

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

فیزیک

دوره پیش‌دانشگاهی

رشته علوم تجربی

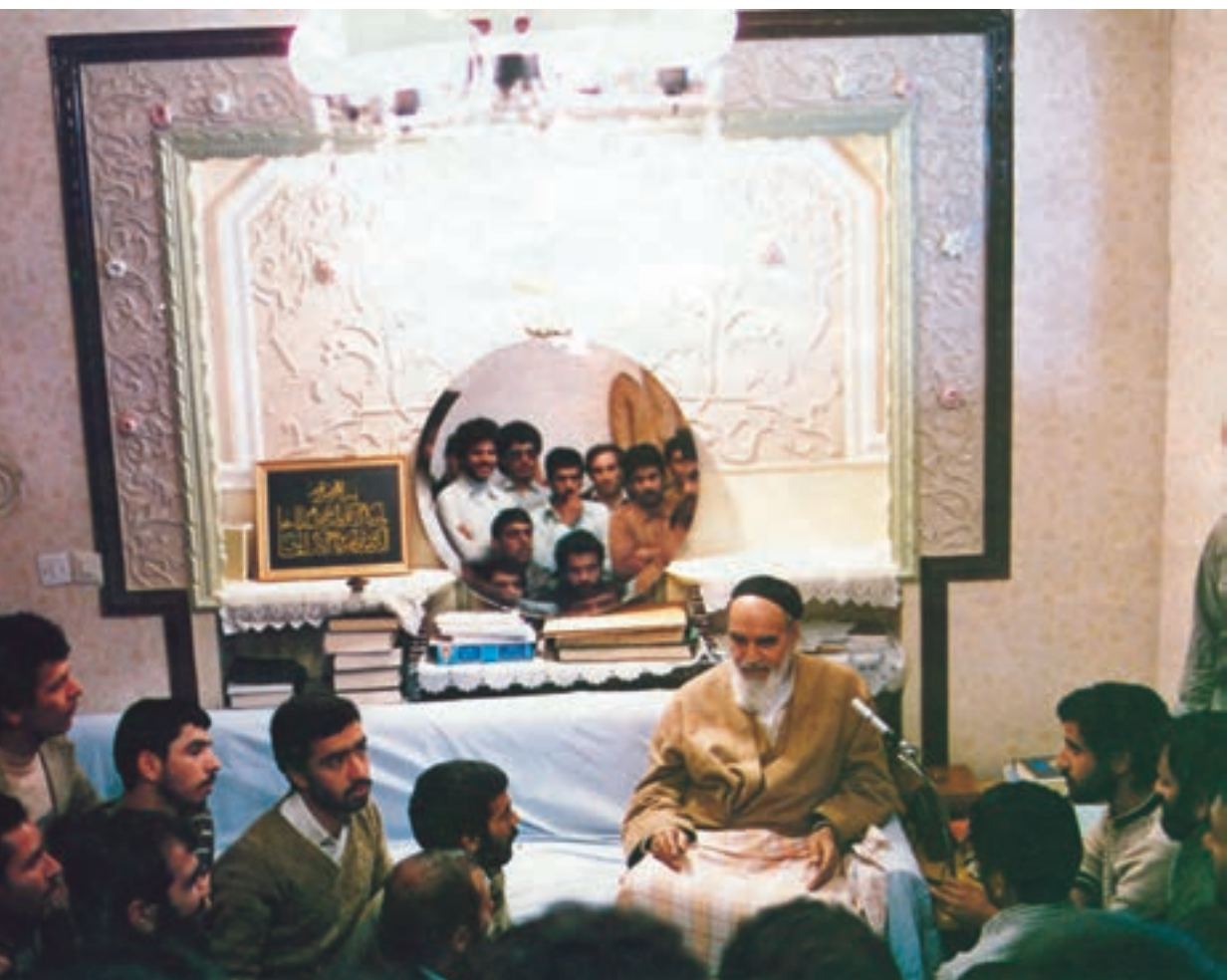
عنوان و نام پدیدآور: فیزیک دوره پیش‌دانشگاهی رشته علوم تجربی [کتاب‌های درسی]: ۲۸۸/۱ / برنامه‌ریزی محتوا و نظارت بر تألیف: دفتر تألیف کتاب‌های درسی ابتدایی و متوسطه نظری؛ شورای برنامه‌ریزی و مؤلفان: احمد احمدی... [و دیگران]. مشخصات نشر: تهران: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۵.
مشخصات ظاهری: ۲۱۹ ص. : مصور (رنگی)، جدول (رنگی)، نمودار
شابک: ۹۶۴-۰۵-۱۱۷۷-۳
وضعیت فهرست‌نویسی: فیبا
یادداشت: کتابنامه: ص. ۲۱۹
یادداشت: شورای برنامه‌ریزی و مؤلفان احمد احمدی... [و دیگران]
موضوع: فیزیک
شناسه افزوده: احمدی، احمد، ۱۳۴۷-
شناسه افزوده: سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی. دفتر تألیف کتاب‌های درسی ابتدایی و متوسطه نظری. اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی.
رده‌بندی دیویی: ۲۸۸/۱ ک ۳۷۳
شماره کتابشناسی ملی: ۱۱۱۷۳۸۸

وزارت آموزش و پرورش
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی



نام کتاب:	فیزیک دوره پیش‌دانشگاهی - 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 بورقازی، روح‌الله خلیلی، بروجنی، ابوالقاسم زال‌پور، سید مهدی شیوایی، شیرین فراهانی، حسن عزیزی و غلامعلی محمودزاده (اعضای شورای برنامه‌ریزی و تألیف) - محمدکاظم بهنیا (ویراستار)
مدیریت آماده‌سازی هنری:	اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی
شناسه افزوده آماده‌سازی:	لیدا نیک‌روش (مدیر امور فنی و چاپ) - طاهره حسن‌زاده (طراح جلد) - راحله زادفتح‌اله، خدیجه محمدی (صفحه‌آرا) - فاطمه رئیسیان فیروزآباد، مریم دهقان‌زاده (رسام) - فاطمه باقری مهر، آذر روستایی فیروزآباد، فرشته ارجمند، سپیده ملک‌ایزدی، حمید ثابت کلاچاهی، ناهید خیام‌باشی (امور آماده‌سازی)
نشانی سازمان:	تهران: خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی) تلفن: ۹-۸۸۸۳۱۱۶۱، دورنگار: ۰۹۲۶۶-۸۸۳۰، کد پستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹
ناشر:	شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران: تهران - کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروبخش) تلفن: ۵-۴۴۹۸۵۱۶۱، دورنگار: ۰۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۱۳۹-۳۷۵۱۵
چاپخانه:	شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»
سال انتشار و نوبت چاپ:	چاپ پانزدهم ۱۳۹۵
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 به صورت 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.



هرکاری را که انسان باورش این است که نسبت به آن کار ضعیف است، نمی تواند آن کار را انجام بدهد. . . . هر کشوری که اعتقادش این باشد که نمی تواند خودش صنعتی را ایجاد کند این ملت محکوم به این است که تا آخر نتواند، و این اساس نقشه هایی بوده است که برای ملل ضعیف دنیا قدرت های بزرگ کشیده اند.

امام خمینی رحمه الله علیه

فهرست

۱

فصل ۱: حرکت شناسی در دو بعد

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

۳۱

فصل ۲: دینامیک

- ۳۲ ۱-۲- قانون‌های نیوتون
- ۳۵ ۲-۲- چگونگی استفاده از قانون‌های نیوتون در حرکت یک جسم
- ۳۸ ۳-۲- تکانه (اندازه حرکت)
- ۴۲ ۴-۲- حرکت دایره‌ای
- ۴۴ ۵-۲- حرکت دایره‌ای یکنواخت
- ۴۹ ۶-۲- دینامیک حرکت دایره‌ای یکنواخت
- ۵۳ تمرین‌های فصل دوم

۵۶

فصل ۳: حرکت نوسانی

- ۵۷ ۱-۳- حرکت هماهنگ ساده
- ۶۱ ۲-۳- معادله حرکت هماهنگ ساده
- ۶۷ ۳-۳- معادله‌های سرعت و شتاب در حرکت هماهنگ ساده
- ۶۹ ۴-۳- انرژی مکانیکی نوسانگر (دستگاه جرم - فنر)
- ۷۱ ۵-۳- آونگ ساده
- ۷۴ ۶-۳- تشدید
- ۷۶ تمرین‌های فصل سوم

فصل ۴: موج‌های مکانیکی

۷۸

- ۷۹ ۴-۱- موج
- ۸۸ ۴-۲- موج‌های عرضی - موج‌های طولی
- ۸۹ ۴-۳- تابع موج
- ۹۷ ۴-۴- انتشار موج در دو و سه بُعد
- ۱۰۲ ۴-۵- اصل برهم نهی موج‌ها
- ۱۰۹ ۴-۶- برهم نهی موج‌ها در دو بُعد - تداخل موج‌ها در سطح آب
- ۱۱۱ تمرین‌های فصل چهارم

فصل ۵: موج‌های صوتی

۱۱۳

- ۱۱۴ ۵-۱- موج صوتی
- ۱۱۷ ۵-۲- سرعت صوت
- ۱۲۱ ۵-۳- لوله‌های صوتی
- ۱۲۷ ۵-۴- شدت صوت
- ۱۳۲ تمرین‌های فصل پنجم

فصل ۶: موج‌های الکترومغناطیسی

۱۳۴

- ۱۳۶ ۶-۱- چگونگی تشکیل موج‌های الکترومغناطیس توسط یک آنتن
- ۱۴۱ ۶-۲- سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی
- ۱۴۲ ۶-۳- طیف موج‌های الکترومغناطیسی
- ۱۴۵ ۶-۴- تداخل موج‌های نوری
- ۱۵۰ تمرین‌های فصل ششم

