رادرفورد : در الگوی اتمی رادرفورد همهٔ بار مثبت اتم در یک ناحیهٔ مرکزی با حجم بسیار کوچکی به نام هسته متمرکز شده است و اطراف آن را الکترون‌ها با بار منفی، در فاصله‌ای زیاد احاطه کرده‌اند، به‌گونه‌ای که می‌توان گفت فضای بین هسته و الکترون‌ها خالی است. رادرفورد در الگویی که برای اتم ارائه کرد به این که الکترون‌ها در اتم چگونه حرکت می‌کنند اشاره‌ای نکرد. اشکال اساسی این الگو آن است که اگر آن الکترون‌ها را نسبت به هسته ساکن فرض کنیم، باید تحت تأثیر نیروی ربایشی الکتریکی بین هسته و الکترون، روی هسته سقوط کنند و در نتیجه اتم ناپایدار باشد؛ یعنی ساختار داخلی آن درهم فرو ریزد که این موضوع کاملاً خلاف چیزی است که در عمل وجود دارد.

اگر هم فرض کنیم که الکترون‌ها ــ مانند سیاره‌های منظومهٔ خورشیدی که به دور خورشید در حرکت‌اند ــ به دور هسته در گردش باشند، باز هم این حرکت به دلیل زیر پایدار نمی‌ماند.

در فصل قبل در قسمت تولید موج‌های الکترومغناطیسی دیدیم، حرکت شتابدار بارهای الکتریکی در آنتن موج الکترومغناطیسی تولید می‌کند. حرکت الکترون به دور هسته نیز یک حرکت شتابدار است، از این‌رو، بنابر نظریهٔ الکترومغناطیسی کلاسیک باید این الکترون، موج الکترومغناطیسی گسیل کند و بسامد موج گسیل شده با بسامد حرکت مداری الکترون برابر است. در نتیجه با گسیل موج الکترومغناطیسی، از انرژی الکترون کاسته می‌شود که این کاهش انرژی با توجه به آنچه در مبحث حرکت دایره‌ای دیدیم، باعث می‌شود که شعاع مدار الکترون به دور هسته کوچک‌تر و بسامد حرکت آن بیشتر شود. تغییر بسامد مداری به معنای تغییر بسامد موج الکترومغناطیسی است که گسیل می‌شود. بنابراین الکترون‌ها به تدریج انرژی خود را از دست می‌دهند و بسامد حرکت آنها به تدریج افزایش می‌یابد، بسامد موج الکترومغناطیسی گسیل شده نیز به تدریج زیاد می‌شود. به این ترتیب باید طیف موج الکترومغناطیسی گسیل شده از اتم، پیوسته باشد و الکترون پس از گسیل‌های متوالی موج‌های الکترومغناطیسی روی هسته بیفتد (شکل۷ــ۱۲).



شکل ۷ــ۱۲

بدین‌ترتیب الگوی رادرفورد برای اتم، با تجربه سازگار نیست؛ زیرا اولاً، نمی‌تواند پایداری حرکت الکترون‌ها در مدارهای اتمی و در نتیجه پایداری اتم‌ها را توضیح دهد و ثانیاً، قادر به توجیه طیف گسستهٔ اتمی نیست.

الگوی اتمی بور : نیلس‌بور، فیزیکدان دانمارکی، در سال ۱۹۱۳ میلادی برای حل مشکل ناپایداری الگوی اتمی رادرفورد و با توجه به طیف گسستهٔ تابش گسیل شده از اتم‌ها و رابطهٔ تجربی ریدبرگ ــ بالمر برای طیف اتم هیدروژن، با الهام گرفتن از نظریه‌های کوانتومی پلانک و اینشتین الگویی برای اتم هیدروژن که یک الکترون دارد ارائه کرد. در این الگو، بور پیشنهاد کرد که قانون‌های مکانیک و قانون‌های الکترومغناطیسی کلاسیک، در مقیاس‌های اتمی باید همراه با فرضیه‌هایی در نظر گرفته شوند. این فرضیه‌ها را می‌توان به صورت ساده در چهار اصل زیر بیان کرد :

۱ــ الکترون، تنها روی مدارهای دایره‌ای با شعاع‌های معینی حرکت می‌کند، این مدارها «مدارهای مانا» نامیده می‌شوند.

حرکت الکترون با جرم m و بار $-e$ روی یک مدار دایره‌ای به شعاع r به مرکز هستهٔ با بار $+e$ در شکل ۷ــ۱۳ نشان داده شده است. نیروی مرکزگرا این حرکت از ربایش الکتریکی بین الکترون و هسته است و برابر است با $\frac{ke^2}{r^2}$ ($k=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}=9\times10^9\ N.m^2/C^2$). شتاب حرکت الکترون همان‌گونه که در مبحث حرکت دایره‌ای دیدیم برابر است با $\frac{v^2}{r}$ که در آن v سرعت حرکت الکترون روی مسیر دایره‌ای است؛ در نتیجه با استفاده از قانون دوم نیوتون داریم :

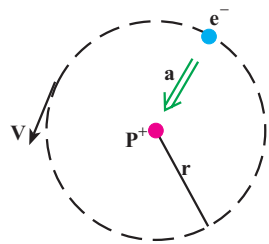
$$\frac{ke^2}{r^2}=\frac{mv^2}{r} \qquad (۷ــ۱۱)$$

از آنجا که انرژی پتانسیل الکترون در میدان الکتریکی هسته برابر $\frac{-ke^2}{r}$ است در نتیجه انرژی کل (پتانسیل + جنبشی) الکترون در این مدار برابر است با :

$$E=K+U=\frac{1}{2}mv^2-\frac{ke^2}{r} \qquad (۷ــ۱۲)$$

با استفاده از رابطهٔ ۷ــ۱۱ به‌دست می‌آوریم :

$$K=\frac{1}{2}mv^2=+\frac{ke^2}{2r} \qquad (۷ــ۱۳)$$



شکل ۷ــ۱۳

در نتیجه انرژی کل الکترون روی یک مدار مانا با شعاع r برابر است با :

$$E = -\frac{ke^2}{2r} \qquad (۱۴_۷)$$

۲ــ الکترون در حین حرکت روی یک مدار مانا، برخلاف نظریهٔ الکترومغناطیسی کلاسیک، تابشی گسیل نمی‌کند. در این وضعیت می‌گوییم الکترون در یک «حالت مانا» است.

۳ــ شعاع مدارهای مانا مقدارهای مشخص گسسته‌ای می‌توانند داشته باشند؛ اگر شعاع اولین مدار را برابر a_0 بگیریم شعاع‌های مجاز از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آیند.

$$r_n = a_0 n^2 \qquad n = 1,2,3,\ldots \qquad (۱۵_۷)$$

که در آن n یک عدد صحیح است.

علاوه بر این بور برای کوچک‌ترین شعاع مدار الکترون در اتم هیدروژن، یعنی a_0 که آن را شعاع اتم بور نیز می‌نامند، مقدار زیر را به‌دست آورد :

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 mke^2} \qquad (۱۶_۷)$$

که در آن h ثابت پلانک، k ثابت کولن، e بار الکترون و m جرم الکترون است.

مثال ۷ـ۶

شعاع اتم بور را محاسبه کنید.

پاسخ

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 mke^2}$$

$$= \frac{(6/63\times10^{-34}\,J.s)^2}{4(3/14)^2(9\times10^{-31}kg)(9\times10^{9}\,N.m^2/C^2)(1/6\times10^{-19}C)^2}$$

$$= 0/529\times10^{-10}m = 0/0529nm$$

اکنون اگر به کمک رابطهٔ ۷ــ۱۴ مقدار انرژی الکترون در مدار مجاز nام را محاسبه کنیم، به‌دست می‌آوریم :

$$E_n = -\frac{2\pi^2 mk^2 e^4}{h^2} \times \frac{1}{n^2} \qquad n = 1,2,... \qquad (۱۷_۷)$$

بدین ترتیب الکترون تنها مجاز است انرژی‌ای برابر با یکی از مقدارهایی که از رابطهٔ ۷ــ۱۷ به‌دست می‌آید داشته باشد. هر یک از این مقدارهای مجاز را یک *تراز انرژی* می‌نامند.

۴ــ الکترون تنها هنگامی می‌تواند تابش الکترومغناطیسی گسیل کند که از یک حالت مانا با انرژی E_{n_1} به حالت مانای دیگری با انرژی کمتر E_{n_2} ($n_2 < n_1$) برود، یا به عبارت دیگر از یک تراز انرژی بالاتر به یک تراز انرژی پایین‌تر برود. در این صورت، انرژی فوتون موج الکترومغناطیسی گسیل شده برابر اختلاف انرژی بین دو تراز است؛ یعنی :

$$hf = E_{n_1} - E_{n_2} \qquad (۱۸_۷)$$

رابطهٔ ۷ــ۱۷ را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم :

$$E_n = -\frac{E_R}{n^2} \qquad (۱۹_۷)$$

که در آن با استفاده از مقدار کمیت‌های ثابت e، m، k و h داریم :

$$E_R = \frac{2\pi^2 k^2 me^4}{h^2} = 2/17 \times 10^{-18} J = 13/6 eV$$

این مقدار انرژی را **یک ریدبرگ** می‌نامند. یک ریدبرگ برابر ۱۳/۶ الکترون ولت یا $2/17 \times 10^{-18}$ ژول است.

اگر الکترون اتم هیدروژن، در مدار اول (n = ۱) باشد، می‌گوییم در **حالت پایه** قرار دارد. مدارهای با انرژی بالاتر از E_1 را **حالت‌های برانگیخته** می‌خوانند. انرژی این حالت‌ها از رابطهٔ (۷ــ۱۹) به‌ازای n = ۲,۳,.... به‌دست می‌آید :

$$n = 2 \Rightarrow E_2 = -\frac{E_R}{4} = -3/4 eV = \frac{-1}{4} \text{ ریدبرگ}$$

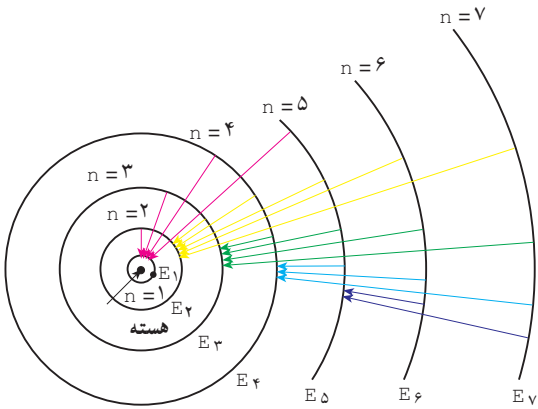
و

$$n = 3 \Rightarrow E_3 = -\frac{E_R}{9} = -1/5 eV = -\frac{1}{9} \text{ ریدبرگ}$$

و به همین ترتیب برای بقیهٔ مقدارهای n. این مقدارها، مقدارهای مجاز انرژی الکترون در اتم هیدروژن‌اند. هر مقدار مجاز انرژی را یک تراز انرژی الکترون در اتم هیدروژن می‌نامیم.

مدارهای الکترون در الگوی بور برای اتم هیدروژن در شکل ۷ــ۱۴ نشان داده شده است.

الگوی بور برای اتم هیدروژن نه تنها مشکل ناپایداری الگوی اتمی رادرفورد را نداشت، بلکه به کمک این الگو طیف گسیلی اتم هیدروژن و رابطهٔ تجربی ریدبرگ ــ بالمر نیز به‌درستی توضیح داده شد.



شکل ۷ــ ۱۴

مثال ۷ـ۷

هنگامی که الکترون در اتم هیدروژن از مدار n_1 به مدار n_2 ($n_1 > n_2$) می‌رود.

الف) بسامد فوتون موج الکترومغناطیسی گسیل شده را به‌دست آورید.

ب) طول موج این فوتون را محاسبه و نتیجه را با رابطهٔ ریدبرگ مقایسه کنید.

پاسخ

الف) با استفاده از رابطه‌های ۷ــ۱۸ و ۷ــ ۱۹ داریم :

$$f = \frac{E_{n_1} - E_{n_2}}{h} = \frac{E_R}{h}\left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right)$$

ب) داریم :

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

که در آن c سرعت نور است؛ در نتیجه :

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{E_R}{h}\left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right)$$

از این رابطه نتیجه می‌گیریم :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{E_R}{hc}\left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right)$$

از سوی دیگر داریم :

$$\frac{E_R}{hc} = \frac{2/17 \times 10^{-18}}{6/63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 1/09 \times 10^7 \, m^{-1} = 0/0109 (nm)^{-1}$$

که همان ثابت ریدبرگ است.

در نتیجه با فرضیه‌های بور می‌توانیم رابطهٔ تجربی ریدبرگ را به‌دست آوریم و طیف اتمی هیدروژن را توجیه کنیم. به این ترتیب وقتی الکترون از یکی از مدارهای با $n_1 > 2$ به مدار $n_2 = 2$ می‌رود، یکی از خط‌های رشتهٔ بالمر را گسیل می‌کند.

تمرین ۷ـ۷

مشخص کنید که برای خط‌های هر یک از رشته‌های دیگر طیف اتم هیدروژن الکترون باید از چه مدارهایی به چه مدارهایی برود؟

جذب تابش الکترومغناطیسی و وجود خط‌های جذبی در طیف اتمی اتم هیدروژن را نیز می‌توان به کمک الگوی بور برای اتم هیدروژن به صورت زیر توضیح داد. برای آن‌که الکترونی را از تراز انرژی n_1 به تراز انرژی n_2 $(n_2 > n_1)$ منتقل کنیم، باید به آن مقداری انرژی درست برابر اختلاف انرژی دو تراز بدهیم. هر چه اختلاف n_1 با n_2 بیشتر باشد، انرژی داده شده به الکترون نیز باید بیشتر باشد. این مقدار انرژی را الکترون با جذب فوتونی که درست همین مقدار انرژی دارد به‌دست می‌آورد.

فعالیت ۷ـ۴

موضوع زیر را در گروه خود به بحث گذاشته و نتیجه را به کلاس ارائه دهید.
به کمک الگوی اتمی بور برای اتم هیدروژن، نشان دهید که طول موج خط‌های طیف جذبی و طیف گسیلی اتم هیدروژن با یکدیگر برابرند.

انرژی بستگی الکترون : اگر انرژی الکترون را در حالتی که کاملاً از قید هسته رها شده است برابر با صفر بگیریم، انرژی آن روی مدارها که مقدار کمتری دارد باید منفی باشد، علامت منفی در رابطهٔ ۷ـ۱۷ نیز به همین معناست.

انرژی الکترون در مدار اول بور برابر $E_1 = -13/6eV$ است؛ و این بدان معناست که برای آنکه الکترونی را که در حالت پایهٔ اتم هیدروژن است کاملاً از قید هسته رها کنیم، باید به آن ۱۳/۶eV انرژی

بدهیم. این مقدار انرژی را **انرژی بستگی** الکترون در تراز اول اتم هیدروژن می‌نامیم. این مقدار با تجربه به خوبی سازگار است.

تمرین ۷ـ۸

انرژی بستگی الکترون را در هر یک از حالت‌های برانگیختهٔ E_2 و E_3 اتم هیدروژن به‌دست آورید.

نظریهٔ بور برای اتم هیدروژن را می‌توان برای هر اتم تک الکترونی دیگر به کار برد، هر چند که بار هسته‌ای آن بیشتر از $+e$ باشد.

الگوی اتمی بور برای اتم هیدروژن، بسامد خط‌های طیف اتم هیدروژن و نیز یون‌هایی را که یک الکترون دارند به درستی توجیه کرد؛ ولی این الگو هیچ اطلاعی دربارهٔ تعداد فوتون‌هایی که با یک بسامد معین گسیل می‌شوند نمی‌دهد. علاوه بر این برای اتم‌های با تعداد الکترون‌های بیشتر نیز پاسخی ندارد. البته این مسئله توسط مکانیک کوانتومی، با استفاده از الگوی ابر الکترونی یا الگوی اوربیتالی که در کتاب‌های شیمی خود با آن آشنا شده‌اید حل شده است. در این الگو نیز الکترون‌ها **حالت‌های کوانتومی** خاصی دارند که هر یک با یک مقدار معین انرژی و یا یک **تراز معین** انرژی مشخص می‌شود و الکترون تنها با تغییر دادن تراز انرژی خود می‌تواند فوتون گسیل یا جذب کند.

در ادامه به توصیف چگونگی عملکرد لیزر به طور ساده می‌پردازیم که اساس سازوکار آن بر همین توانایی اتم‌ها برای گسیل فوتون‌ها قرار دارد.

۷ـ۵ـ آشنایی با لیزر

بیش از نیم‌قرن از ساخت نخستین لیزر[۱] یاقوتی توسط مایمن[۲] و نخستین لیزر گازی هلیم ـ نئون توسط علی جوان دانشمند ایرانی در سال ۱۹۶۰ میلادی می‌گذرد، هر چند مبانی نظری لیزر سال‌ها پیش از آن توسط اینشتین در سال ۱۹۱۷ میلادی مطرح شده بود، ولی سال‌های نسبتاً زیادی طول کشید تا صنعت

۱ـ کلمهٔ لیزر از سر حرف واژه‌های انگلیسی درعبارت زیر گرفته شده و به معنای «تقویت نور به روش گسیل القایی تابش» است.
Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)

۲ـ T.H.Maiman

و فنّاوری امکان ساخت اولین لیزر را فراهم کند. از آن پس کاربرد لیزر در زمینه‌های مختلف به سرعت افزایش یافت به‌طوری که هم‌اکنون در بسیاری از وسیله‌های مورد استفادهٔ ما در زندگی و صنعت، از قبیل دستگاه‌های بازخوانی اطلاعات از روی لوح‌های فشرده، چاپگرها، شبکه‌های مخابرات کابل نوری، دستگاه‌های برش فلزات (شکل۷ــ ۱۵ــ الف) و ... کاربرد زیادی پیدا کرده است. در حرفهٔ پزشکی نیز جهت انجام پاره‌ای امور هم‌چون جراحی، بخیهٔ بافت‌های بدن، اصلاح دید چشم (شکل۷ــ ۱۵ــ ب) و ... کاربرد زیادی دارد.

(الف)

(ب)

شکل ۷ــ۱۵

فعالیت ۷ـ ۵

به اتفاق دیگر اعضای گروه خود، فهرستی دیگر از کاربردهای لیزر در زندگی، صنعت و فنّاوری تهیه کنید و به کلاس درس ارائه دهید.

در بخش‌های قبل دیدیم که هرگاه در یک اتم الکترون‌ها روی مدارهای مانا حرکت کنند، تابشی از آن اتم گسیل نمی‌شود. همچنین دیدیم برای آنکه الکترونی را از حالت n_1 به حالت n_2 $(n_2 > n_1)$ منتقل کنیم، باید به آن مقدار معینی انرژی بدهیم، که در این صورت گفته می‌شود، اتم به حالت برانگیخته رفته است و آن را به صورت زیر نمایش می‌دهیم :

$$\text{اتم}^* \longleftarrow \text{فوتون} + \text{اتم}$$

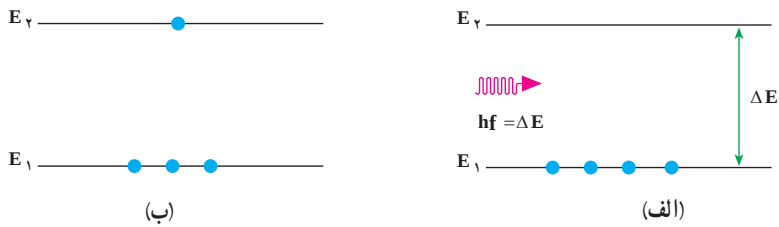
علامت ستاره حاکی از حالت برانگیخته است. بر هم کنش فوتون با اتم را جذب می‌نامیم که در نمودارهای شکل ۷ــ۱۶ نشان داده شده است. شکل ۷ــ۱۶ــ الف اتم را قبل از دریافت تابش و شکل

۷ــ۱۶ــ ب اتم را پس از دریافت تابش نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینید یکی از الکترون‌هایی که در تراز E_1 قرار دارد با جذب انرژی hf به تراز E_2 می‌رود؛ به‌عبارت دیگر :

$$E_1 + hf = E_2$$

یا

$$\Delta E = E_2 - E_1 = hf$$



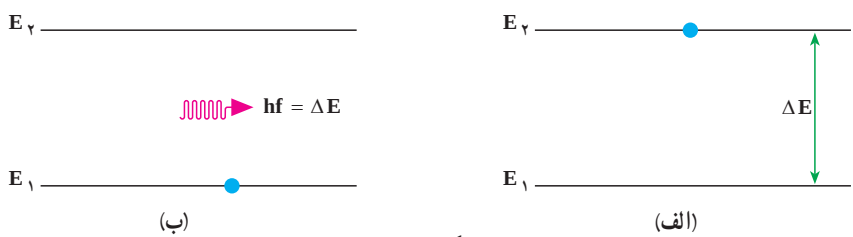
شکل ۷ــ۱۶

لازم به ذکر است که اتم تنها فوتون‌هایی را جذب می‌کند که انرژی آنها، hf، با اختلاف انرژی بین ترازهای اتمی، ΔE، برابر باشد. همچنین دیدیم که هرگاه اتم در حالت برانگیخته باشد با گسیل یک فوتون به حالت پایین‌تر می‌رود. این برهم کنش **گسیل خودبه‌خود** نامیده می‌شود و آن‌را به صورت زیر نمایش می‌دهیم :

$$\text{فوتون} + \text{اتم} \longrightarrow \text{اتم}^*$$

این برهم کنش در نمودارهای شکل ۷ــ۱۷ نشان داده شده است. شکل ۷ــ۱۷ــ الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۷ــ۱۷ــ ب اتم را در حالت پایه نشان می‌دهد. توجه کنید الکترون با گسیل تابش از حالت برانگیخته به حالت پایه می‌رود. در این مورد نیز انرژی فوتون گسیل شده برابر اختلاف انرژی بین دو تراز اتمی است؛ یعنی :

$$hf = E_2 - E_1 = \Delta E$$

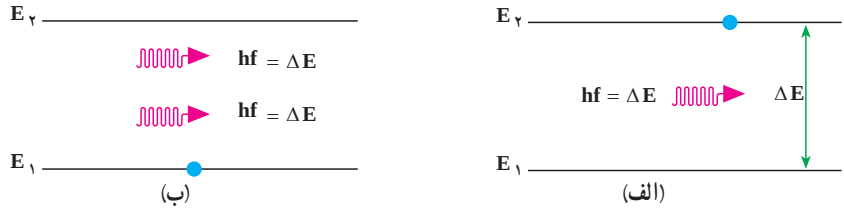


شکل ۷ــ۱۷

نوع دیگری از برهم کنش فوتون با اتم، که اساس کار لیزر به‌شمار می‌آید، **گسیل القایی** (یا تحریک شده) است. در این برهم کنش، اتم ابتدا درحالت برانگیخته است. آنگاه یک فوتون با انرژی hf که برابر اختلاف انرژی دو تراز اتم است، اتم برانگیخته را وا می‌دارد تا با گسیل یک فوتون دیگر با همین بسامد، به حالت پایین‌تر یا حالت پایه برود. این برهم کنش را به‌صورت زیر نمایش می‌دهیم :

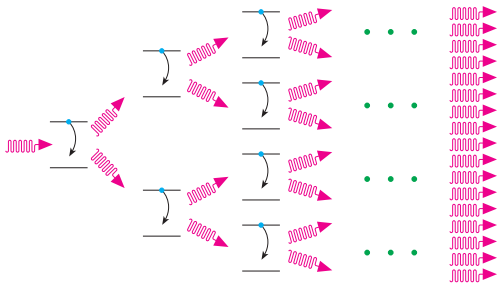
$$\text{فوتون} + \text{اتم} \longrightarrow \text{فوتون} + \text{اتم}^{*}$$

این برهم کنش در نمودارهای شکل ۷ــ ۱۸ نشان داده شده است. شکل ۷ــ۱۸ــ الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۷ــ ۱۸ــ ب اتم را در حالت پایه نشان می‌دهد. توجه به این نکته ضروری است که اگر اتم در حالتی که در شکل ۷ــ ۱۸ــ الف نشان داده شده است به حال خود هم گذاشته می‌شد، سرانجام الکترون با تابش یک فوتون به حالت پایین‌تر یا پایه می‌رفت، در حالی که با تابش یک فوتون به آن، نه تنها این فرایند سریع‌تر انجام می‌شود، بلکه همان‌طور که در شکل ۷ــ ۱۸ــ ب نیز دیده می‌شود، فوتون گسیل شده از اتم، با فوتون فرودی هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی است.



شکل ۷ــ ۱۸

اکنون فرض کنید مجموعه‌ای از اتم‌های یکسان که همگی در یک حالت برانگیخته‌اند، در اختیار داریم (شکل ۷ــ۱۹). فوتونی با انرژی مناسب به اتم اول فرود می‌آید و سبب گسیل القایی یک فوتون هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی با فوتون فرودی می‌شود. به این ترتیب دو فوتون که به لحاظ ویژگی‌های فیزیکی کاملاً مشابه‌اند به‌وجود می‌آید. اینک هر یک از این دو فوتون باعث فرایند گسیل القایی دیگری می‌شوند، و



شکل ۷ــ۱۹

به این ترتیب چهار فوتون هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی تولید می‌شود. این فرایند، یعنی دو برابر شدن تعداد فوتون‌ها در هر مرحله ادامه می‌یابد تا باریکهٔ شدیدی از فوتون‌ها که همگی هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی‌اند، ایجاد شود. این باریکه را یک **باریکهٔ لیزری** می‌نامند. این پدیده که به ساده‌ترین شکل بیان شد، اساس کار لیزر را تشکیل می‌دهد. توجه داشته باشید که شکل ۷ــ۱۹ صرفاً طرح واره‌ای از فرایند گسیل القایی را نشان می‌دهد.

تمرین‌های فصل هفتم

۱ــ چند پدیده را نام ببرید که فیزیک کلاسیک قادر به توجیه آن نیست.

۲ــ دمای یک تکه زغال افروخته $T = ۹۰۰\,K$ است. طول موجی را که با بیشترین تابندگی گسیل می‌شود، حساب کنید.

۳ــ یکی از سازوکارهای تعیین وضعیت یک ماهواره، مبتنی بر آشکارسازی امواج گسیل‌شده از سطح زمین است. اگر دمای سطح زمین را $۲۷^{\circ}C$ فرض کنیم، طول‌موج دریافتی توسط این آشکارساز چه‌مقدار و در چه محدوده‌ای از طیف موج الکترومغناطیسی خواهد بود؟

۴ــ حداقل انرژی لازم برای جدا کردن یک الکترون از سطح فلز سدیم برابر با $۲/۲۸\,eV$ است.

الف) آیا فوتون‌هایی با طول موج $۶۸۰\,nm$ قادر به جدا کردن الکترون از سطح این فلز هستند؟

ب) طول موج قطع برای گسیل فوتوالکترون از سطح فلز سدیم چه‌قدر است و این طول موج مربوط به چه رنگی است؟

۵ــ در چه مواردی یک جسم، طیف پیوسته یا ناپیوسته گسیل می‌کند؟

۶ــ آیا ممکن است به کمک طیف گسیلی پیوستهٔ یک جسم، به جنس آن پی برد؟ به کمک چه طیفی می‌توان این کار را انجام داد؟

۷ــ آیا ممکن است به کمک طیف خورشید، عناصر موجود در خورشید را شناسایی کرد؟ توضیح دهید.

۸ ــ ضعف مدل اتمی رادرفورد را در مورد پایداری اتم توضیح دهید. بور چگونه پایداری اتم هیدروژن را توضیح داد؟

۹ ــ ناپیوسته بودن طیف گسیلی اتم هیدروژن را براساس مدل اتمی بور توضیح دهید.

۱۰ــ در پدیدهٔ شفق قطبی مولکول‌های اکسیژن و نیتروژن‌جو در اثر برخورد با زبانه‌های خورشیدی یونیده یا برانگیخته می‌شوند. اتم‌های برانگیخته در بازگشت به حالت پایهٔ خود، فوتون‌هایی

گسیل می‌کنند که برخی از رنگ‌های شفق قطبی ناشی از چنین گسیل‌هایی است. در گسیل فوتون از اتم نیتروژن، طول‌موج فوتون‌ها ۶۳۰nm است. رنگ و انرژی این فوتون‌ها را تعیین کنید.

۱۱ــ طول موج رشتهٔ لیمان مربوط به اتم هیدروژن را با استفاده از رابطهٔ ریدبرگ حساب کنید. مکان این خطوط را در طیف موج‌های الکترومغناطیسی مشخص کنید.

۱۲ ــ چه جنبه‌هایی از مدل بور در مورد اتم هیدروژن الف) کلاسیکی، و ب) غیرکلاسیکی است؟

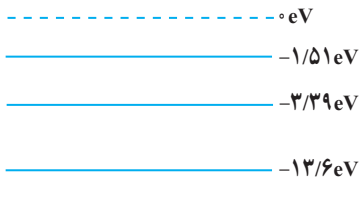
۱۳ــ اگر الکترون در اتم هیدروژن در تراز $n = ۴$ باشد، چه طول موج‌هایی را می‌تواند تابش کند؟

۱۴ــ شکل ۷ــ۲۰ تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می‌دهد.

الف) چرا تراز ۱۳/۶eV−، تراز پایه نامیده می‌شود؟

ب) نشان دهید که کوتاه‌ترین طول موج تابش الکترومغناطیس گسیل شده از اتم هیدروژن تقریباً ۹۰nm است.

پ) کدام گذار (بین دو تراز) می‌تواند به گسیل فوتونی با طول موج ۶۶۰nm منجر شود؟



شکل ۷ــ۲۰

۱۵ــ یک لامپ بخار سدیم، فوتون‌هایی با طول موج ۵۸۹nm گسیل می‌کند؛ اگر توان تابشی لامپ ۶W باشد، در هر ثانیه چند فوتون از این لامپ گسیل می‌شود؟

۱۶ــ طول موج فوتون‌های گسیلی از یک لامپ نارنجی رنگ برابر ۶۰۰nm است. بسامد و انرژی فوتون‌های گسیلی را حساب کنید. انرژی را بر حسب ژول و همچنین الکترون ــ ولت بیان کنید.

۱۷ــ انرژی یونش، انرژی لازم برای خارج کردن یک الکترون از اتم است. انرژی یونش را در موارد زیر حساب کنید.