فصل ۷: آشنایی با فیزیک اتمی

۱۵۲

- ۱-۷- نظریه کوانتومی ۱۵۴
- ۲-۷- فوتون و پدیده فوتوالکتریک ۱۶۰
- ۳-۷- طیف اتمی ۱۶۵
- ۴-۷- الگوهای اتمی ۱۷۳
- ۵-۷- آشنایی با لیزر ۱۸۰
- تمرین‌های فصل هفتم ۱۸۴

فصل ۸: آشنایی با ساختار هسته

۱۸۷

- ۱-۸- ساختار هسته اتم ۱۸۸
- ۲-۸- پرتوزایی ۱۹۷
- ۳-۸- انرژی هسته‌ای ۲۰۳
- تمرین‌های فصل هشتم ۲۱۰

۲۱۳ واژه‌نامه فارسی - انگلیسی

۲۱۸ فهرست منابع

پیشگفتار

سخنی با دانش آموزان

کتابی که پیش رو دارید، چهارمین و آخرین کتاب در دوره آموزش متوسطه است که شما را با برخی دیگر از مفاهیم و کاربردهای علم فیزیک آشنا می‌سازد. انتظار می‌رود با مفاهیم کتاب‌های پیشین به خوبی آشنا شده باشید، چرا که هر علم بر مبنای پیش‌نیازهای آن بی‌ریزی می‌شود. امیدواریم تاکنون به اهمیت فیزیک که یکی از بنیادی‌ترین دانش‌هاست پی برده و از مطالعه آن لذت برده باشید. فیزیک شالوده تمام علوم مهندسی و فناوری 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 روزه 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 نظریه فیزیکی بازنگری و یا حتی رد شود؛ و این همان چیزی است که مطالعه فیزیک را هیجان‌انگیز می‌کند تا افراد خلاق بتوانند روزه‌ها و مسیرهای جدیدی را در پیشبرد فیزیک بگشایند. بیش 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 به راحتی فیزیک را بفهمید و آن را به کار 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 به کار بستن این نظریات در وضعیت‌های مشخص و مثال‌های عینی افزایش یابد. برای رسیدن به هدف دوم، مثال‌های حل شده زیادی در لابه‌لای متن اصلی و همچنین مسائلی در پایان هر فصل آمده است. سفارش فراوان می‌کنیم که نخست متن اصلی را به خوبی درک کنید و سپس به مطالعه مثال‌های حل شده و مسئله‌ها بپردازید.

سخنی با همکاران ارجمند

به تبع تغییرات انجام شده در آخرین سال تحصیلی، کتاب فیزیک (۱) و (۲) دوره پیش‌دانشگاهی نظام ترمی واحدی، با عنوان فیزیک پیش‌دانشگاهی دوره 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، ارائه 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 ۹۱-۹۲ کتاب راهنمای معلم فیزیک دوره پیش‌دانشگاهی به همراه لوحی فشرده در اختیار همکاران عزیز قرار می‌گیرد تا مواد آموزشی بیشتری را جهت ارائه 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 ابتدایی و متوسطه نظری از همکاران عزیزی که طی سال‌های گذشته، نظرهای اصلاحی و پیشنهادهای سازنده خود را برای این گروه فرستاده‌اند، سپاس فراوان دارد. پس از این نیز می‌توانید از طریق physics-dept@talif.sch.ir یا نشانی تهران - 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 ابتدایی و متوسطه نظری

حرکت شناسی در دو بعد



فصل



حرکت شناسی در دو بعد

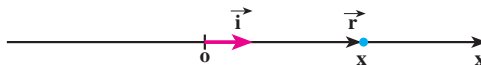
نگاهی به فصل : دربارهٔ حرکت‌هایی که در اطراف ما رخ می‌دهد، اغلب پرسش‌های زیادی برای ما مطرح می‌شود. پرسش‌هایی چون: سیاره‌ها در چه مسیرهایی به دور خورشید حرکت می‌کنند؟ چرا هنگامی که فتری را می‌کشیم و رها می‌کنیم نوسان می‌کند؟ ماهواره‌ها را چگونه در مدار زمین قرار می‌دهند؟ و... پاسخ این پرسش‌ها را باید در علم مکانیک جست و جو 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 حرکت شناسی 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 بر روی 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.

۱-۱- حرکت در یک بعد

در شکل ۱-۱ 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 به صورت زیر نوشت:

$$\vec{r} = x \vec{i} \quad (1-1)$$

در این رابطه \vec{i} بردار یکه در جهت محور x است.



شکل ۱-۱

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 لحظه t کافی است که x را به صورت تابعی از زمان داشته باشیم:

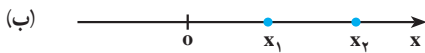
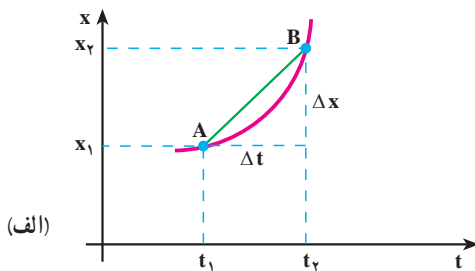
$$x = f(t) \quad (2-1)$$

این رابطه، معادله حرکت جسم نامیده می‌شود.

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

تمرین ۱-۱

معادله حرکت جسمی در یک بعد در SI با رابطه $x = -t^2 + 6t - 8$ بیان شده است. الف) نمودار مکان-زمان آن را رسم کنید. ب) بردار مکان جسم را در زمان‌های $t = 0, 1, 3$ (s) روی محور x نمایش دهید.



شکل ۲-۱

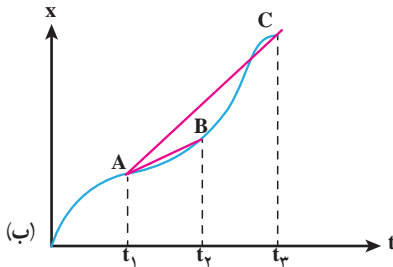
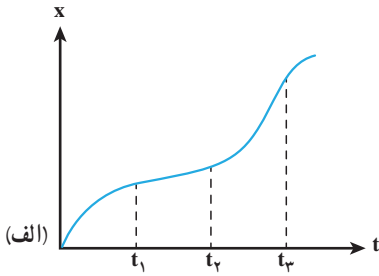
سرعت متوسط: نمودار مکان-زمان

جسمی در شکل ۲-۱ الف نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲-۱ ب نشان داده شده است، متحرک در لحظه t_1 در مکان x_1 (نقطه A) روی نمودار مکان-زمان و در لحظه t_2 در مکان x_2 (نقطه B) قرار دارد.

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

$$\bar{v}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3-1)$$

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



شکل ۳-۱

در نمودار شکل ۳-۱ الف سرعت متوسط را در بازه‌های $t_2 - t_1$ و $t_3 - t_1$ با هم مقایسه کنید.

پاسخ: در شکل ۳-۱ ب خط‌های AB و AC به ترتیب بین دو لحظه t_1 و t_2 و دو لحظه t_1 و t_3 رسم شده‌اند. شیب پاره خط AB برابر سرعت متوسط در بازه $t_2 - t_1$ است و شیب پاره خط AC برابر سرعت متوسط در بازه $t_3 - t_1$ است. و چون شیب پاره خط AC بیشتر از شیب پاره خط AB است، بنابراین سرعت متوسط در بازه $t_3 - t_1$ بزرگ‌تر از سرعت متوسط در بازه $t_2 - t_1$ است.

معادله حرکت جسمی در SI با رابطه $x = 2t^2 + 1$ 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)

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

$$\bar{v}_x = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{9 - 3}{2 - 1} = 6 \text{ m/s}$$

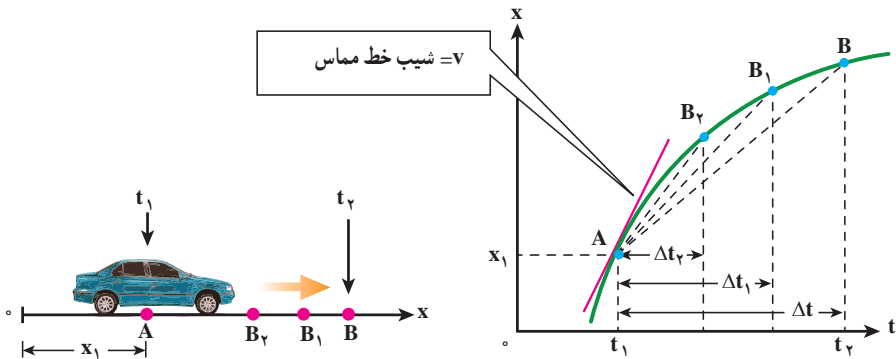
$$\bar{v}_x = \frac{3/42 - 3}{1/1 - 1} = 4/2 \text{ m/s} \quad \text{ب)}$$

$$\bar{v}_x = \frac{3/0.42 - 3}{1/0.1 - 1} = 4/0.2 \text{ m/s} \quad \text{پ)}$$

$$\bar{v}_x = \frac{3/0.042 - 3}{1/0.01 - 1} = 4/0.02 \text{ m/s} \quad \text{ت)}$$

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

سرعت لحظه‌ای: دیدیم که سرعت متوسط بین دو نقطه از نمودار مکان-زمان، شیب خطی است که نمودار مکان-زمان را در آن دو نقطه قطع می‌کند. اکنون می‌خواهیم ببینیم از دید هندسی با کوچک شدن تدریجی Δt ، سرعت متوسط به چه صورتی درمی‌آید. به این منظور نمودار مکان-زمان ۴-۱ را در نظر بگیرید. از این شکل درمی‌یابیم اگر بازه زمانی Δt کوچک و کوچک‌تر شود، نقطه B به نقطه A نزدیک و نزدیک‌تر می‌شود و سرانجام خط AB در نقطه A بر نمودار مماس می‌گردد. شیب خط مماس را در این حالت، سرعت لحظه‌ای جسم در لحظه t_1 می‌نامیم.



شکل ۴-۱ شکل سمت چپ، اتومبیلی را نشان می‌دهد که در راستای محور x حرکت می‌کند. شکل سمت راست، نمودار مکان-زمان حرکت اتومبیل را نشان می‌دهد. با کوچک شدن Δt ، B به A نزدیک شده و خط واصل در حالت $\Delta t \rightarrow 0$ تبدیل به خط مماس بر منحنی می‌شود و شیب آن، سرعت لحظه‌ای را نشان می‌دهد.

به عبارت دیگر، هنگامی که t_1 به t_2 نزدیک می‌شود، یعنی وقتی Δt به سمت صفر میل می‌کند، متوسط است هنگامی که Δt به سمت صفر میل می‌کند. پس، سرعت لحظه‌ای حد سرعت؛

در نتیجه داریم:

$$v_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (4-1)$$

در درس ریاضی دیده‌اید که این حد، برابر مشتق تابع x نسبت به زمان است که به صورت زیر

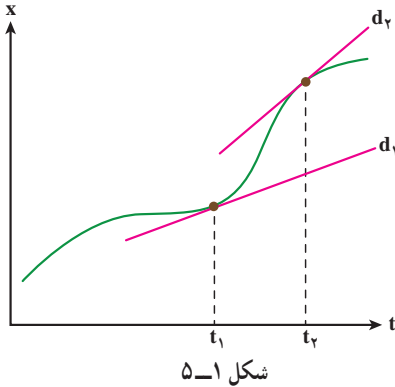
نوشته می‌شود:

$$v_x = \frac{dx}{dt} \quad (5-1)$$

اگر $x = f(t)$ معلوم باشد، از رابطه ۵-۱ می‌توان v_x را به صورت تابعی از زمان به دست آورد، این تابع، معادله سرعت نامیده می‌شود. در حالت حدی وقتی که Δt به سمت صفر میل می‌کند، وتر AB

در نقطه A بر نمودار مکان - زمان مماس می شود. این، همان تعبیر هندسی مشتق است که در درس ریاضی خوانده اید. از این به بعد، سرعت لحظه ای را - به اختصار - سرعت می نامیم.

مثال ۳-۱

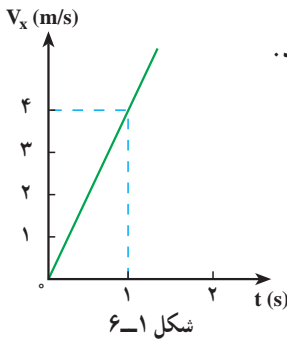


در شکل ۵-۱ مماس d_1 ، در لحظه t_1 و مماس d_2 در لحظه t_2 نشان داده شده است. در کدام لحظه سرعت بیشتر است؟
پاسخ: همان طور که در شکل دیده می شود شیب d_2 بیشتر از شیب d_1 است و بنابراین $v_2 > v_1$ است (سرعت در لحظه t_2 بیشتر از سرعت در لحظه t_1 است).

شکل ۵-۱

مثال ۴-۱

در مثال ۲-۱، معادله حرکت متحرک به صورت $x = 2t^2 + 1$ است. الف) معادله سرعت آن را به دست آورید. ب) نمودار سرعت - زمان را برای آن رسم کنید. پ) سرعت متحرک را در لحظه $t = 1$ s به دست آورید.



شکل ۶-۱

پاسخ

الف) با استفاده از رابطه ۵-۱ داریم:

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

ب) نمودار سرعت - زمان به صورت خط راستی است که از مبدأ دستگاه $v-t$ می گذرد.

پ)

$$v_x = 4t$$

$$t = 1\text{ s} \Rightarrow v_x = 4\text{ m/s}$$

این نتیجه را می توانستیم از مثال ۲-۱ 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 لحظه $t = 1 \text{ s}$) نزدیک می‌شود.

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

$$\vec{v} = v_x \vec{i} \quad (6-1)$$

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.

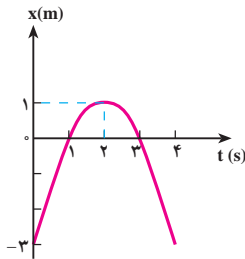
مثال ۵-۱

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

پاسخ

الف) با استفاده از رابطه ۵-۱ داریم:

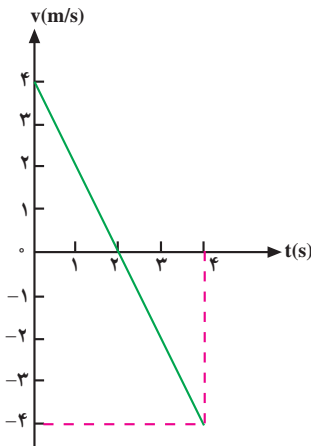
$$v_x = \frac{dx}{dt} = -2t + 4$$



شکل ۷-۱

ب) نمودار مکان-زمان متحرک به صورت یک سهمی است (شکل ۷-۱) که بیشینه آن در لحظه $t = 2 \text{ s}$ است (چرا؟). همچنین جسم در لحظه‌های $t = 1 \text{ s}$ و $t = 3 \text{ s}$ در مبدأ و در لحظه $t = 0$ ، در نقطه $x = -3 \text{ m}$ قرار دارد.

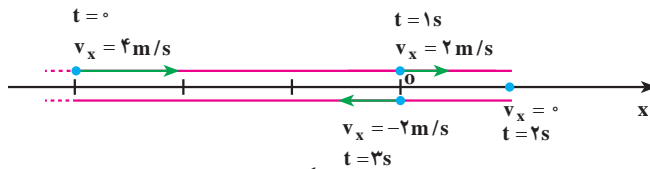
نمودار سرعت-زمان متحرک به صورت یک خط راست است (شکل ۸-۱) که در بند الف) معادله آن را به دست آوردیم.



شکل ۸-۱

پ) با توجه به این نمودارها ملاحظه می‌شود که متحرک در لحظه $t = 0$ در مکان $x = -3\text{m}$ قرار دارد و با سرعت 4m/s در جهت محور x حرکت می‌کند؛ سپس سرعت آن به تدریج، کاهش می‌یابد (شیب مماس بر نمودار مکان-زمان در شکل ۱-۷ به تدریج، کم می‌شود) تا در لحظه $t = 2\text{s}$ که سرعت آن صفر می‌شود. می‌توان گفت شیب مماس بر نمودار مکان-زمان در این لحظه صفر می‌شود.

از لحظه $t = 2\text{s}$ به بعد متحرک برمی‌گردد و در خلاف جهت محور x شروع به حرکت می‌کند و v_x منفی می‌شود. در برگشت، اندازه سرعت افزایش می‌یابد و در لحظه $t = 3\text{s}$ دوباره از مبدأ می‌گذرد. در این لحظه سرعت آن -2m/s است. مسیر حرکت جسم در شکل ۱-۹ رسم شده و بردار سرعت آن نیز روی شکل نمایش داده شده است.



شکل ۱-۹

در شکل ۱-۹ 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، معادله مکان و معادله سرعت جسم، به ترتیب به صورت زیر بیان می‌شود:

$$x = -t^2 + 4t - 3$$

$$v_x = -2t + 4$$

مثال ۱-۷

متحرکی با سرعت ثابت 5m/s ، در خلاف جهت محور x حرکت می‌کند. این متحرک در لحظه $t = 0$ از نقطه $x = 10\text{m}$ می‌گذرد. الف) معادله حرکت را بنویسید. ب) تعیین کنید که متحرک در چه زمانی به مبدأ مختصات می‌رسد.

پاسخ

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

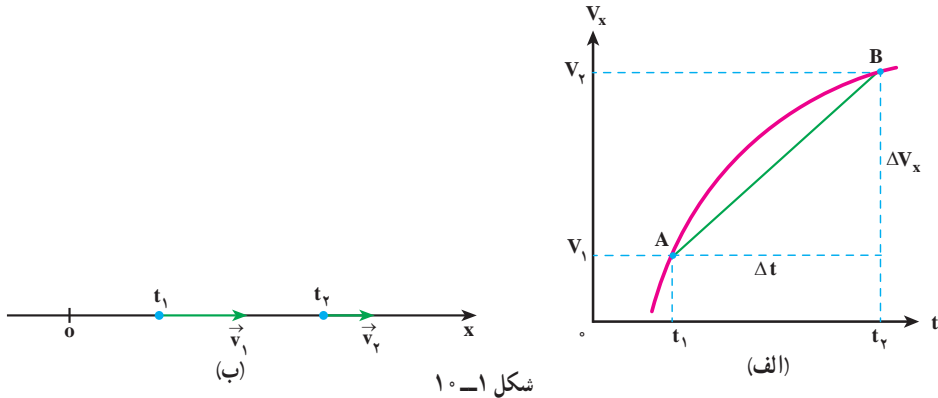
$$x = v_x t + x_0 \quad (7-1)$$

بیان می‌شود که در آن v_x سرعت (ثابت) جسم و x_0 مکان جسم در لحظه $t = 0$ است. در نتیجه، چون در این مثال، $x_0 = +10 \text{ m}$ و $v_x = -5 \text{ m/s}$ است، معادله حرکت جسم به صورت زیر خواهد بود.

$$x = -5t + 10 \quad (\text{ب})$$

$$x = 0 \Rightarrow 0 = -5t + 10 \Rightarrow t = 2 \text{ s}$$

شتاب متوسط و شتاب لحظه‌ای: می‌دانید هنگامی که سرعت جسم تغییر می‌کند، حرکت را شتاب‌دار می‌نامند. در شکل ۱-۱ الف نمودار سرعت-زمان یک حرکت شتاب‌دار و در شکل ۱-۱ ب بردار سرعت متحرک، در زمان‌های t_1 و t_2 ، نشان داده شده است.