الف) حالت پایهٔ اتم هیدروژن $(n = ۱)$

ب) تراز $n = ۳$ اتم هیدروژن

۱۸ــ با استفاده از رابطهٔ بور اختلاف انرژی $\Delta E(n_۱ \rightarrow n_۲) = E_{n_۱} - E_{n_۲}$ را حساب کنید و نشان دهید که :

الف) $\Delta E\,(۴ \rightarrow ۲) = \Delta E\,(۴ \rightarrow ۳) + \Delta E\,(۳ \rightarrow ۲)$

ب) $\Delta E\,(۴ \rightarrow ۱) = \Delta E\,(۴ \rightarrow ۲) + \Delta E\,(۲ \rightarrow ۱)$

۱۹ــ یک اتم هیدروژن درحالت $n = 6$ قرار دارد،

الف) با در نظر گرفتن تمام گذارهای ممکن، اگر این اتم به حالت پایه برود، چند نوع فوتون با انرژی مختلف گسیل می‌شود؟

ب) فرض کنید فقط گذارهای $\Delta n = 1$ مجاز باشند، در این‌صورت چند نوع فوتون با انرژی مختلف گسیل خواهد شد؟

۲۰ــ یکی از مشکلاتی که نازک شدن لایهٔ اوزن به همراه دارد عبور پرتوهای فرابنفش از جو زمین است. توضیح دهید چرا پرتوهای فرابنفش موجب سوختگی پوست می‌شوند، در حالی که پرتوهای نور مرئی این مشکل را به وجود نمی‌آورند؟

۲۱ــ توان باریکهٔ نور خروجی از یک لیزر گازی هلیم نئون برابر ۰/۵ میلی‌وات است. اگر توان ورودی این لیزر ۵۰W باشد،

الف) بازده این لیزر را حساب کنید.

ب) اگر طول موج باریکهٔ نورخروجی ۶۳۳nm باشد، در هر ثانیه چند فوتون از این لیزر گسیل می‌شود؟

۲۲ــ پایین‌ترین بسامد رایج موج‌های الکترومغناطیسی، بسامد خطوط انتقال نیروست و مقدار آن برابر ۶۰Hz است. بالاترین بسامدها مربوط به پرتوهای گاماست و مقدار تقریبی آنها $۱/۰ \times ۱۰^{۲۱}$Hz است. بسامدهای پایین‌تر و بالاتر نیز وجود دارند. اما نسبتاً کمیاب‌اند.

الف) انرژی یک فوتون را در هر یک از این بسامدها برحسب الکترون ولت‌حساب کنید.

ب) برای آسیب رساندن به یک مولکول DNA چه تعداد از فوتون‌های کم بسامد لازم است؟ (برای آسیب‌رساندن به مولکول DNA تقریباً ۱eV انرژی لازم است.)

پ) چند مولکول DNA توسط یکی از فوتون‌های پرتو گاما منهدم می‌شوند؟

آشنایی با ساختار هسته

فصل ۸

آشنایی با ساختار هسته

در فصل قبل با برخی از مفهوم‌های فیزیک جدید آشنا شدیم. نظریه‌های نسبیت و کوانتومی در سدهٔ بیستم میلادی، فیزیک را به‌طور کامل متحول ساخت. امروزه دانشمندان به کمک مفهوم‌ها و نظریه‌های مکانیک کوانتومی برای بسیاری از پدیده‌ها به توجیه‌های کاملاً سازگار با تجربه دست یافته‌اند.

در این فصل یکی از موضوع‌هایی که در فیزیک جدید مطرح می‌شود؛ یعنی ساختار هستهٔ اتم و برخی از ویژگی‌ها و واکنش‌های مربوط به آن را بررسی می‌کنیم.

۸ــ۱ ــ ساختار هستهٔ اتم

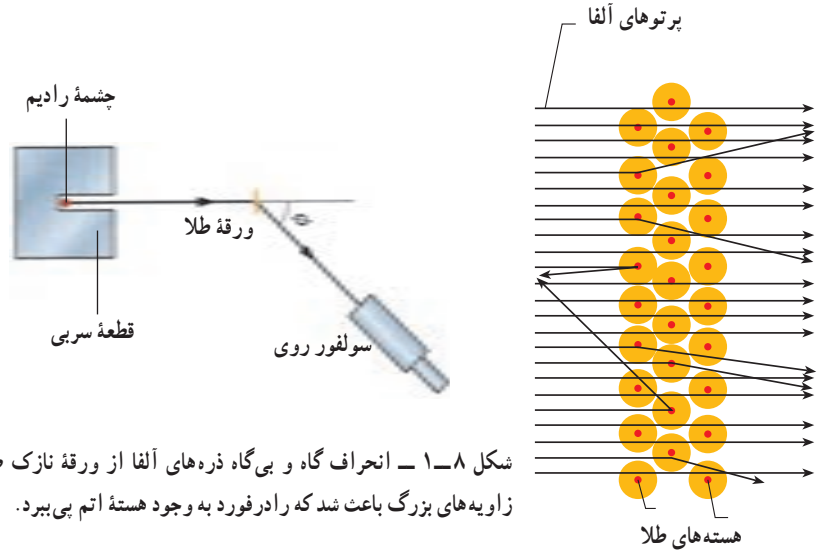
کشف پرتوزایی در سال ۱۸۹۶ میلادی (۱۲۷۵ هـ.ش) آغازی برای پی‌بردن به وجود هستهٔ اتم بود. این کشف به شناخت کنونی ما از اتم انجامید و اطلاعاتی را در اختیار ما قرار داد که پیامدهای آن تأثیری ژرف بر جامعهٔ بشری داشت.

کشف هستهٔ اتم : چند سال پس از آنکه اینشتین اثر فوتوالکتریک را توجیه کرد، ارنست رادرفورد آزمایشی را انجام داد که معلوم کرد اتم تقریباً از فضای تهی تشکیل شده و بیشتر جرم آن در بخش مرکزی به نام هسته متمرکز شده است.

در این آزمایش، باریکه‌ای از ذره‌های دارای بار مثبت (ذره‌های آلفا) گسیل شده از چشمه‌ای پرتوزا بر ورقه‌ای نازک از طلا فرود می‌آمدند. چون ذره‌های آلفا بسیار سنگین‌تر از الکترون‌ها هستند، انتظار می‌رفت که این ذره‌ها بدون برخورد با مانع از ورقهٔ طلا بگذرند. در عمل نیز اغلب این ذره‌ها بدون انحراف یا با انحراف مختصر از ورقه می‌گذشتند و در برخورد با صفحهٔ فلوئورسان، در پشت آن، جرقه‌های نورانی تولید می‌کردند. با این همه، برخی از این ذره‌ها در هنگام خروج از ورقه در زاویه‌های بزرگ منحرف می‌شدند و حتی تعدادی از آنها به عقب برمی‌گشتند! رادرفورد می‌گفت :«مثل آن بودکه گلولهٔ توپی را به ورقهٔ نازکی از کاغذ شلیک کنید و با شگفتی مشاهده کنید که پس از برخورد ،گلوله توپ بازگردد.»

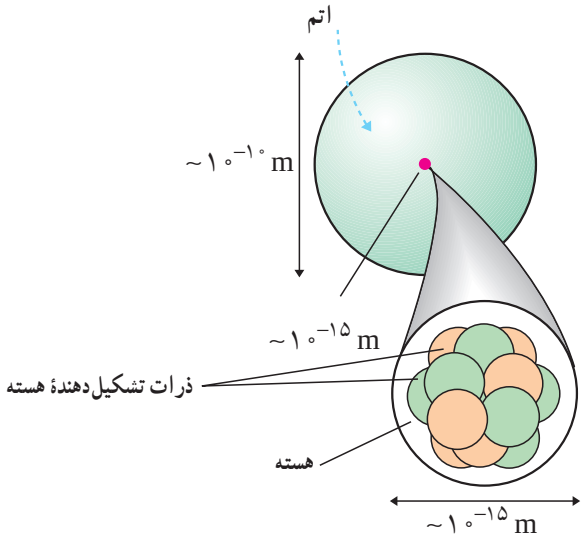
این ذره‌ها باید با چیز پرجرمی برخورد کرده باشند؛ اما با چه چیزی؟ رادرفورد استدلال کرد که ذره‌های بدون انحراف باید از قسمت‌هایی از ورقه گذشته باشند که تهی بوده باشند، در حالی که ذره‌های

با انحراف شدید از مرکزهایی بسیار چگال و دارای بار مثبت منحرف شده بودند. او نتیجه گرفت که هر اتم باید دارای **هسته‌ای** چگال و دارای بار مثبت باشد.



شکل ۸ــ۱ ــ انحراف گاه و بی‌گاه ذره‌های آلفا از ورقهٔ نازک طلا در زاویه‌های بزرگ باعث شد که رادرفورد به وجود هستهٔ اتم پی‌ببرد.

بررسی‌های رادرفورد نشان داد که ابعاد هستهٔ اتم در حدود $10^{-15}m$ ۱ (۱فرمی یا ۱ فمتومتر) و ابعاد اتم $10^{-10}m$ ۱ (۱آنگستروم) است.



شکل ۸ــ۲ــ مقایسهٔ اتم با هستهٔ آن

فعالیت ۸ـ۱

در یک زمین ورزشی ناحیه‌ای را مشخص کنید که ابعاد آن به همان اندازه کوچک‌تر از ابعاد زمین باشد که ابعاد هسته کوچک‌تر از ابعاد اتم است.

در زمان کشف هستهٔ اتم فقط ذره‌های شناخته شدهٔ زیر اتمی الکترون و هستهٔ هیدروژن معمولی (پروتون) بودند. بعدها با کشف نوترون معلوم شد که هسته از پروتون و نوترون ساخته شده است. جدول ۸ـ۱، جرم، بار الکتریکی و شعاع هر یک از این ذرات را نشان می‌دهد.

تعداد پروتون‌های هسته با Z مشخص می‌شود و آن را «عدد اتمی» می‌نامند. چون اتم به لحاظ الکتریکی خنثی است، Z تعداد الکترون‌های اتم نیز هست. تعداد نوترون‌های هسته را با N نشان می‌دهند و آن را «عدد نوترونی» می‌نامند. مجموع عدد اتمی و عدد نوترونی یعنی $Z+N$ را «عدد جرمی» می‌نامند و آن را با A نشان می‌دهند.

$$A = Z + N \qquad (۸ـ۱)$$

در فیزیک هسته‌ای هر هسته را با نماد شیمیایی مربوط به آن و A و Z را به صورت زیر مشخص می‌کنند.

هستهٔ اتم X = ${}^{A}_{Z}X$

مشخص کردن N ضروری نیست؛ زیرا می‌توان آن را از تفاضل A و Z به دست آورد. همین‌طور در بسیاری موارد Z را هم ذکر نمی‌کنند؛ زیرا نماد شیمیایی معرف آن است؛ مثلاً:

هستهٔ اتم هیدروژن = ${}^{1}_{1}H$ یا ${}^{1}H$

هستهٔ اتم اکسیژن = ${}^{16}_{8}O$ یا ${}^{16}O$

هستهٔ اتم آهن = ${}^{56}_{26}Fe$ یا ${}^{56}Fe$

ایزوتوپ‌ها : ویژگی‌های هر اتم را تعداد الکترون‌های آن اتم مشخص می‌کند. اما ویژگی‌های هسته را تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های آن تعیین می‌کند؛ بنابراین، تعداد هسته‌های متفاوت موجود در طبیعت بسیار بیشتر از تعداد اتم‌های متفاوت است. اتم‌های با تعداد پروتون معین و تعداد نوترون‌های مختلف را ایزوتوپ (هم‌مکان) می‌نامند؛ زیرا همگی در جدول مندلیف یک خانه را اشغال می‌کنند. ایزوتوپ‌ها دارای خواص شیمیایی یکسان و خواص هسته‌ای کاملاً متفاوت‌اند. این تفاوت ویژگی‌های هسته‌ای ایزوتوپ‌های مختلف را می‌توان با توجه به دو ایزوتوپ اورانیم ـ ۲۳۵ و اورانیم ـ ۲۳۸ به خوبی نشان

داد. ^{235}U به راحتی شکافته می‌شود و می‌توان از آن در راکتورهای هسته‌ای به عنوان سوخت استفاده کرد. ^{238}U این ویژگی را ندارد و چون به راحتی شکافته نمی‌شود نمی‌توان از آن مستقیماً به عنوان سوخت هسته‌ای استفاده کرد. هر عنصر هم دارای ایزوتوپ‌های پایدار و هم پرتوزاست عناصری هم وجود دارند مانند رادون که ایزوتوپ پایدار ندارند؛ از برخی ایزوتوپ‌های پرتوزا به عنوان ردیاب در موارد مختلف پزشکی، کشاورزی و صنعت استفاده می‌کنند. چون این ایزوتوپ‌های پرتوزا از نظر شیمیایی تفاوتی با ایزوتوپ‌های پایدار ندارند، پس رفتار آنها هنگام جذب در بدن یا گیاهان مانند ایزوتوپ‌های پایدار است و چون پرتوهایی را از خود گسیل می‌دارند، می‌توان محل و تراکم آنها را به دقت مشخص کرد.

جدول ۸ ــ ۱

نام ذره	بار (کولن)	جرم (kg)	شعاع (fm[1])
الکترون	$-e = -1/6 \times 10^{-19}$	$Me = 9/1 \times 10^{-31}$	غیرقابل اندازه‌گیری با وسایل موجود
پروتون	$+e = +1/6 \times 10^{-19}$	$Mp = 1/67 \times 10^{-27}$	۱/۲
نوترون	صفر	$Mn = 1/68 \times 10^{-27}$	۱/۲

۱ــ فمتومتر یا فرمی

نیروی هسته‌ای : دیدیم که ابعاد هسته بسیار کوچک است (در حدود $10^{-15}m$). همین‌طور گفتیم که بیشتر جرم اتم در هسته متمرکز شده است. با توجه به این نکته‌ها می‌توان چگالی هسته را به راحتی محاسبه کرد. با محاسبهٔ آن به مقدار تقریباً $10^{14} g/cm^3$ می‌رسیم که به صورتی باورنکردنی بزرگ است (چگالی آب $1 g/cm^3$). موضوع وقتی شگفت‌انگیزتر می‌شود که توجه کنیم نیروی کولنی شناخته شده بین پروتون‌های دارای بار مثبت رانشی است. پس اصلاً انتظار نداریم که دستگاه متشکل از ذرات دارای بار هم نام پایدار باشد تا چه رسد به اینکه تا این حد هم چگال باشد. البته نیروی گرانشی موجود بین اجزای هسته ربایشی است اما، نیروی گرانشی بسیار ضعیف‌تر از نیروی کولنی است؛ پس نمی‌تواند عامل پایداری هسته و چگال بودن آن باشد.

این موضوع وجود نیروی جدیدی را در طبیعت مطرح کرد که به **نیروی هسته‌ای قوی** مشهور شد. این نیرو، با نیروی شناخته شدهٔ کولنی و گرانشی تفاوت بسیار دارد؛ زیرا اولاً، بسیار قوی‌تر از این نیروهاست؛ چون اجزای هسته را به رغم نیروی رانشی بین پروتون‌های آن به صورت بسیار فشرده در

کنار هم نگه می‌دارد. دوم اینکه، این نیرو، برخلاف نیروهای کولنی و گرانشی، کوتاه بُرد است؛ زیرا در ابعاد اتمی (10^{-10} m)، دیگر اثری از آن مشاهده نمی‌شود و اتم به کمک نیروی کولنی بین هستهٔ دارای بار مثبت و الکترون دارای بار منفی بررسی می‌شود.

فعالیت ۸ـ۲

با مراجعه به کتاب‌های فیزیک ۲ و ۳ و با استفاده از جدول ۸ــ۱ نیروهای گرانشی و الکتریکی بین دو پروتون را که به فاصلهٔ r از یکدیگر قرار دارند، محاسبه کنید.

پایداری هسته‌ها : دیدیم که در هسته علاوه بر نیروی رانش کولنی بین پروتون‌ها، نیروی ربایش هسته‌ای بین کلیه اجزای هسته اعم از پروتون‌ها و نوترون‌ها نیز حکمفرماست. از دید نیروی هسته‌ای، تفاوتی بین پروتون و نوترون وجود ندارد. از این رو آنها را با نام عام «نوکلئون» نیز می‌نامند. پس وقتی می‌گوییم نوکلئون منظورمان پروتون یا نوترون است و آنها از نظر نیروی هسته‌ای تفاوتی ندارند.

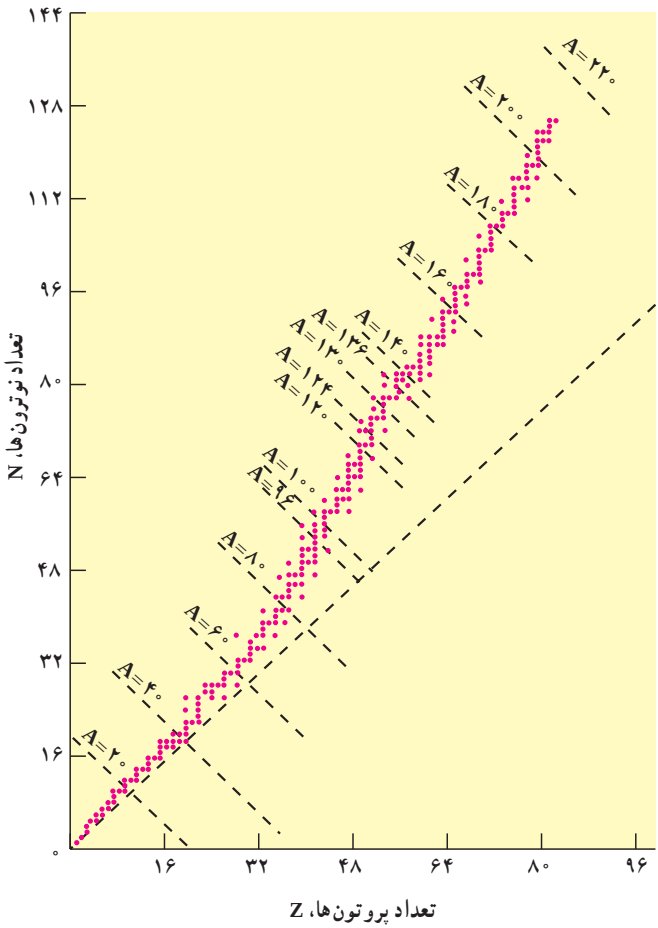
نیروی هسته‌ای گرچه بسیار قوی بوده اما **کوتاه بُرد** است؛ بنابراین، هر نوکلئون فقط به نوکلئون‌های مجاور خود نیروی هسته‌ای وارد می‌کند. اما، نیروی کولنی گرچه دارای شدت کمتری است اما بلند برد است و هر پروتون به تمام پروتون‌های موجود در هسته نیروی رانشی وارد می‌سازد؛ بنابراین، به تدریج با زیاد شدن تعداد پروتون‌ها در هسته نقش نیروی کولنی بارز می‌شود و اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. این موضوع سبب ناپایداری هسته می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفتیم، اغلب ایزوتوپ‌های عناصر، ناپایدارند. ایزوتوپ‌های ناپایدار با گذشت زمان واپاشیده می‌شوند و سرانجام به ایزوتوپ‌های پایدار تبدیل می‌شوند.

واپاشی برخی از ایزوتوپ‌ها بسیار سریع صورت می‌گیرد، در حالی که واپاشی بعضی از آنها به‌قدری کُند است که از زمان تشکیل زمین تاکنون هنوز کاملاً از بین نرفته‌اند.

عدد اتمی عنصرهای طبیعی موجود در طبیعت $1 \leq Z \leq 92$ است. عناصر با $Z > 92$ را به‌طور مصنوعی در آزمایشگاه تولید می‌کنند و به آنها «عناصر فرا اورانیمی» گویند. همین‌طور عدد نوترونی عنصرهای موجود در طبیعت $0 \leq N \leq 146$ است.

خط $N = Z$ و نمودار تغییرات N و Z عنصرهای پایدار در شکل ۸ــ۳ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، خطّ پایداری ایزوتوپ‌ها ابتدا بر خط N = Z منطبق است اما با زیادشدن Z به‌تدریج از آن منحرف می‌شود و ایزوتوپ‌های پایدار سنگین‌تر دارای تعداد نوترون بیش از پروتون‌اند. دلیل آن نیز روشن است؛ زیرا نوترون به هسته رباش هسته‌ای اضافه می‌کند بدون اینکه رانش کولنی داشته باشد.



شکل ۸ ــ ۳

فعالیت ۸ـ۳

با توجه به شکل ۸ ــ ۳ و با بحث در گروه خود به پرسش‌های زیر پاسخ دهید؛

الف) خط راست خط‌چین به چه مقدارهای N، Z و A مربوط می‌شود؟

ب) آیا نسبت تعداد نوترون به تعداد پروتون برای هسته‌های پایدار مختلف ثابت است یا تغییر می‌کند؟ اگر تغییر می‌کند این تغییر چگونه است؟

پ) ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر را چگونه می‌توان با استفاده از شکل تشخیص داد؟

اکنون با استفاده از راکتورهای هسته‌ای و شتابگرها می‌توان ایزوتوپ‌های مختلف را به طور مصنوعی تولید کرد. همان‌طور که قبلاً هم توضیح دادیم این ایزوتوپ‌ها کاربردهای روزافزونی در پزشکی برای تشخیص و درمان، در کشاورزی برای بررسی چگونگی جذب مواد در گیاهان، و در صنعت برای ردیابی جریان‌ها و کنترل کیفیت دارند.

انرژی بستگی هسته : اندازه‌گیری‌های دقیق نشان می‌دهد که جرم هسته از مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل‌دهنده‌اش اندکی کمتر است. این موضوع در مورد اتم‌ها نیز درست است. به طوری که جرم اتم هم از مجموع جرم هسته و الکترون‌های آن کمتر است اما این تفاوت جرم برای هسته بیشتر است؛ اگر جرم هستهٔ X را با M_x و جرم پروتون را با M_p و جرم نوترون را با M_n نشان دهیم، خواهیم داشت :

$$M_x < ZM_p + NM_n \qquad (۲ــ۸)$$

اگر اختلاف جرم دو طرف رابطهٔ بالا را با ΔM نشان دهیم، خواهیم داشت :

$$\Delta M = ZM_p + NM_n - M_x \qquad (۳ــ۸)$$

این اختلاف جرم طبق رابطهٔ معروف اینشتین :

$$E = mc^2 \qquad (۴ــ۸)$$

به انرژی تبدیل می‌شود. این انرژی را «انرژی بستگی» می‌نامند و آن را با B نشان می‌دهند. پس داریم :

$$B = \Delta mc^2 = [ZM_p + NM_n - M_x]c^2 \qquad (۵ــ۸)$$

در موقع تشکیل هستهٔ X از Z پروتون و N نوترون این انرژی آزاد می‌شود و برای جدا کردن هسته به اجزاء تشکیل‌دهنده‌اش، این انرژی را باید مصرف کرد.

توجه داریم که در فرایندهای هسته‌ای معمولاً جرم محصولات فرایند از جرم ذرات اولیه اندکی کمتر است. این تفاوت جرم طبق رابطهٔ ۸ــ۵ به انرژی تبدیل می‌شود. چون این اختلاف جرم در C^2 ضرب می‌شود، اختلاف جرم بسیار مختصر سبب تولید انرژی قابل ملاحظه می‌شود.

یکای جرم اتمی : در واکنش‌های هسته‌ای، با تبدیل جرم به انرژی سروکار داریم و جرمی که به انرژی تبدیل می‌شود، بسیار کوچک است؛ بنابراین، نمی‌توان از یکاهای متداول جرم چون کیلوگرم و گرم استفاده کرد. یکای مورد استفاده در فیزیک هسته‌ای **یکای جرم اتمی** است که آن را با «u» نشان می‌دهند و عبارت است از $\frac{۱}{۱۲}$ جرم اتم کربن ۱۲ که آن را طبق تعریف ۱۲/۰۰۰۰۰۰u در نظر می‌گیرند. برحسب این یکا، جرم پروتون ۱/۰۰۷۲۷۶u ، جرم الکترون ۰/۰۰۰۵۴۹u و جرم نوترون ۱/۰۰۸۶۶۵u است.

مثال ۸ـ۱

الف) یکای جرم اتمی را برحسب کیلوگرم محاسبه کنید.

ب) اگر ۱u تبدیل به انرژی شود، این انرژی معادل چند الکترون ولت است؟

پاسخ

می‌دانیم که یک مول از هر ماده حاوی تعداد ذرات (اتم، مولکول یا هر چیز دیگر) مساوی زیر است :

به ازای هر مول $N_A = ۶/۰۲۲۱۳۷ \times ۱۰^{۲۳}$

پس یک مول کربن یعنی ۰/۰۱۲kg نیز حاوی همین تعداد اتم کربن است؛ پس :

$$۱u = \frac{۱}{۱۲}(۰/۰۱۲kg)\frac{۱}{۶/۰۲۲۱۳۷\times۱۰^{۲۳}} = ۱/۶۶۰۵۴۰۲\times۱۰^{-۲۷}kg$$

حال انرژی معادل این جرم برابر است با :

$$c = ۲/۹۹۷۹۲۴۵۸ \times ۱۰^{۸} m/s$$

$$E = ۱u \times c^{۲}$$

$$= (۱/۶۶ \times ۱۰^{-۲۷}kg)\,(۲/۹۹۷۹۲۴۵۸ \times ۱۰^{۸} m/s)^{۲} = ۱/۴۹ \times ۱۰^{-۱۰}J$$

می‌دانیم که

$$۱J = ۶/۲۴۱۵۱ \times ۱۰^{۱۸}eV = ۶/۲۴۱۵۱ \times ۱۰^{۱۲}MeV$$

پس، انرژی معادل جرم ۱u برابر است با :

$$E = ۹۳۱/۵MeV$$

برای به دست آوردن انرژی آزاد شده در فرایندهای هسته‌ای کافی است اختلاف جرم دو طرف واکنش برحسب u را در ۹۳۱/۵ ضرب کنیم تا انرژی برحسب MeV به دست آید.

در فرایندهای هسته‌ای اصل پایستگی جرم و انرژی به تنهایی برقرار نیستند بلکه در این فرایندها **مجموع جرم و انرژی در برهم کنش پایسته می‌ماند.**

مثال ۸ـ۲

هستهٔ دوتریم را که از یک پروتون و نوترون تشکیل شده است، «دوترن» می‌نامند. جرم اتمی ^{2}H برابر ۲/۰۱۴۱۰۲u است. انرژی بستگی آن را محاسبه کنید.

پاسخ : ابتدا جرم هستهٔ دوتریوم را حساب می‌کنیم.

جرم یک الکترون − جرم اتم دوتریوم = جرم هستهٔ دوتریوم

$$m(^{2}H) = M(^{2}H) - M(e)$$
$$= ۲/۰۱۴۱۰۲u - ۰/۰۰۰۵۴۹u$$
$$= ۲/۰۱۳۵۵۳u$$

به این ترتیب انرژی بستگی هستهٔ دوتریم برابر است با

$$B = [m_n + m_p - m(^{2}H)]c^{2}$$
$$= [۱/۰۰۸۶۶۵u + ۱/۰۰۷۲۷۶u - ۲/۰۱۳۵۵۳u] \times ۹۳۱/۵ = ۲/۲۲\ MeV$$

تمرین ۸ـ۱

انرژی بستگی $^{4}_{2}He$ را به‌دست آورید. جرم اتمی $^{4}_{2}He$ برابر ۴/۰۰۲۶۰۳u است.

ترازهای انرژی هسته : انرژی نوکلئون‌های وابسته به هسته نیز مانند انرژی الکترون‌های وابسته به اتم کوانتیده‌اند و نوکلئون وابسته به هسته نمی‌تواند هر انرژی دلخواهی را اختیار کند. اما اختلاف انرژی ترازهای نوکلئون در هسته بسیار بیش از این اختلاف در اتم‌هاست. در فصل قبل دیدیم که اختلاف انرژی ترازهای الکترون‌ها در اتم حدود چند الکترون ولت است. در حالی که اختلاف انرژی ترازهای نوکلئون‌ها در هسته‌های سبک حدود میلیون الکترون ولت (MeV) و در هسته‌های سنگین حدود کیلو الکترون ولت (keV) است.

همان‌گونه که الکترون‌های اتم می‌توانند با جذب انرژی از حالت پایه به حالت برانگیخته بروند، نوکلئون‌ها نیز می‌توانند با جذب انرژی به ترازهای انرژی بالاتر بروند و هسته را برانگیخته سازند.

هسته‌های برانگیخته نیز درست مانند اتم‌های برانگیخته می‌توانند با گسیل فوتون به حالت پایه

برگردند. انرژی فوتون گسیل شده نیز برابر اختلاف انرژی بین حالت برانگیخته و حالت پایه یا بین دو حالت برانگیخته است. هستهٔ برانگیخته را با گذاشتن ستاره روی نماد ${}^{A}_{Z}X$ به‌صورت ${}^{A}_{Z}X^{*}$ مشخص می‌کنند.

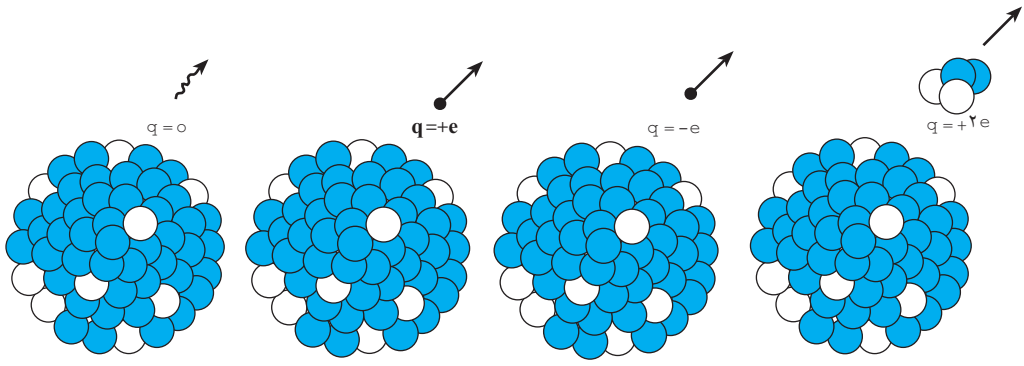
همان‌گونه که دیدیم، انرژی واکنش شیمیایی در حدود چند الکترون ولت و انرژی لازم برای برانگیختگی هسته‌ها معمولاً در محدودهٔ کیلوالکترون ولت تا میلیون الکترون ولت است؛ از این‌رو، هسته‌ها در واکنش‌های شیمیایی برانگیخته نمی‌شوند.