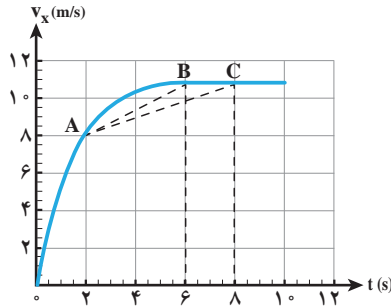


همچنین می‌دانید که $\Delta v_x = v_{2x} - v_{1x}$ را تغییر سرعت متحرک در بازه زمانی Δt و نسبت $\frac{\Delta v_x}{\Delta t}$ را که شیب خط AB در نمودار سرعت-زمان است، شتاب متوسط متحرک در این بازه زمانی می‌نامند. این کمیت را با نماد \bar{a} نشان می‌دهیم؛ در نتیجه داریم:

$$\bar{a}_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} \quad (8-1)$$

مثال ۷-۱

نمودار سرعت-زمان متحرکی که در راستای محور x حرکت می‌کند، به صورت شکل ۱-۱۱ 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 ۱-۱۱

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

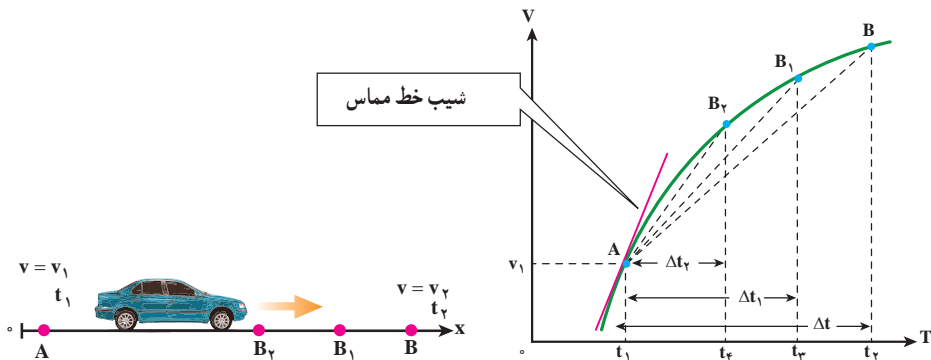
$$\bar{a}_1 = \text{شیب } AB \approx \frac{11-8}{6-2} = \frac{3}{4} \text{ m/s}^2$$

و شتاب متوسط در بازه زمانی دوم چنین می شود:

$$\bar{a}_2 = \text{شیب } AC \approx \frac{11-8}{8-2} = \frac{3}{6} = \frac{1}{2} \text{ m/s}^2$$

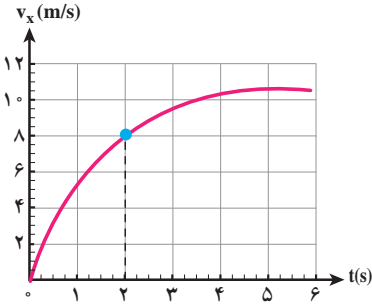
بنابراین $\bar{a}_1 > \bar{a}_2$ است.

در شکل ۱-۱۰ هم هنگامی که Δt بسیار کوچک و کوچک تر می شود، نقطه B به نقطه A نزدیک و نزدیک تر می شود و سرانجام خط AB در نقطه A بر نمودار سرعت - زمان مماس می گردد. شیب خط مماس بر نمودار در نقطه A را شتاب لحظه ای جسم در لحظه t_1 می نامیم (شکل ۱-۱۲).

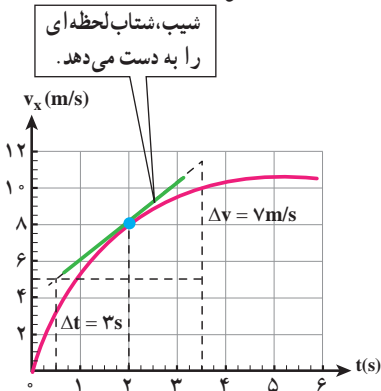


شکل ۱۲-۱۰ سمت چپ اتومبیلی را نشان می دهد که در راستای محور x حرکت می کند. شکل سمت راست، نمودار سرعت - زمان اتومبیل را نشان می دهد. با کوچک شدن Δt ، B به A نزدیک شده و در حالت $\Delta t \rightarrow 0$ ، خط واصل تبدیل به خط مماس می شود و شیب آن، شتاب لحظه ای را نشان می دهد.

نمودار سرعت - زمان متحرکی که در راستای محور x حرکت می کند در شکل ۱۳-۱ نشان داده شده است. شتاب این متحرک را در $t=2s$ تعیین کنید.



شکل ۱۳-۱



شکل ۱۴-۱

پاسخ: شتاب متحرک در $t=2s$ برابر شیب این منحنی در $t=2s$ است.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{7m/s}{3} = 2/3 m/s^2$$

توجه کنید که در حل این مسئله می توانستید از مختصات هر دو نقطه دلخواه دیگری از خط مماس نیز استفاده کنید.

اکنون می توان شتاب لحظه ای را، مانند سرعت لحظه ای، به طور دقیق تعریف کرد که: هنگامی که Δt به سمت صفر میل می کند، $\bar{a}_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}$ شتاب لحظه ای جسم را در لحظه t_1 به دست می دهد. به عبارت دیگر، شتاب لحظه ای حد شتاب متوسط است هنگامی که Δt به سمت صفر میل می کند. شتاب لحظه ای را با a_x نمایش می دهیم. در نتیجه داریم:

$$a_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{dv_x}{dt} \quad (9-1)$$

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

شتاب لحظه‌ای را شتاب می‌نامیم. اکنون با استفاده از رابطه‌های ۱-۵ و ۱-۹ شتاب را می‌توان به صورت زیر نوشت:

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

مثال ۱-۹

معادله حرکت جسمی در SI به صورت $x = t^2 - 6t^2 + 9t$ بیان شده است. الف) شتاب متوسط آن را در بازه 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 بازه زمانی لازم است سرعت متحرک را در لحظه‌های $t = 1s$ و $t = 2s$ داشته باشیم. ابتدا معادله سرعت را به دست می‌آوریم:

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

از این معادله در لحظه‌های $t = 1s$ و $t = 2s$ به ترتیب، مقادیر 0 (صفر) و -3 m/s برای سرعت به دست می‌آید. در نتیجه برای شتاب متوسط خواهیم داشت:

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

ب) ابتدا معادله شتاب متحرک را می‌نویسیم:

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

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

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

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

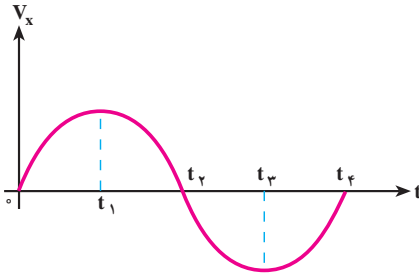
بردار شتاب را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$\vec{a} = a_x \vec{i} \quad (1-10)$$

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 ۲-۱



شکل ۱-۱۵

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

هنگامی که اندازه سرعت متحرکی زیاد می شود حرکت را تندشونده و هنگامی که اندازه سرعت متحرکی کاهش می یابد، حرکت را کندشونده می نامند.

فعالیت ۱-۱

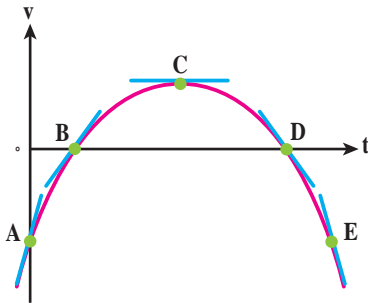
در تمرین ۲-۱، سرعت متحرک در بازه زمانی t_1 تا t_2 مثبت است. a_x نیز مثبت است؛ زیرا شیب مماس بر نمودار در این بازه زمانی مثبت است و حرکت تندشونده است. حاصل ضرب $a_x v_x$ نیز مثبت است. اکنون جاهای خالی را در گزاره های زیر پر کنید.

الف) در بازه زمانی t_1 تا t_2 سرعت متحرک است. a_x است. حرکت است. حاصل ضرب $a_x v_x$ است.

ب) در بازه زمانی t_2 تا t_3 سرعت متحرک است. a_x است. حرکت است. حاصل ضرب $a_x v_x$ است.

پ) در زمان های بزرگ تر از t_3 ، سرعت متحرک است. a_x است. حرکت است. حاصل ضرب $a_x v_x$ است.

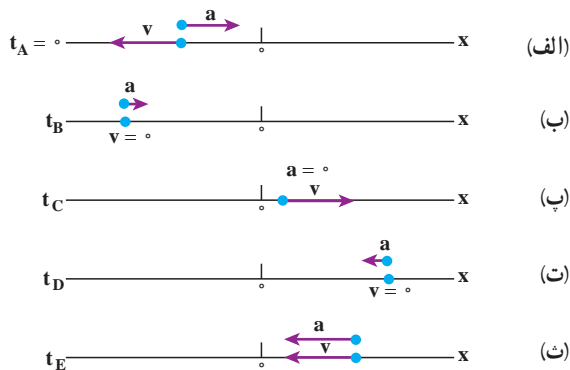
در فعالیت ۱-۱ ملاحظه می کنید که وقتی $a_x v_x > 0$ باشد حرکت تندشونده و وقتی $a_x v_x < 0$ باشد، حرکت کندشونده است.



شکل ۱۶-۱

شکل ۱۶-۱ نمودار سرعت - زمان متحرکی است که در راستای محور x حرکت می‌کند. درباره علامت‌های شتاب و سرعت متحرک و تندشونده یا کندشونده بودن حرکت اظهار نظر کنید.

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



شکل ۱۷-۱

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

$v > 0$ است. در (ت) $v = 0$, $a < 0$ متحرک به طور لحظه‌ای ساکن و در آستانه حرکت در جهت $-x$ است. در (ث) $v < 0$, $a < 0$ و در نتیجه $av > 0$ و حرکت تندشونده است.