۸ــ۲ــ پرتوزایی

همان‌طور که قبلاً گفتیم، تحول‌هایی در فیزیک که به پیدایش فیزیک جدید و گسترش فیزیک هسته‌ای انجامید با کشف پدیدهٔ پرتوزایی شکل گرفت. در سال ۱۸۹۶ میلادی، **هانری بکرل** به صورت کاملاً تصادفی متوجه شد که سنگ معدن اورانیم پرتوهای نافذی را از خود گسیل می‌دارد. هسته‌های پرتوزا ناپایدارند و با گذشت زمان خود به خود و بدون تأثیرپذیری از شرایط خارجی، پرتوهایی را گسیل می‌دارند و به تدریج به هسته‌های پایدار تبدیل می‌شوند. همان‌گونه که در شکل ۸ــ۴ نشان داده شده است، هسته‌های پرتوزا با گسیل یکی از پرتوهای زیر واپاشیده می‌شوند.

۱ــ واپاشی آلفازا : در این نوع واپاشی که در هسته‌های سنگین صورت می‌گیرد، هستهٔ ${}^{A}_{Z}X$ با گسیل ذرهٔ α (${}^{4}_{2}He$) متشکل از دو پروتون و دو نوترون وا می‌پاشد (شکل ۸ــ۴ ــ الف).

$${}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He \qquad (۶ــ۸)$$



ت ــ گسیل پرتو γ پ ــ گسیل پرتو β^{+} ب ــ گسیل پرتو β^{-} الف ــ گسیل پرتو α

شکل ۸ ــ ۴

هستهٔ X را «هستهٔ مادر» و هستهٔ Y را «هستهٔ دختر» می‌نامند؛ هستهٔ Y محصول واپاشی دارای عددجرمی $A-4$ و عدد اتمی $Z-2$ است. این واپاشی با آزاد شدن انرژی همراه است که این انرژی بین محصولات واپاشی تقسیم می‌شود و بخش عمدهٔ آن را ذرهٔ α به همراه می‌برد. ذره‌های آلفا سنگین و دارای دو بار مثبت‌اند. بُرد این ذره‌ها بسیار کوتاه است و به سرعت جذب می‌شوند ولی اگر این ذره‌ها از راه تنفس یا دستگاه گوارش وارد بدن شوند، باعث آسیب شدید به بافت‌های بدن می‌شوند، بنابراین، باید مواظب بود که مواد آلفا گسیل هرگز وارد بدن نشوند.

۲ــ واپاشی بتازا : این متداول‌ترین نوع واپاشی در هسته‌هاست. در این واپاشی هستهٔ ناپایدار با گسیل الکترون یا پوزیترون (ذره‌ای دارای جرم برابر جرم الکترون و بار مخالف آن) به هستهٔ جدیدی تبدیل می‌شود (شکل ۸ــ۴ــ ب).

این نوع واپاشی بسیار شگفت‌انگیز است؛ زیرا الکترون قبلاً در هسته وجود ندارد و در حین واپاشی به وجود می‌آید. در فرایند واپاشی همراه با گسیل الکترون یک نوترون در هسته تبدیل به پروتون و الکترون می‌شود. فرایند را می‌توان به صورت زیر نوشت :*

$$^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e^{-} \qquad (۷ــ۸)$$

در فرایند گسیل پوزیترون یک پروتون به نوترون و پوزیترون تبدیل می‌شود (شکل ۸ــ۴ــ پ) که می‌توان آن را به‌صورت زیر نوشت :

$$^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A}_{Z-1}Z + {}^{0}_{+1}e^{+} \qquad (۸ــ۸)$$

محصول این نوع واپاشی هستهٔ جدیدی است که عدد اتمی آن برخلاف مورد گسیل الکترون که عدد اتمی هستهٔ دختر یک واحد بیشتر از هستهٔ مادر است، یک واحد از هستهٔ مادر کمتر است.

۳ــ واپاشی گامازا : در این نوع واپاشی، هیچ یک از عددهای جرمی و اتمی هسته تغییر نمی‌کند بلکه هسته‌ای که در حالت برانگیخته است، با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسد (شکل ۸ــ۴ــ ت). این فرایند را می‌توان به صورت زیر نشان داد :

$$^{A}_{Z}X^{*} \longrightarrow {}^{A}_{Z}X + {}^{0}_{0}\gamma \qquad (۹ــ۸)$$

اغلب هسته‌ها پس از گسیل ذره‌های آلفا و بتا در حالت برانگیخته هستند و با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسند؛ بنابراین، گسیل پرتو گاما اغلب با گسیل آلفا و بتا همراه است. پرتو گاما همان

---

* در واپاشی بتازا ذرهٔ دیگری (که نوترینو یا پادنوترینو نام دارد) نیز باید درنظر گرفت که برای سادگی از آنها صرف‌نظر شده است.

ویژگی‌های پرتو X را دارد ولی از آن پر انرژی‌تر است و می‌تواند در ماده بیشتر نفوذ کند.

در تمام فرایندهای واپاشی اصول پایستگی زیر برقرار است :

۱ــ مجموع بارالکتریکی در دو طرف رابطه‌های (۸ــ۷ تا ۸ــ۹) یکسان است.

۲ــ مجموع عددهای جرمی در دو طرف رابطه‌های بالا یکسان است.

مثال ۸ـ۳

در واپاشی هستهٔ اورانیم ــ ۲۳۸ $\left[{}^{۲۳۸}_{۹۲}\mathrm{U}\right]$ یک ذرهٔ آلفا گسیل می‌شود. معادلهٔ این واپاشی را بنویسید و تعیین کنید که براثر این واپاشی چه عنصری تولید می‌شود.

پاسخ

معادلهٔ واپاشی به صورت زیر است :

$$^{۲۳۸}_{۹۲}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{X} + {}^{۴}_{۲}\mathrm{He}$$

با استفاده از پایستگی عدد جرمی داریم :

$$۲۳۸ = A + ۴$$

$$A = ۲۳۴$$

و با بهره‌گیری از عدد اتمی دو طرف داریم :

$$۹۲ = ۲ + Z$$

$$Z = ۹۰$$

با مراجعه به جدول تناوبی معلوم می‌شود که عنصر با $Z = ۹۰$ توریم است؛ پس داریم :

$$^{۲۳۸}_{۹۲}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{۲۳۴}_{۹۰}\mathrm{Th} + {}^{۴}_{۲}\mathrm{He}$$

تمرین ۸ـ۲

فسفر ــ ۳۲ $\left[{}^{۳۲}_{۱۵}\mathrm{P}\right]$ با گسیل الکترون وامی‌پاشد. معادلهٔ این واپاشی را بنویسید و تعیین کنید که در آن چه عنصری تولید می‌شود.

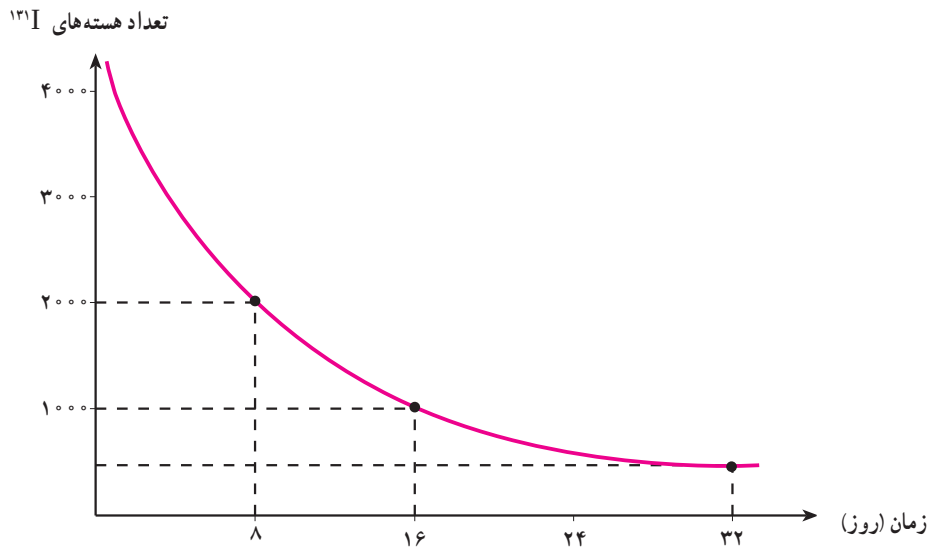
تمرین ۸ـ۳

آلومینیم ـ ۲۵ $\left[{}^{25}_{13}\mathrm{Al}\right]$ با گسیل پوزیترون وامی‌پاشد. معادلهٔ واپاشی را بنویسید و عنصر محصول آن را مشخص کنید.

نیمه عمر مادهٔ پرتوزا

ایزوتوپ‌های پرتوزا با گذشت زمان واپاشیده می‌شوند. احتمال واپاشی یک هسته پرتوزا در یک ثانیه با **ثابت واپاشی** λ مشخص می‌شود. λ فقط تابع نوع هسته‌ای است که واپاشیده می‌شود و عامل‌های خارجی مانند دما، فشار، یا میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تأثیری در آن ندارند.

اگر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های موجود در یک نمونه را برحسب زمان رسم کنیم نمودار شکل ۸ـ۵ به دست می‌آید. معمولاً سرعت واپاشی یک ایزوتوپ را با **نیمه عمر** مشخص می‌کنند. نیمه عمر زمانی است که طول می‌کشد تا تعداد هسته‌های پرتوزای موجود در یک نمونه به نصف برسد. اغلب ایزوتوپ‌های پرتوزا دارای نیمه عمرهایی در حدود چند روز تا چند سال هستند که بسیار کوتاه‌تر از سن زمین ($۴/۵ \times ۱۰^{۹}$ سال) است. بنابراین بیشتر این ایزوتوپ‌ها به عنصر پایدار واپاشیده‌اند. اما، برخی از آنها دارای نیمه عمرهای در حدود سن زمین هستند. این عناصر هنوز در اطراف ما وجود دارند و زمینهٔ **پرتوزایی طبیعی** را تشکیل می‌دهند که ما را احاطه کرده است.



شکل ۸ـ۵ ـ نمودار واپاشی ایزوتوپ ^{131}I

مثال ۸ـ۴

در حادثهٔ چرنوبیل یکی از ایزوتوپ‌هایی که مشکل آلودگی مواد غذایی را به وجود آورد ^{131}I بود. این ایزوتوپ، فرّار است و همراه با جریان‌های جوّی تا نقطه‌های دوردست حرکت کرد و با نشستن بر روی برگ گیاهان سبب آلودگی گوشت و شیر دام‌هایی که این گیاهان را می‌خوردند، شد. نیمه عمر این ایزوتوپ ۸/۰ روز است؛ پس از گذشت ۴۰ روز از حادثه، چه کسری از هسته‌های ^{131}I باقی مانده بود؟

پاسخ

۴۰ روز برابر ۵ نیمه عمر ^{131}I است. اگر N_0 تعداد هسته‌های اولیه باشد، می‌توان جدول زیر را تنظیم کرد.

تعداد نیمه‌عمرهای سپری شده	۰	۱	۲	۳	۴	۵
هسته‌های باقیمانده	N_0	$\frac{N_0}{2}$	$\frac{1}{2}\frac{N_0}{2}=\frac{N_0}{4}$	$\frac{1}{2}\frac{N_0}{4}=\frac{N_0}{8}$	$\frac{1}{2}\frac{N_0}{8}=\frac{N_0}{16}$	$\frac{1}{2}\frac{N_0}{16}=\frac{N_0}{32}$

بنابراین، پس از گذشت ۴۰ روز تعداد هسته‌های پرتوزای موجود و در نتیجه، فعالیت آنها به $\frac{1}{32}$ مقدار اولیه می‌رسد. نیمه عمر کوتاه ^{131}I باعث شد که خسارت وارد به محصولات کشاورزی چندان شدید نباشد.

برای تعداد نیمه عمرهای عدد صحیح، تعداد هسته‌های فعال باقیمانده را می‌توانیم از رابطهٔ $\frac{N_0}{2^n}$ به دست آوریم که در آن n از رابطهٔ $n=\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$ به دست می‌آید. t زمان موردنظر برای واپاشی و $T_{\frac{1}{2}}$ نیمه عمر ایزوتوپ است.

نکته‌های ایمنی

حفاظت در برابر پرتوها: یکی از ویژگی‌های مهمّ ذرات و پرتوهایی که از موادّ پرتوزا گسیل می‌شود این است که حواس معمولی ما به آنها حساس نیستند؛ مثلاً، وقتی دستمان را به آتش نزدیک می‌کنیم سوزش ناشی از آن باعث می‌شود که آن را عقب بکشیم ولی این موضوع در مورد پرتوهای کیهانی و آنچه از مواد پرتوزا خارج می‌شود، صادق نیست؛ بنابراین باید به کمک دستگاه‌هایی آنها را آشکار ساخت و به وجود آنها پی‌برد.

ذره‌های دارای بار الکتریکی مانند ذره‌های آلفا و بتا هنگام عبور از ماده به واسطهٔ بار الکتریکی خود باعث برانگیختگی و یونش اتم‌های محیط می‌شوند و می‌توان از این موضوع برای آشکارسازی آنها استفاده کرد. البته، این برانگیختگی و یونش تغییرهای شیمیایی را در بدن به‌وجود می‌آورد که باعث آسیب‌رساندن به بافت‌های زنده می‌شود. البته هر چه این ذره‌ها انرژی خود را در مسافت کوتاه‌تری از بافت از دست بدهند، آسیب وارده شدیدتر و ترمیم آن دشوارتر خواهد بود؛ بدین سبب، آسیب ذره‌های آلفا بسیار شدیدتر از ذره‌های بتا خواهد بود.

پرتوهای بدون باری چون پرتوهای X و γ نیز بر اثر برهم کنش با ماده، ذره‌های باردار ثانویه به وجود می‌آورند و این ذره‌های ثانویه به بافت‌های زنده آسیب می‌رسانند. از این ویژگی پرتوها برای از بین بردن غده‌های سرطانی بهره می‌گیرند؛ بدین ترتیب که با تمرکز این پرتوها بر روی غده‌ها آنها را نابود می‌سازند. این کار را «پرتودرمانی» می‌نامند. نوترون‌ها نیز گرچه بدون بارند ولی در هنگام ورود به بدن بر اثر برخورد با هیدروژن‌های آب ــ که بخش اعظم بدن را تشکیل می‌دهد ــ انرژی خود را به آن منتقل می‌کنند و باعث به حرکت درآمدن یک پروتون پرانرژی در بدن می‌شوند که اثر زیان‌بار آن بسیار شدید است؛ بنابراین، نوترون‌ها مخصوصاً وقتی سریع باشند، بسیار خطرناک‌اند.

آسیب وارد از تابش بر بدن ممکن است، یا بافت زنده را کاملاً از بین ببرد یا بدون از بین بردن آن باعث جهش در ژن‌های آن شود. **یاخته‌هایی که از این یاخته‌های جهش‌یافته به وجود می‌آیند**، با آن تفاوت خواهند داشت. این جهش‌ها می‌تواند به تولید بافت‌های سرطانی یا نوزادان ناقص‌الخلقه بینجامد. البته در مواردی نیز از این جهش‌ها برای تولید گیاهانی استفاده می‌شود که از گیاهان معمولی مقاوم‌ترند یا ویژگی بهتری دارند.

به این ترتیب، در برخورد با مواد پرتوزا بایستی همواره احتیاط کرد تا پرتوگیری از این مواد به کمترین مقدار ممکن برسد. چشمه‌های پرتوزا باید حفاظ داشته باشند و در هنگام کار باید آنها را به کمک وسیله‌هایی در فاصلهٔ دور از بدن نگه داشت.

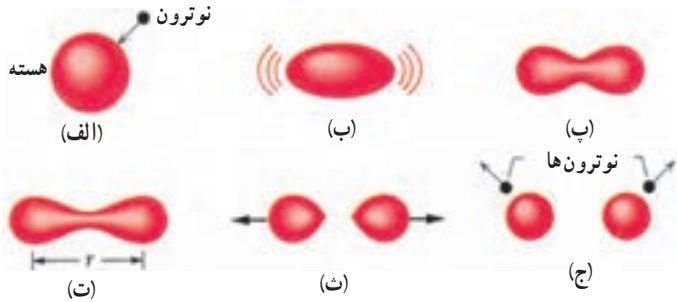
فعالیت ۸ـ۴

فضانوردان در معرض انواع گوناگونی از تابش‌ها، از جمله تابش‌های کیهانی و بادهای خورشیدی قرار دارند. تحقیق کنید فضانوردان چگونه خود را در برابر بخشی از این تابش‌ها مصون می‌دارند؟

۸ـ۳ـ انرژی هسته‌ای

در اواخر سال ۱۹۳۸ میلادی، دو دانشمند آلمانی، اوتوهان[۱] و فریتس اشتراسمن[۲]، به طور تصادفی کشفی کردند که جهان را تغییر داد. آنها در حین بمباران نمونه‌ای از اورانیم با نوترون به امید به وجود آوردن عناصر جدید، در نهایت تعجب متوجه تولید باریم شدند که جرمش در حدود نصف اورانیم بود. این دو تمایلی به باور نتیجهٔ آزمایش خود نداشتند. اوتوهان خبر این کشف را برای همکار سابق خود لیزمایتنر[۳] که پناهنده‌ای از آلمان نازی بود و در سوئد کار می‌کرد فرستاد. او در طول تعطیلات کریسمس در این باره با خواهرزاده‌اش، اوتوفریش[۴]، که او هم به دانمارک پناهنده شده بود، بحث کرد. این دو به اتفاق هم توصیفی برای این پدیده یافتند که بدین صورت بود، هستهٔ اورانیم بر اثر بمباران نوترونی به دو قسمت تقسیم شده است. مایتنر و فریش این فرایند را با توجه به فرایند مشابه در زیست‌شناسی «شکافت» نامیدند.

در تمام هسته‌های شناخته شده، نیروهای جاذبهٔ هسته‌ای بر دافعهٔ کولنی غلبه می‌کنند. در هستهٔ اورانیم غلبهٔ نیروی هسته‌ای بر نیروی کولنی بسیار شکننده است و با اندک اختلالی چون جذب یک نوترون که سبب تغییر شکل هسته می‌شود، از بین می‌رود. اگر هستهٔ اورانیم اندکی کشیده شود (شکل ۸ـ۶)، نیروهای الکتریکی می‌توانند آن را کشیده‌تر کنند. اگر این کشیدگی از مرحلهٔ بحرانی بگذرد، نیروهای هسته‌ای تسلیم نیروهای الکتریکی می‌شوند و هسته به دو بخش تقسیم می‌شود. جذب نوترون در هستهٔ اورانیم انرژی لازم جهت این کشیده شدن را تأمین می‌کند و هسته شکافته می‌شود.



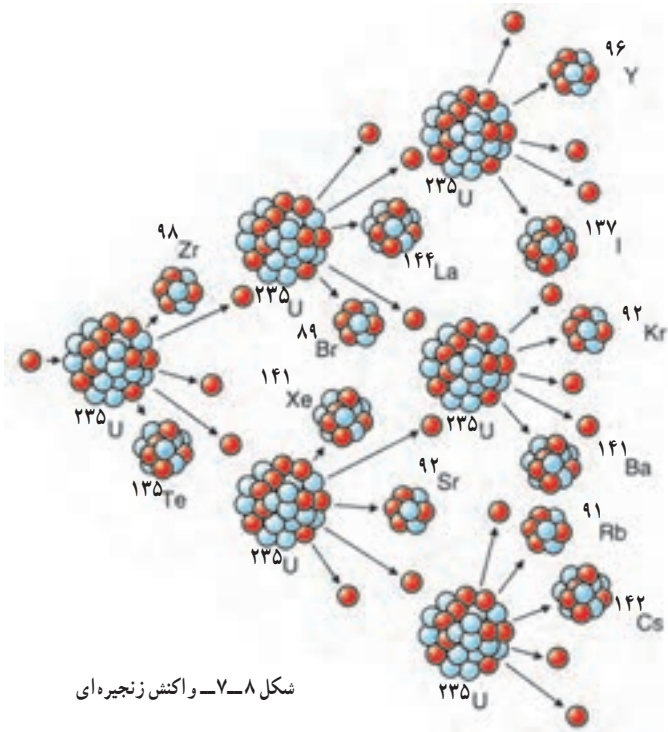
شکل ۸ـ۶ـ تغییر شکل هسته‌ای وقتی به وجود می‌آید که نیروی دافعهٔ الکتریکی بر نیروی جاذبهٔ هسته‌ای غلبه کند (شکل ت)، که در این صورت شکافت صورت می‌گیرد.

۱ـ Otto Hahn
۲ـ Fritz Strassman
۳ـ Lise Meitner
۴ـ Otto Frisch

در فرایند شکافت، ترکیب‌های مختلفی از هسته‌های کوچک‌تر به وجود می‌آیند که یک نمونهٔ آن را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت :

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \longrightarrow ^{91}_{36}Kr + ^{142}_{56}Ba + 3(^{1}_{0}n) + 200MeV$$

توجه کنید که در این واکنش، یک نوترون، شکافت اورانیم را آغاز می‌کند و براثر شکافت، سه نوترون به وجود می‌آید. چون نوترون‌ها بارالکتریکی ندارند، هسته آنها را دفع نمی‌کند و به راحتی و بدون برخورد با مانع در آن نفوذ می‌کند و در نتیجه، باعث شکافت در سه هستهٔ اورانیم دیگر شده و نه نوترون آزاد می‌کند. اگر این نوترون‌ها نیز موفق به شکافت اتم‌های اورانیم شوند، بیست و هفت نوترون آزاد می‌شود و ... . این رشته را «واکنش زنجیره‌ای» می‌نامند (شکل۸ــ۷). در هر واکنش شکافت ۲۰۰/۰۰۰/۰۰۰ الکترون ولت (۲۰۰MeV) انرژی آزاد می‌شود (برای مقایسه، در هر انفجار مولکول TNT فقط ۳۰ الکترون ولت انرژی آزاد می‌شود). مجموع جرم پاره‌های شکافت و نوترون‌های تولید شده در واکنش از جرم اورانیم اولیه اندکی کمتر است. این اختلاف جرم مختصر طبق رابطهٔ، $E = mc^2$ اینشتین به انرژی تبدیل می‌شود. بد نیست بدانید که بیشتر این انرژی به صورت انرژی جنبشی محصولات شکافت در می‌آید که همراه نوترون‌ها از محل واکنش خارج می‌شوند. بخش اندکی از این انرژی نیز به‌صورت پرتوهای مختلف درمی‌آید. شاید این پرسش مطرح شود که چرا واکنش زنجیره‌ای هم‌اکنون به‌طور طبیعی در معدن‌های اورانیم رخ نمی‌دهد؟



شکل ۸ــ۷ــ واکنش زنجیره‌ای

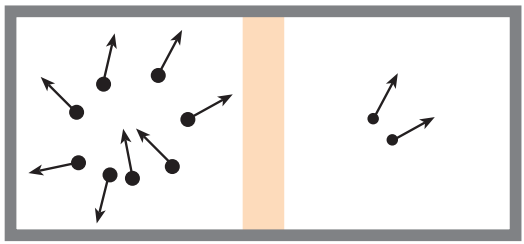
پاسخ آن است که شکافت معمولاً فقط در ایزوتوپ کمیاب ^{235}U که فقط ۰/۷۲ درصد اورانیم طبیعی را تشکیل می‌دهد، رخ می‌دهد. ایزوتوپ فراوان‌تر ^{238}U نوترون‌ها را جذب می‌کند ولی **معمولاً** شکافته نمی‌شود و در نتیجه، واکنش زنجیره‌ای را ناممکن می‌سازد.

اگر واکنش زنجیره‌ای در قطعه‌ای از اورانیم به اندازهٔ کافی بزرگ رخ دهد، به احتمال زیاد انفجاری به وقوع می‌پیوندد اما؛ واکنش زنجیره‌ای در قطعه‌ای کوچک از اورانیم، انفجاری را به وجود نمی‌آورد؛ زیرا نوترون‌های تولید شده در فرایند شکافت در اورانیم، پیش از برخورد با هستهٔ اورانیم باید مسافتی را طی کنند. اگر اندازهٔ قطعهٔ اورانیمی که در آن شکافت صورت می‌گیرد کوچک باشد، نوترون‌ها پیش از برخورد با هستهٔ اورانیم دیگر، از قطعه فرار می‌کند.

جرم بحرانی :جرمی است که برای آن هر شکافت به طور میانگین شکافت دیگری را به وجود می‌آورد. جرم **زیر بحرانی**، جرمی است که در آن واکنش زنجیره‌ای ادامه نمی‌یابد. جرم **فوق بحرانی**، جرمی است که در آن واکنش زنجیره‌ای به صورت انفجاری رشد می‌کند.

غنی‌سازی اورانیم :واکنش زنجیره‌ای معمولاً در اورانیم **طبیعی خالص** به وقوع نمی‌پیوندد؛ زیرا بخش اعظم آن (۹۹/۳ درصد) از ^{238}U تشکیل شده است. برای انفجارهای هسته‌ای به ^{235}U خالص نیاز داریم و برای استفاده در نیروگاه‌های هسته‌ای نیز باید فراوانی ^{235}U را به صورت مصنوعی زیاد کرد که این کار را «**غنی‌سازی**» می‌نامند. جداساختن ایزوتوپ کمیاب ^{235}U از ایزوتوپ فراوان بسیار دشوار است؛ زیرا هر دو ایزوتوپ به لحاظ شیمیایی یکسان‌اند و نمی‌توان از واکنش‌های شیمیایی استفاده کرد. جداسازی این دو ایزوتوپ براساس اختلاف جرم آنها صورت می‌گیرد.

یکی از روش‌های انجام این عمل استفاده از فرایند پخش است. در این روش، اورانیم در ترکیب با فلوئور به صورت گاز هگزافلورید اورانیم (UF_6) در می‌آید. چون ایزوتوپ سبک‌تر ^{235}U در دمای مساوی، سرعت متوسط آن کمی بیش از ایزوتوپ ^{238}U است و با آهنگ بیشتری از غشایی نازک می‌گذرد. پخش از هزاران مرحله، سرانجام باعث تولید نمونهٔ اورانیم با غنای مناسب می‌شود. این مقدار برای نیروگاه‌های تولید برق در حدود ۳ درصد است.



شکل ۸ــ۸ ــ مولکول‌های سبک‌تر در دمای یکسان سریع‌تر از مولکول‌های سنگین‌تر حرکت می‌کنند و در نتیجه، با سرعت بیشتری از غشای نازک می‌گذرند.

امروزه جداسازی اورانیم با استفاده از روش سانتریفوژ گازی راحت‌تر صورت می‌گیرد. گاز هگزافلورید اورانیم در یک استوانه با سرعت‌های فوق‌العاده زیاد از مرتبهٔ ۱۵۰۰ کیلومتر در ساعت چرخانده می‌شود. مولکول‌های گاز حاوی ^{238}U سنگین، مانند شیر در جداکننده‌های لبنیات، به خارج رانده می‌شوند و مولکول‌های گاز حاوی ^{235}U سبک‌تر، از مرکز استخراج می‌شوند. مشکلات مهندسی این روش در سال‌های اخیر برطرف شده است.

راکتورهای شکافت هسته‌ای: دیدیم که واکنش شکافت زنجیره‌ای معمولاً در اورانیم طبیعی **خالص** صورت نمی‌گیرد، زیرا بخش اعظم آن ^{238}U است، و نوترون‌های آزاد شده در شکافت ^{235}U که نوترون‌های سریع هستند را اتم‌های ^{238}U جذب می‌کنند بدون اینکه باعث شکافت شوند. این واقعیت تجربی مهم که نوترون‌های **کُند** را ^{235}U با احتمال بیشتر از ^{238}U جذب می‌کند اهمیت بسیار دارد. اگر نوترون‌ها را بتوان کُند ساخت، احتمال جذب نوترون ناشی از شکافت در یک اتم ^{235}U دیگر، حتی در حضور ^{238}U، افزایش می‌یابد. این افزایش احتمال می‌تواند برای به‌وجود آوردن واکنش زنجیره‌ای کافی باشد.

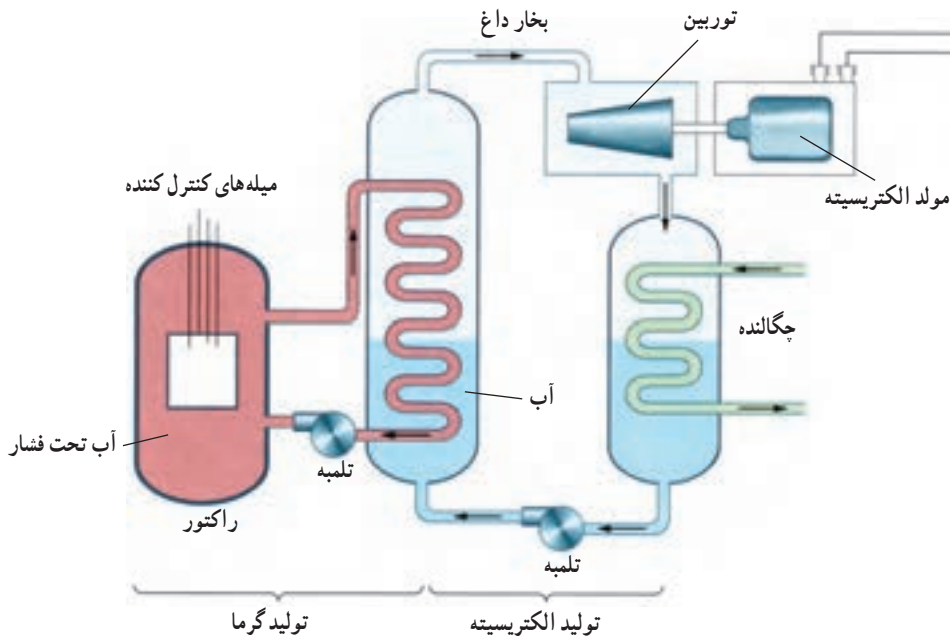
در کمتر از یک سال پس از کشف شکافت هسته‌ای، دانشمندان متوجه شدند که اگر اورانیم به قطعه‌های کوچک‌تر تقسیم شود و در بین این قطعه‌ها ماده‌ای قرار گیرد که نوترون‌های حاصل از شکافت* را کند و احتمال جذب آنها در اورانیم را زیاد سازد، می‌توان با استفاده از اورانیم طبیعی واکنش زنجیره‌ای به‌وجود آورد.