مثال ۱۱-۱

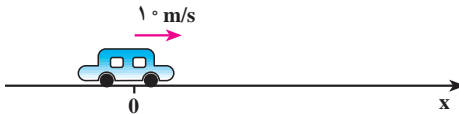
خودرویی با سرعت 10 m/s در حال حرکت است. راننده ترمز می‌کند و سرعت خودرو با شتاب 2 m/s^2 کاهش می‌یابد. الف) چه زمانی طول می‌کشد تا خودرو متوقف شود؟ ب) در این بازه زمانی خودرو چه مسافتی را می‌پیماید؟

پاسخ

الف) در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که در حرکت با شتاب ثابت معادله سرعت به صورت زیر است:

$$v_x = a_x t + v_{0x} \quad (11-1)$$

که در آن a_x شتاب (ثابت) جسم و v_{0x} سرعت جسم در لحظه $t = 0$ است. در شکل ۱۸-۱ حرکت خودرو را در جهت محور x در نظر گرفته‌ایم.



شکل ۱۸-۱

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

$$v_x = -2t + 10$$

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

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

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

$$\Delta x = \frac{1}{2} a_x t^2 + v_{0x} t \quad (12-1)$$

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

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

$$v_x^2 - v_{0x}^2 = 2a_x(x - x_0) \quad (13-1)$$

$$0 - (10)^2 = 2(-2)(\Delta x) \Rightarrow \Delta x = 25 \text{ m}$$

سقوط آزاد

سقوط آزاد نمونه‌ای طبیعی از حرکت یک بُعدی با شتاب ثابت است. اگر جسمی را در امتداد قائم رو به بالا یا رو به پایین پرتاب کنید، در صورتی 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 همه اجسام یکسان و بزرگی آن در نزدیکی سطح زمین تقریباً برابر 9.8 m/s^2 است. شکل ۱۹-۱ نشان می‌دهد که پر و یک سیب در شرایط خلأ نسبی با شتاب یکسانی سقوط می‌کنند.

شکل ۱۹-۱- یک پر و یک سیب در شرایط خلأ نسبی با شتاب یکسانی سقوط می‌کنند. این شتاب، فاصله میان عکس‌های متوالی را افزایش داده است.

همان‌طور که 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 به کار می‌آیند. یعنی کافی است حرکت را به جای محور x در راستای محور قائم (y) در نظر بگیریم، به طوری 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 $a = -g = -9.8 \text{ m/s}^2$ 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 به دست آیند:

$$v = -gt + v_0 \quad (14-1)$$

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0t + y_0 \quad (15-1)$$

$$v^2 - v_0^2 = -2g(y - y_0) \quad (16-1)$$

همان طور که گفتیم شتاب همواره منفی و رو به پایین است، ولی سرعت می تواند مثبت یا منفی باشد. در حین بالا رفتن، سرعت مثبت است ولی این سرعت مثبت کاهش می یابد تا اینکه به طور لحظه ای صفر شود. در حین پایین آمدن، سرعت منفی است ولی بزرگی آن افزایش می یابد.

مثال ۱۲-۱

سنگی را از بالای ساختمان بلندی به ارتفاع ۴۵ m رها می کنیم، الف) سنگ پس از چه زمانی به زمین می رسد؟ ب) سرعت آن، هنگام رسیدن به زمین چقدر است؟
($g = 10 \text{ m/s}^2$)

پاسخ

الف) برای بررسی حرکت سقوط آزاد اجسام، محور y را در راستای قائم و رو به بالا و مبدأ آن را نقطه رها کردن جسم در نظر می گیریم. در این صورت، معادله حرکت با شتاب ثابت ۱-۱۵ به صورت زیر به دست می آید:

$$y = -\frac{1}{2}gt^2$$

$$-45 = -\frac{1}{2}(10)t^2 \Rightarrow t = 3 \text{ s}$$

ب) با استفاده از معادله سرعت ۱-۱۱ داریم:

$$v = -gt$$

$$v = -10 \times 3 = -30 \text{ m/s}$$

فعالیت ۲-۱



شکل ۱-۲۰

از دوست خود بخواهید، مطابق شکل ۱-۲۰، خط کش مدرج بلندی را بین انگشتان شما نگه دارد و در یک لحظه آن را رها کند. چگونه می توانید زمان واکنش خود را (یعنی زمانی که طول می کشد تا پس از مشاهده رها شدن خط کش، آن را بگیرید) اندازه گیری کنید؟

سنگی را با سرعت 20 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 نقطه پرتاب برگردد؟ (ت) سرعت سنگ در این نقطه چقدر است؟ ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

پاسخ

(الف) محور y را روبه بالا و مبدأ آن را در نقطه پرتاب فرض می‌کنیم. در نتیجه، در لحظه پرتاب داریم $v_{y0} = +20 \text{ m/s}$ و $y_0 = 0$. در شروع حرکت، جسم در جهت محور y حرکت می‌کند، با استفاده از رابطه‌های ۱-۱۵ و ۱-۱۴ داریم:

$$y = -5t^2 + 20t$$

$$v_y = -10t + 20$$

در بالاترین نقطه، $v_y = 0 \text{ m/s}$ ، در نتیجه:

$$0 = -10t + 20 \Rightarrow t = 2 \text{ s}$$

$$t = 2 \text{ s}$$

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

$$y = -5(2)^2 + 20(2) = 20 \text{ m}$$

(پ) در بازگشت سنگ به نقطه پرتاب، داریم $y = 0$ ، در نتیجه:

$$-5t^2 + 20t = 0$$

$$t(-5t + 20) = 0 \quad \text{و یا}$$

جواب‌های این معادله $t = 0$ و $t = 4 \text{ s}$ است. $t = 0$ مربوط به لحظه پرتاب است

و $t = 4 \text{ s}$ زمانی است که طول می‌کشد تا سنگ به نقطه پرتاب برگردد.

(ت) سرعت متحرک در این لحظه از معادله سرعت به دست می‌آید:

$$v_y = -10(4) + 20 = -20 \text{ m/s}$$

علامت منفی نشان می‌دهد که در هنگام بازگشت سنگ به نقطه 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 ۱۴-۱

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، معادله حرکت سنگ به صورت زیر است:

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

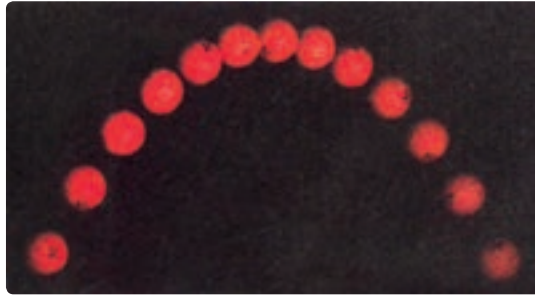
در پایین ساختمان $y = -50\text{ m}$ ، در نتیجه:

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

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

۱-۲- حرکت در دو بُعد یا حرکت در صفحه

در بخش ۱-۱ حرکت در یک بُعد را مرور کردیم. در این بخش به بررسی حرکت در صفحه که آن را حرکت دو بُعدی نیز می‌نامیم، می‌پردازیم. حرکت گلوله تویی 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 ۱-۲۱- مسیر توپ گلف

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

زیر نوشت :

$$\vec{r} = x \vec{i} + y \vec{j} \quad (17-1)$$

که در آن \vec{i} و \vec{j} به ترتیب بردارهای یکه 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 :

$$x = f(t) \text{ و } y = g(t) \quad (18-1)$$

رابطه‌های ۱-۱۸ معادله‌های حرکت یک جسم را در دو بُعد نشان می‌دهند. واضح است که

در حرکت دو بعدی، بردار مکان نیز تابعی از زمان است :

$$\vec{r} = f(t) \vec{i} + g(t) \vec{j} \quad (19-1)$$

جابه‌جایی و سرعت متوسط : برای بررسی حرکت جسم روی مسیری مطابق شکل ۱-۲۲،

فرض کنید متحرکی در لحظه t_1 در نقطه A (مکان r_1) و در لحظه t_2 در نقطه B (مکان r_2) باشد. برداری

که از A به B رسم می‌شود جابه‌جایی (تغییر مکان) جسم را در بازه زمانی $\Delta t = t_2 - t_1$ نمایش می‌دهد.

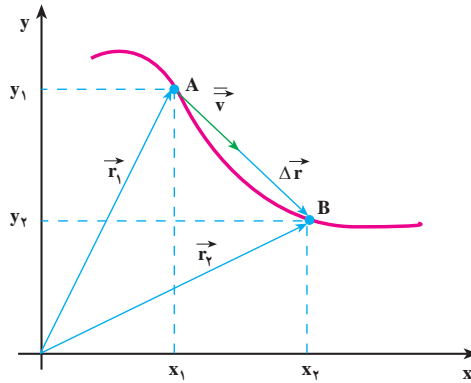
این بردار که در شکل ۱-۲۲ رسم شده است از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 \quad (20-1)$$

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

$$\Delta \vec{r} = (\Delta x) \vec{i} + (\Delta y) \vec{j} \quad (21-1)$$

در رابطه ۲۱-۱، $\Delta x = x_2 - x_1$ و $\Delta y = y_2 - y_1$ است.



شکل ۱-۲۲- بردار سرعت متوسط و بردار تغییر مکان هم جهت اند.