این روش را اولین بار انریکوفرمی در سال ۱۹۴۲ میلادی (۱۳۲۱ هـ.ش) در دانشگاه شیکاگو انجام داد. در اولین واکنش زنجیره‌ای کنترل شده، از گرافیت برای کُند کردن نوترون‌ها استفاده شده بود. دلیل استفاده از گرافیت این بود که نوترون در برخورد با آن، بخش قابل ملاحظه‌ای از انرژی خود را از دست می‌داد. اگر نوترون از هسته‌ای سنگین پس زده شود، سرعت و انرژی آن تغییر چندانی نخواهد کرد اما در برگشت از هستهٔ سبک کربن، سرعتش به طور قابل ملاحظه‌ای کم می‌شود. می‌گویند گرافیت «کُند کنندهٔ» نوترون است. کل این دستگاه را «راکتور» می‌نامند.

راکتورهای هسته‌ای کنونی علاوه بر سوخت هسته‌ای دارای کُند کننده، میله‌های کنترل، و شاره‌ای (معمولاً آب) برای خارج ساختن گرما از راکتورند. سوخت هسته‌ای در درجهٔ اول ^{238}U به علاوه ۳ درصد ^{235}U است. چون ^{235}U با ^{238}U بسیار رقیق شده است، امکان انفجار هسته‌ای مانند بمب در آن وجود ندارد. با واردکردن میله‌های کنترل به داخل راکتور، آهنگ واکنش یعنی تعداد نوترون‌های موجود برای به‌وجود آوردن شکافت، تنظیم می‌شود. میله‌های کنترل معمولاً از مواد

* انرژی جنبشی متوسط این نوترون‌ها ۲MeV است.

جذب‌کننده نوترون، مانند کادمیم یا بور، ساخته می‌شوند. آبی که سوخت هسته‌ای را احاطه کرده است معمولاً تحت فشار زیاد قرار می‌دهند تا بدون جوشیدن به دماهای زیاد برسد. آبی که بر اثر واکنش شکافت هسته‌ای گرم شده است، به دستگاهی با فشار آب کمتر منتقل می‌شود که با تولید بخار، توربین و ژنراتور الکتریسیته را به کار می‌اندازد؛ از این‌رو، از دو دستگاه آب، به طور جداگانه، استفاده می‌شود تا مواد پرتوزا وارد توربین نشوند.



شکل ۸ــ۹ــ نمودار یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

استفاده از شکافت در تولید انرژی :انرژی حاصل از شکافت هسته‌ای با انفجار بمب‌های هیروشیما و ناکازاکی به جهانیان معرفی شد. این تصویر هولناک هنوز از تفکری که در مورد انرژی هسته‌ای وجود دارد، رخت برنبسته است. فاجعهٔ انفجار چرنوبیل در سال ۱۹۸۶ میلادی (۱۳۶۵ هـ.ش) نیز به این وحشت از انرژی هسته‌ای اضافه کرد. با وجود این، در بسیاری از کشورها بخش عمده‌ای از انرژی مورد نیاز از این طریق تأمین می‌شود. راکتور هسته‌ای درست مانند کوره‌ای معمولی، آب را به جوش می‌آورد و بخار تولید می‌کند. مهم‌ترین تفاوت آن، مقدار سوخت دخیل در این کار است. یک کیلوگرم سوخت اورانیم، قطعه‌ای کوچک‌تر از یک توپ تنیس، بیش از ۳۰ کامیون بزرگ پر از زغال‌سنگ انرژی تولید می‌کند.

شکل ۸ــ ۱۰ــ نمونه‌ای از یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

نقطه ضعف اصلی استفاده از شکافت هسته‌ای تولید پسماندهای پرتوزاست. همان طور که قبلاً گفتیم، برای پایدار ماندن هسته باید با زیاد شدن عدد اتمی، نسبت نوترون به پروتون افزایش یابد. این نسبت برای هسته‌های سبک برابر ۱، در هسته‌های متوسط ۱/۲ و در هستهٔ سنگینی چون سرب ۱/۵ است. وقتی هستهٔ سنگینی چون اورانیم دو پاره می‌شود، این پاره‌ها دیگر برای پایداری به نسبت نوترون به پروتونی مانند اورانیم نیاز ندارند و باید این نسبت را کم کنند؛ بنابراین، تعدادی از نوترون‌ها مستقیماً در فرایند شکافت آزاد می‌شوند و بقیه در فرایند واپاشی پرتوزای پاره‌های شکافت به تدریج به پروتون تبدیل می‌شوند؛ بنابراین، پاره‌های شکافت پرتوزا هستند. اما بیشتر آنها دارای نیمه عمر کوتاه‌اند و به سرعت از بین می‌روند. با این همه، تعدادی از آنها دارای نیمه عمرهای هزاران ساله‌اند. دور ریختن همراه با ایمنی این پسماندها و موادی که در جریان تولید سوخت‌های هسته‌ای به وجود می‌آیند به روش‌ها و استفاده از محفظه‌های خاص نیاز دارد. گرچه بیش از نیم قرن از به کارگیری انرژی هسته‌ای می‌گذرد، اما فناوری دورریزی پسماندهای هسته‌ای هنوز در مرحله‌های اولیه است.

مزیت‌های توان هسته‌ای عبارتند از (۱) توانایی تولید الکتریسیته فراوان با استفاده از این انرژی؛ (۲) حفظ بیلیون‌ها تن زغال سنگ، نفت و گاز طبیعی که عملاً هر سال به گرما و دود تبدیل می‌شود و در دراز مدت می‌توان از آنها به عنوان منابع غنی از مولکول‌های آلی گرانبها استفاده کرد؛ و (۳) حذف میلیون‌ها تن دی‌اکسید گوگرد و سایر مواد سمی، و همین طور گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن، که هر سال با سوزاندن سوخت‌های فسیلی وارد جو می‌شود و با به‌وجود آوردن مسئلهٔ گرم‌شدن گلخانه‌ای تهدیدی عظیم برای محیط زیست انسان است.

همجوشی هسته‌ای

در واکنش شکافت هسته‌ای، دیدیم که هستهٔ سنگین با جذب یک نوترون به دو هستهٔ سبک‌تر شکافته می‌شود و مقداری انرژی آزاد می‌شود.

یک نوع واکنش هسته‌ای دیگر نیز وجود دارد که همجوشی هسته‌ای نام دارد و در آن دو هستهٔ سبک با یکدیگر ترکیب می‌شوند و هستهٔ سنگین‌تری تولید می‌کنند. در این واکنش نیز جرم هستهٔ تولید شده کمتر از جرم هسته‌های اولیه است و در نتیجه مقداری انرژی آزاد می‌شود.

$$_{1}^{1}H + _{1}^{1}H \longrightarrow _{1}^{2}H + e^{+} + \nu$$

$$_{1}^{2}H + _{1}^{1}H \longrightarrow _{2}^{3}He + \gamma$$

$$_{2}^{3}He + _{2}^{3}He \longrightarrow _{2}^{4}He + 2\,_{1}^{1}H$$

کل فرایند را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$4\,_{1}^{1}H \longrightarrow _{2}^{4}He + 2e^{+} + \text{مقداری انرژی}$$

در این واکنش چهار هستهٔ اتم هیدروژن (یعنی چهار پروتون) با هم ترکیب می‌شوند و یک هستهٔ هلیم ۴ (یعنی یک ذرهٔ آلفا) به اضافهٔ یک پوزیترون (e+) تولید می‌کنند و مقداری انرژی نیز آزاد می‌نمایند. پوزیترون پاد ذرهٔ الکترون است که جرم آن با جرم الکترون برابر و بار آن مثبت است.

واکنش همجوشی هسته‌ای با یک مشکل بزرگ همراه است، و آن اینکه ذره‌هایی که در این واکنش باید با هم ترکیب شوند بار مثبت دارند و برای آنکه با هم ترکیب شوند (به‌هم جوش بخورند) باید بر نیروی رانشی الکتریکی غلبه کنند. برای این کار در ابتدای فرایند باید مقدار زیادی انرژی صرف کرد.

برای مثال برای اینکه دو پروتون را به اندازهٔ کافی به هم نزدیک کنیم باید آنها را با انرژی حدود ۰/۱MeV به طرف هم برانیم. این کار را می‌توان به کمک دستگاه‌هایی به نام شتاب دهنده انجام داد. اما انرژی لازم برای راه‌اندازی چنین دستگاهی خیلی بیشتر از انرژی حاصل از واکنش همجوشی است.

راه دیگری که برای تأمین این انرژی وجود دارد گرما دادن به هسته‌ها تا دمای

مطالعهٔ آزاد

10^{7}°C است. در چنین دمایی انرژی جنبشی هسته‌ها برای غلبه بر رانش الکتریکی بین آنها کافی خواهد بود.

چنین دمای بالایی در ستارگان و خورشید وجود دارد. مثلاً دمای درونی خورشید در حدود 2×10^{7}°C است، در نتیجه واکنش همجوشی هسته‌ای در خورشید و ستارگان به‌طور عادی صورت می‌گیرد.

بخش عمدهٔ انرژی خورشیدی از طریق واکنش همجوشی تأمین می‌شود. این انرژی به‌اندازه‌ای است که هم خورشید را داغ نگه می‌دارد و هم انرژی لازم را برای منظومهٔ خورشیدی و از آن جمله سیارهٔ زمین فراهم می‌کند.

تمرین‌های فصل هشتم

۱ــ استرانسیوم ۹۰ ($^{90}_{38}Sr$) در اثر انفجارهای هسته‌ای تولید می‌شود و نیم‌عمر آن ۲۸ سال است. این ایزوتوپ را گیاهان جذب می‌کنند و از طریق غذا وارد بدن انسان می‌شود. تعداد پروتون‌ها، نوترون‌ها و الکترون‌های موجود در هر اتم با هستهٔ $^{90}_{38}Sr$ چقدر است؟

۲ــ آیا ایزوتوپ $^{61}_{25}X$ را می‌توان با روش شیمیایی از ایزوتوپ $^{59}_{25}Y$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ $^{61}_{26}Z$ چطور؟

۳ــ هنگامی که از ایزوتوپی یک ذرهٔ آلفا گسیل می‌شود، چه تغییری در هسته رخ می‌دهد؟ هنگام گسیل یک ذرهٔ بتا چطور؟ هنگام گسیل پرتو گاما چطور؟

۴ــ گاهی گفته می‌شود که «جرم را نمی‌توان تولید و نابود کرد» این گفته را تحلیل کنید.

۵ــ گاهی گفته می‌شود که تمام منابع انرژی از انرژی هسته‌ای حاصل شده‌اند. آیا سوخت‌هایی مانند زغال‌سنگ و نفت هم از انرژی هسته‌ای به‌دست آمده‌اند؟ توضیح دهید.

۶ــ هریک از اتم‌های زیر چند الکترون، چند پروتون و چند نوترون دارند؟

الف) بریلیوم ۹ ب) کلسیم ۴۰ پ) نقره ۱۰۷

ت) طلا ۱۹۷ ث) سرب ۲۰۸ ج) اورانیوم ۲۳۸

۷ــ واکنش‌های زیر را کامل کنید برای تعیین نماد ایزوتوپ‌ها از جدول تناوبی استفاده کنید.

$^{231}_{91}Pa \longrightarrow \alpha +$

$^{27}Si \longrightarrow {}^{27}Al +$

$^{240}_{92}U \longrightarrow \beta +$

$^{74}As \rightarrow {}^{74}Se +$

$^{131}I \longrightarrow {}^{131}Xe +$

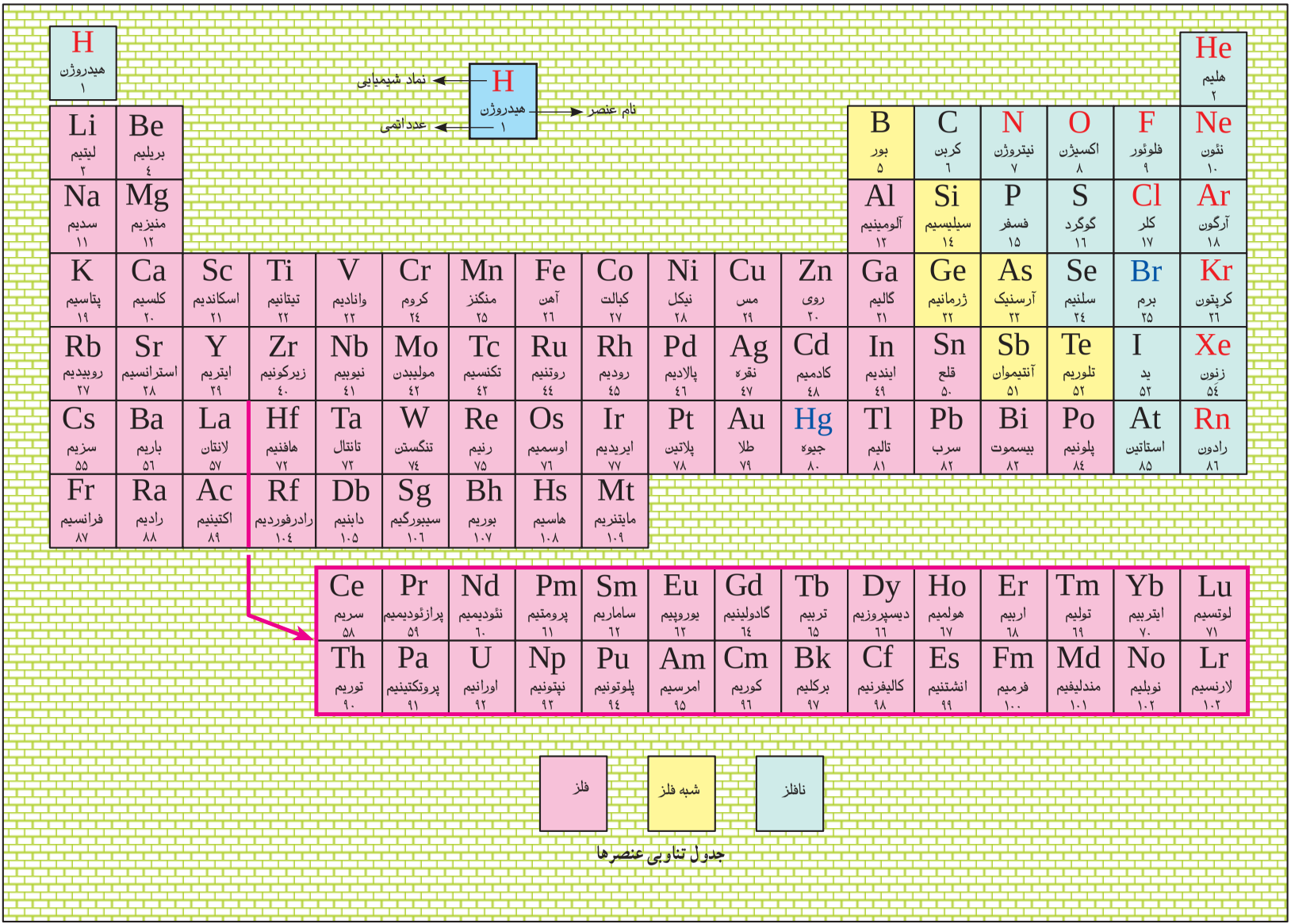
$^{99}_{43}T \longrightarrow \gamma +$

۸ــ نیم‌عمر بیسموت ۲۱۲ در حدود ۶۰ دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری از مادهٔ اولیه باقی‌مانده است؟

۹ــ آلومینیوم تنها یک ایزوتوپ پایدار $^{27}_{13}Al$ به جرم اتمی ۲۶/۹۸۱۵۴۱u دارد. جرم اتمی ایزوتوپ ناپایدار $^{26}_{13}Al$ آن برابر ۲۵/۹۸۶۹۸۲u است. انرژی بستگی هر یک از دو ایزوتوپ را برحسب MeV حساب کنید.

۱۰ــ انرژی بستگی کل، B، و انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون B/A ، را برای $^{56}_{26}Fe$ و $^{238}_{92}U$ حساب کنید. (جرم $^{56}_{26}Fe$ برابر $۹/۲۹ \times ۱۰^{-۲۶}kg$ و جرم $^{238}_{92}U$ برابر $۳/۹۵ \times ۱۰^{-۲۵}kg$ است.)

۱۱ــ در جریان یک حفاری باستان‌شناسی یک اجاق مخصوص پخت و پز کشف می‌شود. کربن موجود در زغال اجاق، ۱/۵۶ درصد (معادل $\frac{۱}{۶۴}$) مقدار عادی کربن ۱۴ است. سن تقریبی زغال چه مقدار است؟ (نیمه عمر کربن ۱۴ برابر ۵۷۳۰ سال است).



جدول تناوبی عنصرها

واژه‌نامهٔ فارسی ــ انگلیسی

آ ــ ا

آستانهٔ دردناکی	Threshold of pain
آستانهٔ شنوایی	Threshold of hearing
آشفتگی	Disturbance
آلایش	Doping
آونگ	Pendulum
آونگ ساده	Simple pendulum
آشکارسازی	Detection
ابر رسانا	Superconductor
اثر دوپلر	Doppler effect
اثر فوتوالکتریک	Photoelectric effect
ارتفاع اوج	Maximum height
الگوی بور	Bohr's model
الگوی تامسون	Thomson's model
الگوی رادرفورد	Rutherford's model
امواج الکترومغناطیس	Eelctromagnetic waves
انتشار	Propagation
انتهای آزاد	Free end
انتهای بسته	Fixed end
اندازه	Magnitude
انرژی بستگی	Binding energy
انرژی پتانسیل	Potential energy
انرژی پتانسیل کشسانی	Elastic potential energy
انرژی پتانسیل گرانشی	Gravitational potential
انرژی جنبشی	Kinetic energy
انرژی یونش	Ionization energy
ایزوتوپ	Isotope

ب

بار	Charge
برآیند	Resultant
بردار	Vector
بردار مکان	Position vector
بردارهای یکه	Unit vector
برهم کنش	Interaction
بسامد (فرکانس)	Frequency
بسامد زاویه‌ای	Angular frequency
بسامد قطع	Cut – off frequency
برانگیخته	Excited
بعد	Dimension
بلندگو	Loud speaker
بلندی (صوت)	Loudness
بیضی	Ellipse

پ

پایدار (مانا)	Stable
پایداری اتم	Atom stability
پایستگی انرژی	Energy conservation
پایستگی انرژی مکانیکی	Conservation of mechanical energy

پرتو گاما	Gamma ray

ت

تابش جسم سیاه	Black body radiation
تابش گرمایی	Thermal radiation
تابع دوره‌ای	Periodic function
تابع سینوسی	Sinusoidal function
تابع موج	Wave function
تابندگی	Radiance
تبدیل جرم ـ انرژی	Mass – energy conversion
تپ	Pulse
تجزیهٔ یک بردار	Resolution of a vector
تداخل	Interference
تداخل سازنده	Constructive interference
تداخل ویرانگر	Destructive interference
تراز انرژی	Energy level
تراز شدت (صوت)	Intensity level
تشدید	Resonance
تکفام	Monochromatic
تفریق بردارها	Subtraction of vectors

ث

ثابت پلانک	Planck’s constant
ثابت ریدبرگ	Rydberg constant
ثابت فنر	Constant of spring

ج

جابه‌جایی (تغییر مکان)	Displacement
جبههٔ موج	Wave front
جمع بردارها	Addition of vectors
جوش هسته‌ای(همجوشی هسته‌ای)	Nuclear fusion
جهت	Direction

چ

چشمه، منبع	Source

ح

حجم	Volume
حرکت با شتاب ثابت	Motion with constant acceleration
حرکت پرتابی	Projectile
حرکت تند شونده	Accelerating motion
حرکت دایره‌ای	Circular motion
حرکت دایره‌ای یکنواخت	Uniform circular motion
حرکت روی خط راست	Rectilinear motion
حرکت روی یک صفحه	Motion of plane
حرکت کندشونده	Decelerating motion
حرکت نوسانی ساده	Simple harmonic motion
حرکت یکنواخت	Uniform motion
حفره (کاواک)	Cavity

د

دامنه	Amplitude
درهٔ موج	Wave trough
دوره	Period
دیاپازون	Tuning fork
دینامیک	Dynamics
دیود	Diode

ذ

ذرهٔ بتا	Beta particle

ر

رادیواکتیو	Radioactive
رادیواکتیویته	Radioactivity
رسانا	Conductor
رشتهٔ خطوط	Series of lines

س

ساختار	Structure
سرعت	Velocity
سرعت انتشار	Speed of propagation
سرعت اولیه	Initial velocity
سرعت زاویه‌ای	Angular velocity
سرعت لحظه‌ای	Instantaneous velocity
سرعت متوسط	Average velocity
سطح شیب‌دار	Inclined plane
سقوط آزاد	Free falling
سو	Sense
سیارات	Planets

ش

شتاب	Acceleration
شتاب شعاعی	Radial acceleration
شتاب گرانش	Gravity acceleration
شتاب لحظه‌ای	Instantaneous acceleration
شتاب متوسط	Average acceleration
شدت (صوت)	Intensity
شدت موج	Wave Intensity
شکافت هسته	Nuclear fission
شکم (موج)	Antinode
شیب خط	Slope

ص

صوت	Sound

ض

ضریب اصطکاک حالت سکون	Static coeficient of friction
ضریب اصطکاک لغزشی	Kinematic coeficient of friction
ضریب جذب	Absorption coeficient

ط

طول موج	Wave length
طیف	Spectrum
طیف اتمی	Atomic spectrum
طیف نشری (گسیلی)	Emission spectrum
طیف جذبی	Absorption spectrum
طیف نما	Spectroscope
طیف نمایی	Spectroscopy

ع

عدد موج	Wave number

غ

غرش صوتی	Sonic boom
غنی‌سازی	Enrichment

ف

فرابنفش	Ultraviolet
فراصوت	Ultrasound

فروپاشی	Disintegration
فروسرخ	Infrared
فروصوت	Subsonic
فنر	Spring
فیزیک اتمی	Atomic physics
فیزیک هسته‌ای	Nuclear physics

ق

قانون جابه جایی وین	Wien’s displacment law
قطار موج	Wave train
قلب راکتور	Reactor core
قله موج	Wave’s crest
قوانین کپلر	Kepler’s laws
قوانین نیوتون	Newton’s laws

ک

کمیت اصلی	Quantity
کمیت برداری	Vectorial quantity
کمیت ناپیوسته	Discrete quantity
کمیت نرده‌ای	Scalar quantity

گ

گذار	Transition
گسیل	Emission

ل

لیمان	Lyman

م

ماهواره	Satelite
محور افقی	Horizontal axis
محور قائم	Vertical axis
مدل بوهر	Bohr's model
مسیر	Path
معادله‌های ماکسول	Maxwell equations
موج	Wave
موج ایستاده	Standing wave
موج تخت	Plane wave
موج سینوسی	Sinusoidal wave
موج طولی	Longitudinal wave
موج صوتی	Sound wave
موج عرضی	Transverse wave
موج کروی	Spherical wave
موج مکانیکی	Mechanical wave
مؤلفه‌های یک بردار	Components of a vector

ن

ناپیوسته	Discrete
ناظر	Observer
نسبیت	Relativity
نظریهٔ خورشید مرکزی	Heliocentric theory
نظریهٔ زمین مرکزی	Geocentric theory
نوار تاریک	Dark fringe
نوار روشن	Light fringe
نوارهای تداخلی	Inter ference
نور طبیعی	Natural light
نور مرئی	Visible light
نوسانگر	Oscillator
نوسان میرا	Damped oscillation
نیرو	Force

نیروسنج	Dynamometer
نیروی بازگرداننده	Restoring force
نیروی گرانشی	Gravitational force
نیروی مرکزگرا	Centripetal force
نیروی هسته‌ای	Nuclear force
نیمه عمر	Half life

و

واپاشی	Decay
واکنش	Reaction
واکنش زنجیره‌ای	Chain reaction
وضع تعادل	Equilibrium state
ولتاژ متوقف‌کننده	Stopping potential

هـ

همجوشی	Fusion
هسته (اتم)	Nucleus
هستهٔ پایدار	Stable nucleus
هستهٔ ناپایدار	Unstable nucleus
همگن	Homogeneous

ی

یکا	Unit

فهرست منابع

1– Physics Raymond, A. Serway Jerry S. Faughn 1999 by Holt Rinehart and Winston.

2– Physics for Scientists and Engineers, Paul A. Tipler 1999 by W. H. Freedman and Company.

3– College Physics, Raymond A. Serway Jerry S. Faughn 1999, 2000, Sauners College Publishing.

4 – Fundamentals of Physics.
David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker 2001 John Wiley & Sons, Inc.

5 – Physics. principles with Applications, Douglas C. Gioncoli 1991 Prentice-Hall International Editions.

6 – Understanding Physics , Robin Millar 1994 Collins Educational.

7 – Physics Classical and Modern, Frederick J. Keller W. Edward Gettys, Malcolm J. Skove 1993 Mc Graw Hill.

8 – University Physics, Hugh D. Young, Roger A. Freedman, 2000 Addison Wesley Longman, Inc.

9– Contemporary College Physics, Jones / Childers 1999 by Mc Graw Hill Companies.

10 – Physics 2 David Sanq 2001 Cambridge University Press.

11 – The Physical Universe, Krauskopf / Beiser, 1993 Mc Graw Hill, Inc.

12 – Physics, Hugh D. Young, Eight Edition, 1992, Addison Wesley Publishing Company.

۱۳ــ پرسش‌ها و مسئله‌های تکمیلی فیزیک ۱و۲ پیش‌دانشگاهی، انتشارات فاطمی،۱۳۸۷.
۱۴ــ دانشنامهٔ جهان اسلام، بنیاد دایرة المعارف اسلامی، گروه نویسندگان.
۱۵ــ دایرة المعارف اسلامی، مرکز دایرة المعارف بزرگ اسلامی، گروه نویسندگان.

فهرستی از کتب آموزشی مناسب، برای درج در انتهای کتب درسی دوره دوم متوسطه مطابق با جدول چاپ‌سپاری سال ۹۵ــ۱۳۹۴

کتاب فیزیک پیش‌دانشگاهی، رشته علوم تجربی

ردیف	عنوان	پدیدآورنده	ناشر	سال انتشار
۱	فیزیک برای علوم و مهندسی، جلد اول (مکانیک) ویرایش هفتم	ریموند سروی؛ محمود بهار	مبتکران/ پیشروان	۹۰
۲	فیزیک و مباحث علمی روز	مرتضی قریب	اندیشه‌سرا	۹۰
۳	مبانی فیزیک، مکانیک و گرما ــ جلد اول	دیوید هالیدی و دیگران؛ محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر	نیاز دانش	ویرایش دهم ۹۳
۴	فیزیک دانشگاهی سیرز و زیمانسکی (جلد اول ــ مکانیک)	هیو دی‌یانگ و راجر ای فریدمن؛ حسین صالحی و دیگران	دانش‌نگار	۹۳

کتاب فیزیک پیش‌دانشگاهی، رشته علوم ریاضی

ردیف	عنوان	پدیدآورنده	ناشر	سال انتشار
۱	فیزیک برای علوم و مهندسی، جلد اول (مکانیک) ویرایش هفتم	ریموند سروی؛ محمود بهار	مبتکران/ پیشروان	۹۰
۲	فیزیک و مباحث علمی روز	مرتضی قریب	اندیشه‌سرا	۹۰
۳	مبانی فیزیک، مکانیک و گرما ــ جلد اول	دیوید هالیدی و دیگران؛ محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر	نیازدانش	ویرایش دهم ۹۳
۴	فیزیک دانشگاهی سیرز و زیمانسکی (جلد اول ــ مکانیک)	هیو دی‌یانگ و راجر ای فریدمن؛ حسین صالحی و دیگران	دانش‌نگار	۹۳

خرید اینترنتی کتاب درسی

والدین گرامی و دانش‌آموز عزیز

در راستای توسعه دولت الکترونیک و با هدف اطلاع‌رسانی و سهولت دسترسی دانش‌آموزان به کتاب‌های درسی، در سال تحصیلی جدید در سراسر کشور، فروش و توزیع کتاب‌های درسی به‌صورت اینترنتی و از طریق سامانه فروش و توزیع مواد آموزشی به نشانی www.irtextbook.ir یا www.irtextbook.com انجام می‌شود.

نحوه خرید کتاب درسی :

۱ـ دانش‌آموزانی که به اینترنت دسترسی ندارند (سفارش گروهی) :

ـ مراجعه به مدرسه محل تحصیل

ـ پرداخت وجه کتاب به مدرسه محل تحصیل

ـ اعلام شماره تلفن همراه (فعال) اولیای دانش‌آموز برای دریافت پیام کوتاه از سامانه

ـ ثبت سفارش گروهی دانش‌آموزان در سامانه فروش و توزیع مواد آموزشی توسط مدرسه

۲ـ دانش‌آموزانی که به اینترنت دسترسی دارند (سفارش انفرادی) :

ـ ورود به سامانه فروش و توزیع مواد آموزشی

ـ کلیک روی دکمه «ورود به بخش سفارش دانش‌آموز»

ـ ثبت کد ملی دانش‌آموز به‌عنوان شناسه کاربری و شش رقم سمت راست سریال شناسنامه وی به‌عنوان رمز ورود

ـ ثبت و پرداخت اینترنتی سفارش براساس راهنمای سامانه

نکته :

ـ برای پرداخت اینترنتی نیاز به کارت بانکی، رمز دوم، کد اعتبارسنجی دوم روی کارت (CVV2) و تاریخ انقضای کارت بانکی می‌باشد.

ـ پیشنهاد می‌شود قبل از فرا رسیدن زمان خرید، یک‌بار بصورت آزمایشی با شناسه کاربری و رمز عبور خود وارد سامانه فروش و توزیع مواد آموزشی شوید و با محیط سامانه آشنا شوید. در صورتی که موفق به ورود به سامانه نشدید، تصویر شناسنامه جدید دانش‌آموز را به مدرسه محل تحصیل وی تحویل دهید، تا مدرسه، اطلاعات شناسنامه دانش‌آموز (سریال شناسنامه) را در سامانه ثبت‌نام دانش‌آموزان (سناد)، اصلاح نماید.

ارائه نظرات، پیشنهادات و انتقادات ارزشمند شما در هر بخش از فعالیت‌های سامانه فروش و توزیع مواد آموزشی به نشانی info@irtextbook.com و دورنگار ۸۸۳۰۹۲۶۶، ما را در شناسایی نقاط قوت و ضعف خدمات و محصولات یاری خواهد رساند.

معلّمان محترم، صاحب نظران، دانش آموزان عزیز و اولیای آنان می توانند نظرات اصلاحی خود را درباره مطالب این کتاب از طریق نامه به نشانی تهران - صندوق پستی ۱۵۸۷۵/۴۸۷۴ - گروه درسی مربوط و یا پیام نگار (Email) talif@talif.sch.ir ارسال نمایند.

دفتر تألیف کتاب های درسی عمومی و متوسطه نظری