سرعت متوسط جسم در یک بازه زمانی معین، همانند حالت یک بعدی، به صورت زیر تعریف

می شود :

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad (22-1)$$

با استفاده از رابطه ۲۱-۱ داریم :

$$\vec{v} = \left(\frac{\Delta x}{\Delta t} \right) \vec{i} + \left(\frac{\Delta y}{\Delta t} \right) \vec{j} \quad (23-1)$$

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 :

$$\vec{v} = (\bar{v}_x) \vec{i} + (\bar{v}_y) \vec{j} \quad (24-1)$$

پرسش ۱-۱

رابطه ۲۲-۱ نشان می دهد که سرعت متوسط، کمیتی برداری است و \vec{v} با $\Delta \vec{r}$

هم جهت است؛ چرا؟

معادله‌های حرکت جسمی در دو بُعد، در SI به صورت زیر است :

$$x = 2t \text{ و } y = -t^2 + 4t$$

الف) بردار مکان جسم را در لحظه‌های $t_1 = 1\text{ s}$ و $t_2 = 2\text{ s}$ به دست آورید.

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

پاسخ

الف) در $t_1 = 1\text{ s}$:

$$x_1 = 2\text{ m و } y_1 = +3\text{ m}$$

$$\vec{r}_1 = 2\vec{i} + 3\vec{j}$$

$$x_2 = 4\text{ m و } y_2 = 4\text{ m}$$

به همین ترتیب در $t_2 = 2\text{ s}$:

$$\vec{r}_2 = 4\vec{i} + 4\vec{j}$$

ب) در بازه زمانی ۱ تا ۲ ثانیه :

$$\Delta x = x_2 - x_1 = 4 - 2 = 2\text{ m}$$

$$\Delta y = y_2 - y_1 = 4 - 3 = 1\text{ m}$$

$$\bar{v}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{2}{1} = 2\text{ m/s}$$

$$\bar{v}_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{1}{1} = 1\text{ m/s}$$

$$\vec{v} = 2\vec{i} + \vec{j}$$

و در نتیجه

$$(\bar{v})^2 = (\bar{v}_x)^2 + (\bar{v}_y)^2 = 2^2 + 1^2 = 5$$

$$\bar{v} = \sqrt{5} \approx 2.23\text{ m/s}$$

سرعت لحظه‌ای : در شکل ۱-۲۳ نمودار حرکت جسمی روی یک مسیر خمیده در صفحه

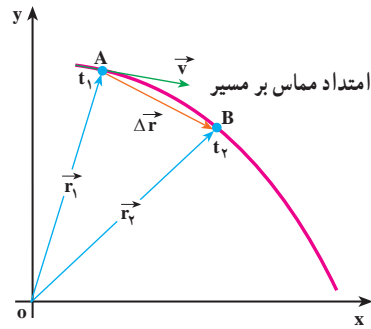
xoy نشان داده شده است. مکان جسم در دو لحظه t_1 و t_2 مشخص شده است. پیش‌تر گفتیم که بردار

سرعت متوسط در یک بازه زمانی معین، با بردار جابه‌جایی مربوط به آن، هم‌جهت است. همچنین

می‌دانید هنگامی که بازه زمانی Δt ، کوچک و کوچک‌تر شود، سرعت متوسط به سرعت لحظه‌ای

نزدیک و نزدیک تر می شود؛ یعنی، بردار سرعت لحظه‌ای حد بردار سرعت متوسط است وقتی Δt به سمت صفر، میل می کند:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\vec{v}) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad (25-1)$$



شکل ۱-۲۳- سرعت لحظه‌ای در امتداد مماس بر مسیر حرکت است.

به عبارت دیگر می توان گفت که «سرعت لحظه‌ای، مشتق بردار مکان جسم، نسبت به زمان

است»:

$$\vec{v} = \frac{d \vec{r}}{dt} \quad (26-1)$$

در حدی که Δt به سمت صفر میل کند، با استفاده از رابطه ۱-۲۱ می توان سرعت لحظه‌ای جسم را برحسب مؤلفه‌های آن در دو امتداد x و y به دست آورد:

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

$$\vec{v} = (v_x) \vec{i} + (v_y) \vec{j} \quad (27-1)$$

در شکل ۱-۲۳ می بینید که وقتی t_2 به سمت t_1 میل کند، راستای بردار جابه جایی $\Delta \vec{r}$ ، به سمت راستای مماس بر منحنی مسیر، در نقطه A میل خواهد کرد. بنابراین، چون بردار سرعت متوسط همواره هم جهت با جابه جایی است، در حدی که Δt به سمت صفر میل می کند، بردار سرعت لحظه‌ای بر مسیر حرکت در نقطه A مماس خواهد شد. بدین ترتیب می توان گفت هنگامی که جسم روی یک مسیر خمیده حرکت می کند، جهت بردار سرعت آن که همواره بر مسیر حرکت مماس است، در هر لحظه تغییر می کند. از این پس، برای اختصار، بردار سرعت لحظه‌ای را سرعت می نامیم.

خودرویی در یک صفحه افقی که آن را در اینجا صفحه xOy می‌نامیم، حرکت می‌کند. معادله‌های حرکت آن در SI به صورت زیر است:

$$x = 6t + 5 \text{ و } y = 4t^2$$

بزرگی سرعت خودرو را در $t = 1 \text{ s}$ به دست آورید.

پاسخ

با استفاده از رابطه ۱-۲۷ مؤلفه‌های سرعت به دست می‌آید:

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

ملاحظه می‌شود که مؤلفه افقی سرعت مقدار ثابتی دارد و تابع زمان نیست. به همین ترتیب برای مؤلفه قائم سرعت داریم:

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

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

$$v_y = 8 \text{ m/s}$$

پس بزرگی سرعت در $t = 1 \text{ s}$ برابر است با:

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

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 بزرگی سرعت، تغییر در جهت 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. حتی اگر بزرگی سرعت هم تغییر نکند.

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

در شکل ۱-۲۴ الف بردارهای سرعت در دو لحظه t_1 و t_2 روی مسیر نشان داده شده است. برای محاسبه تغییر سرعت در بازه زمانی $\Delta t = t_2 - t_1$ بردارهای مساوی با \vec{v}_1 و \vec{v}_2 را مطابق شکل ۱-۲۴ ب از مبدأ مشترک O رسم می کنیم و $\Delta \vec{v}$ را به دست می آوریم. در اینجا نیز، مشابه حرکت یک بعدی، بردار شتاب متوسط را در بازه زمانی Δt به صورت زیر تعریف می کنیم:

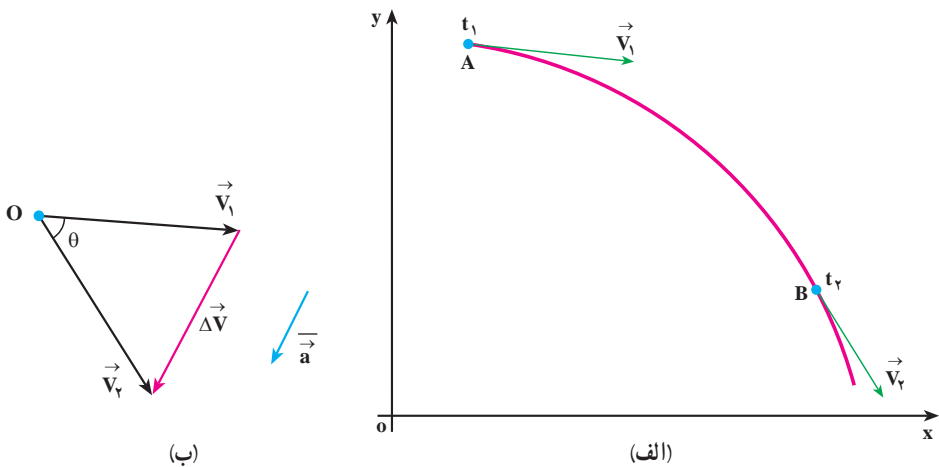
$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (1-28)$$

با استفاده از رابطه ۱-۲۷ داریم:

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

که آن را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\vec{a} = (\bar{a}_x) \vec{i} + (\bar{a}_y) \vec{j} \quad (1-29)$$



شکل ۱-۲۴ بردار شتاب متوسط با $\Delta \vec{v}$ هم جهت است.

شتاب لحظه ای در لحظه t_1 را نیز می توان به صورت حد شتاب متوسط، هنگامی که Δt به سمت صفر میل می کند، تعریف کرد؛ یعنی:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (30-1)$$

با توجه به مفهوم مشتق، رابطه ۱-۳۰ به صورت زیر نوشته می شود:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (31-1)$$

$$\vec{a} = \frac{d^2(\vec{r})}{dt^2} \quad (32-1)$$

به کمک رابطه ۱-۲۹ می توانیم بنویسیم:

$$\vec{a} = \left(\frac{dv_x}{dt}\right) \vec{i} + \left(\frac{dv_y}{dt}\right) \vec{j} \quad (33-1)$$

که در آن $\frac{dv_y}{dt} = a_y$ و $\frac{dv_x}{dt} = a_x$ مؤلفه های شتاب لحظه ای هستند.

در نتیجه می توان نوشت:

$$\vec{a} = (a_x) \vec{i} + (a_y) \vec{j} \quad (34-1)$$

رابطه ۱-۲۸ نشان می دهد که \vec{a} و $\Delta \vec{v}$ هم جهت اند، ولی همان طور که در شکل ۱-۲۴ ب نشان داده شده است، در حرکت روی مسیر خمیده، معمولاً بردار شتاب متوسط \vec{a} ، با بردارهای سرعت، (\vec{v}_1 یا \vec{v}_2) هم جهت نیست؛ درحالی هم که Δt به سمت صفر میل می کند و بردار \vec{v}_2 به بردار \vec{v}_1 بسیار نزدیک می شود، شتاب لحظه ای با سرعت لحظه ای نیز معمولاً هم جهت نخواهد بود، ولی به کمک رابطه ۱-۳۳ و با داشتن معادله سرعت، جهت بردار شتاب لحظه ای را که از این پس آن را به اختصار شتاب خواهیم نامید، می توان به دست آورد.

مثال ۱-۱۷

معادله حرکت دو بعدی جسمی در SI به صورت زیر است:

$$\begin{cases} x = 2.0t^2 \\ y = -5t^3 \end{cases}$$

بردارهای سرعت و شتاب این جسم را در لحظه $t = 1$ s به دست آورید. آیا این

دو بردار هم جهت اند؟

پاسخ

برای تعیین بردار سرعت، ابتدا مؤلفه‌های v_x و v_y را در $t = 1$ s به دست

$$v_x = \frac{dx}{dt} = 4 \cdot t \Rightarrow v_x = 4 \text{ m/s} \quad \text{می‌آوریم:}$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = -15t^2 \Rightarrow v_y = -15 \text{ m/s}$$

بنابراین بردار سرعت لحظه‌ای در $t = 1$ s چنین خواهد بود:

$$\vec{v} = 4 \cdot \vec{i} - 15 \cdot \vec{j}$$

برای تعیین بردار شتاب نیز ابتدا مؤلفه‌های شتاب، یعنی a_x و a_y ، را به دست

می‌آوریم. مؤلفه افقی شتاب، ثابت است:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = 4 \text{ m/s}^2$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = -30t$$

a_y تابع زمان است و در $t = 1$ s برابر است با:

$$a_y = -30 \text{ m/s}^2$$

با توجه به مقدارهای a_x و a_y در لحظه فوق، بردار شتاب در $t = 1$ s نیز نوشته

می‌شود:

$$\vec{a} = 4 \cdot \vec{i} - 30 \cdot \vec{j}$$

زاویه‌ای که بردارهای سرعت و شتاب در لحظه $t = 1$ s با محور افقی می‌سازند

به ترتیب برابرند با:

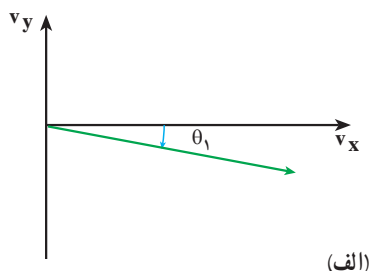
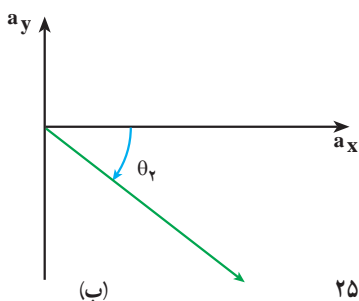
$$\tan \theta_1 = \frac{v_y}{v_x} = \frac{-15}{4}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{-3}{8} \approx -7^\circ$$

$$\tan \theta_2 = \frac{a_y}{a_x} = -\frac{30}{4}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{-3}{4} \approx -37^\circ$$

با مقایسه زاویه‌های θ_1 و θ_2 در شکل ۱-۲۵ می‌توان نتیجه گرفت که بردارهای سرعت و شتاب در این لحظه هم جهت نیستند.



شکل ۱-۲۵

تمرین‌های فصل اول

۱- معادله حرکت جسمی در SI به صورت $x = t^2 - 3t^3$ است. مطلوب است:

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

(ب) بزرگی سرعت متحرک در لحظه $t = 4$ s

۲- جسمی با سرعت ثابت بر روی محور x حرکت می‌کند. جسم در لحظه $t = 2$ s در مبدأ

مختصات و ۲ ثانیه بعد در $x = -6$ m است.

(الف) معادله حرکت جسم را بنویسید.

(ب) مکان جسم را در لحظه $t = 3$ s به دست

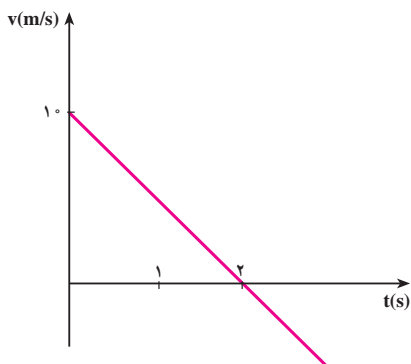
آورید.

۳- نمودار سرعت - زمان متحرکی در

شکل ۱-۲۶ داده شده است. اگر متحرک در

لحظه $t = 0$ s، در $x = 2$ m باشد، معادله حرکت آن

را به دست آورید.



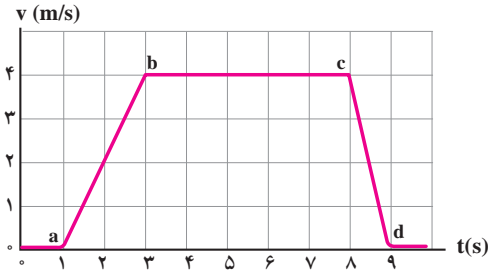
شکل ۱-۲۶

۴- معادله حرکت متحرکی که بر روی خط راست حرکت می‌کند، در SI به صورت: $x = 2t^2 + 4t$

است.

(الف) شتاب متوسط متحرک در بازه زمانی ۱ تا ۲ ثانیه

(ب) شتاب متحرک در لحظه $t = 3$ s را به دست آورید.



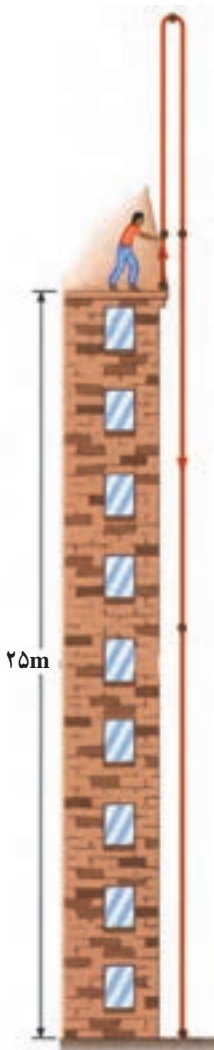
شکل ۱-۲۷

۵- نمودار سرعت- زمان آسانسوری مطابق شکل ۱-۲۷ است. نمودار شتاب- زمان آن چگونه می شود و در مورد کندشونده یا تندشونده بودن حرکت اظهار نظر کنید.

۶- خودرویی در پشت چراغ قرمز ایستاده است. با سبز شدن چراغ، خودرو با شتاب 2 m/s^2 شروع به حرکت می کند. در همین لحظه کامیونی با سرعت ثابت 36 km/h از کنار آن می گذرد. الف) نمودارهای مکان- زمان و سرعت- زمان را برای خودرو و کامیون رسم کنید.

ب) پس از چه مدتی، خودرو به کامیون می رسد؟

۷- در شکل ۱-۲۸ تویی در راستای قائم به طرف بالا پرتاب می شود. توپ پس از ۴ ثانیه به محل پرتاب برمی گردد. توپ الف) با چه سرعتی پرتاب شده است؟ ب) تا چه ارتفاعی بالا می رود؟ پ) با چه سرعتی به زمین می رسد؟ ت) بعد از چند ثانیه به زمین می رسد؟ ($g = 10 \text{ m/s}^2$)



شکل ۱-۲۸

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

۹- کانگورو می تواند از مانعی به ارتفاع $2/5$ 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.

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

۱۱- معادله حرکت جسمی با دو رابطه زیر، در SI داده شده است:

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

الف) معادله 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 یکگه \vec{i} و \vec{j} بنویسید.

دینامیک



فصل

دینامیک

نگاهی به فصل: قانون‌های نیوتون از جمله 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 دوبعدی، بررسی می‌کنیم.

۱-۲-۱ 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 برآیند وارد بر جسم برابر است با حاصل ضرب جرم جسم در شتاب آن» به عبارت دیگر شتاب یک جسم در همان جهت نیروی برآیند وارد بر آن است و با نیروی برآیند تقسیم بر جرم جسم برابر است؛ یعنی:

$$\vec{F} = m \vec{a}$$
$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (1-2)$$

توجه کنید در رابطه بالا \vec{F} برآیند نیروهای وارد بر جسم است.

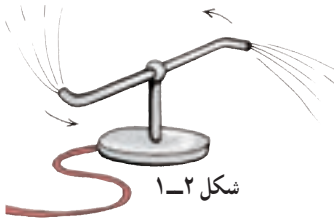
قانون سوم نیوتون: «هرگاه جسمی به جسم دیگر نیرو وارد کند، جسم دوم هم به جسم اول نیرویی هم‌اندازه، هم راستا و در خلاف سوی آن وارد می‌کند.»

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

تمرین ۱-۲

- با مراجعه به آنچه در فیزیک (۲) و آزمایشگاه خوانده‌اید، جمله‌های زیر را کامل کنید :
- ۱- تغییر بردار سرعت در اثر است.
 - ۲- اگر در اثر اعمال نیرو، جسم ساکنی به حرکت درآید، در شروع حرکت بردارهای سرعت و هم جهت‌اند.
 - ۳- در مسیر خمیده بردارهای سرعت و نیرو.....
 - ۴- اگر جسمی بر روی خط راستی در حرکت باشد و بر آن نیرویی هم‌راستا و هم‌سو با سرعت حرکت آن وارد شود، حرکت جسم..... خواهد شد.
 - ۵- در صورتی که جسمی بر روی خط راستی در حرکت باشد و بر آن نیرویی در خلاف جهت سرعت اعمال شود حرکت جسم خواهد شد.

تمرین ۲-۲



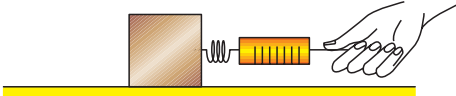
- توضیح دهید چرا هنگامی که :
- ۱- با پا به دیواری ضربه می‌زنید پای شما درد می‌گیرد؟
 - ۲- قایق‌ران پارو می‌زند، قایق در آب حرکت می‌کند؟
 - ۳- چمدان را از زمین بلند می‌کنید، دست شما به طرف پایین کشیده می‌شود؟
 - ۴- در شکل ۱-۲ آب از فواره خارج می‌شود، فواره می‌چرخد؟

فعالیت ۱-۲



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

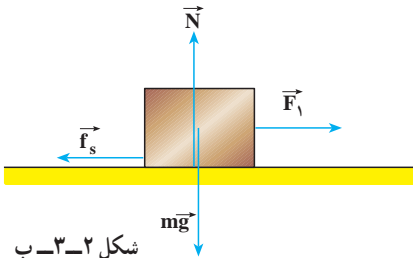
شکل ۲-۲



شکل ۲-۳-الف

صندوقی به جرم 10 kg روی یک سطح افقی با ضریب اصطکاک ایستایی $0/4$ و ضریب اصطکاک جنبشی $0/2$ قرار دارد.

مطابق شکل ۲-۳-الف نیروسنج را به صندوق وصل می‌کنیم و آن را می‌کشیم: (الف) نخست با نیرویی برابر با 20 N صندوق را می‌کشیم. آیا صندوق شروع به حرکت می‌کند؟ در این حالت نیروی اصطکاک بین صندوق و سطح چه مقدار است؟ (ب) نیروی وارد بر صندوق را به 60 N می‌رسانیم، در این حالت نیروی اصطکاک چه مقدار است؟ شتاب حرکت صندوق را در این حالت حساب کنید.



شکل ۲-۳-ب

پاسخ

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

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

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

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

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

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

$$f_k = 0/2 \times 100 = 20\text{ N}$$

برای محاسبه شتاب حرکت، قانون دوم نیوتون را می‌نویسیم:

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

۲-۲- چگونگی استفاده از قانون های نیوتون در حرکت یک جسم

در فیزیک (۲) و آزمایشگاه دیدیم که برای حل مسئله های دینامیک یک بعدی چه نکاتی را باید در نظر بگیریم. اکنون برای حل مسئله های دینامیک دوبعدی این نکات را یادآوری و تکمیل می کنیم:

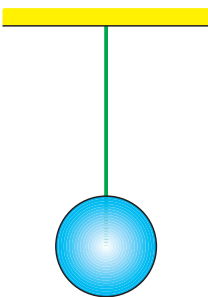
- ۱- شکل ساده ای از جسم و تکیه گاه آن را رسم می کنیم.
- ۲- نیروهایی را که اجسام دیگر بر جسم وارد می کنند، روی شکل مشخص می کنیم.
- ۳- دستگاه محورهای مختصات مناسب انتخاب می کنیم. (ضمن حل مسئله، با نحوه انتخاب دستگاه مختصات مناسب آشنا خواهیم شد.)
- ۴- نیروها را روی محورهای مختصات تجزیه می کنیم؛ یعنی، مؤلفه های هر نیرو را روی محورها تعیین می کنیم.

۵- با نوشتن قانون دوم نیوتون روی هر یک از محورها، شتاب حرکت جسم را روی هر محور محاسبه می کنیم. به عبارت دیگر، مؤلفه های نیرو را روی هر محور به طور جداگانه، به صورت $F_x = ma_x$ و $F_y = ma_y$ می نویسیم.

۶- هرگاه چند جسم به هم متصل باشند، در صورتی که بردار شتاب حرکت همگی یکسان باشد، مجموعه را می توانیم به عنوان یک دستگاه (با جرمی برابر مجموع جرم ها) در نظر بگیریم و قانون دوم را برای آن بنویسیم.

نحوه استفاده از قانون های نیوتون در مثال هایی که در ادامه می آید، نشان داده شده است.

مثال ۲-۲

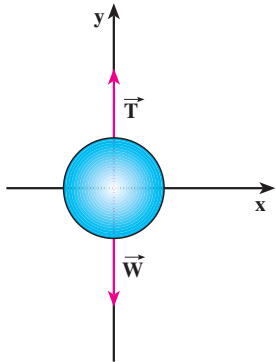


شکل ۲-۴- الف

جسمی به جرم $m = 12 \text{ kg}$ را با طنابی که جرم آن ناچیز است مطابق شکل ۲-۴- الف می آویزیم. نیروهای وارد بر جسم را تعیین کنید و مقدار هر یک را به دست آورید.

پاسخ

نیروهای وارد بر جسم عبارت اند از:
نیروی وزن، که از طرف زمین بر جسم وارد می شود و نیرویی که از طرف طناب به جسم وارد می شود. چون جسم ساکن است، باید برآیند نیروهای وارد بر آن صفر باشد. در نتیجه باید از طرف طناب،



شکل ۲-۴ ب

نیروی 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.

نیروهای وارد بر جسم، در راستای محور y هستند و در شکل ۲-۴ ب نشان داده شده‌اند. بنابر قانون دوم نیوتون داریم:

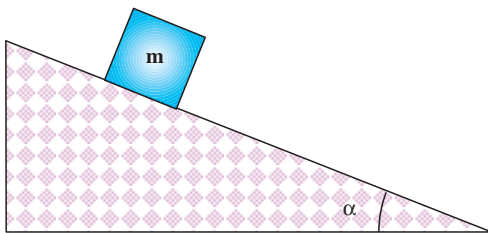
$$T - mg = ma$$

چون $a = 0$ ، داریم:

$$T = mg = 12 \times 10 = 120 \text{ N}$$

در هر نقطه از طناب کشیده شده، نیرویی از طرف یک بخش بر بخش دیگر وارد می‌شود. نیروی کشش طناب در هر نقطه برابر نیرویی است که در صورت پاره شدن طناب در آن نقطه، باید وارد کنیم تا وضعیت اولیه 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 ۲-۳



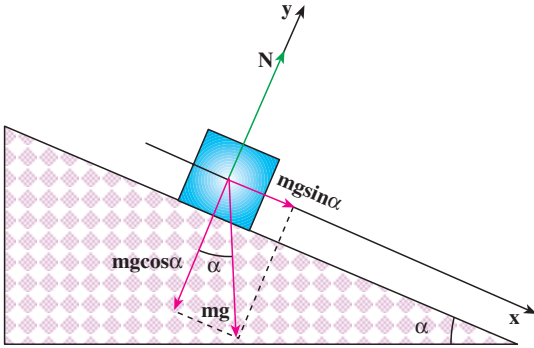
شکل ۲-۵ الف

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

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



شکل ۲-۵-ب

مؤلفه‌های وزن روی محورهای x و y به ترتیب عبارت‌اند از:

$$mg \cos \alpha \text{ و } mg \sin \alpha$$

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 در نتیجه:

$$N = mg \cos \alpha$$

ب) نمودار نیروهای وارد بر

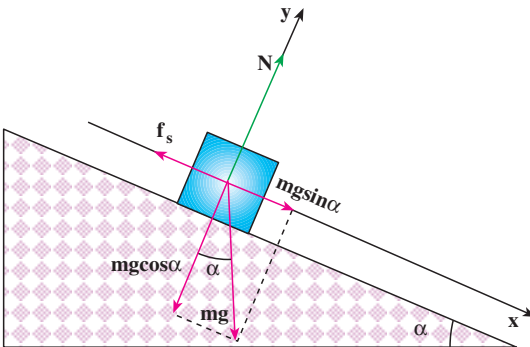
جسم در شکل ۲-۶ نشان داده شده است؛ چون جسم ساکن است، برآیند نیروهای وارد بر آن صفر است:

$$F_x = 0$$

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

و از آنجا داریم:

$$f_s = mg \sin \alpha$$



شکل ۲-۶

۲-۳- تکانه (اندازه حرکت)



شکل ۲-۲

در شکل ۲-۷ یک خودروی سواری و یک کامیون مجاور هم با سرعت یکسان در حرکت اند. با نزدیک شدن به چراغ قرمز خودرو و کامیون باید پس از طی مسافت 50 m متوقف شوند. به نظر شما نیروی لازم برای

متوقف کردن کدام یک از آنها با شتاب ثابت بیشتر است؟ برای بررسی دقیق تر، فرض کنید جرم کامیون 10 تن و جرم خودروی سواری 1 تن باشد و هر کدام با سرعت 20 m/s در حرکت باشند. شتاب حرکت کندشونده برای کامیون و خودروی سواری، در این جابه جایی برابر است با:

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

نیروی لازم برای توقف کامیون برابر است با:

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

و نیروی لازم برای توقف خودروی سواری برابر است با:

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

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

فعالیت ۲-۲

فرض کنید در مثال بالا، جرم خودرو و کامیون یکسان، ولی سرعت یکی 20 m/s و دیگری 15 m/s باشد. نیروی لازم برای متوقف کردن هر کدام از آنها را محاسبه و با هم مقایسه کنید. نتیجه های این فعالیت و مثال قبل را در گروه خود، تجزیه و تحلیل و به کلاس گزارش کنید.

در مثال های بالا دیدیم که نیروی لازم برای متوقف کردن خودروها به جرم و سرعت آنها بستگی دارد. در فیزیک کمیتی به نام تکانه (اندازه حرکت) تعریف می شود که به هر دو کمیت جرم و سرعت بستگی دارد. «تکانه یک جسم، حاصل ضرب جرم جسم در سرعت آن است.»

تکانه را با \vec{P} نمایش می دهند و یکای آن کیلوگرم متر بر ثانیه (kgm/s) است. بنابراین می توان

نوشت :

$$\vec{P} = m \vec{v} \quad (2-2)$$

تکانه، کمیتی برداری است؛ چرا؟

رابطه بین نیرو و تکانه : با به کارگیری قانون دوم نیوتون، به سادگی رابطه نیرو و تکانه به دست

می آید؛ با استفاده از رابطه ۱-۲ داریم :

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

چون جرم جسم، مقداری ثابت است، می توان نوشت :

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

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt}$$

(۳-۲)

یعنی آهنگ تغییر تکانه یک جسم نسبت به زمان برابر برآیند نیروهای وارد بر جسم

است. به بیان دیگر، برآیند نیروهای وارد بر جسم، مشتق تکانه آن نسبت به زمان است.

اگر در بازه زمانی Δt تغییر تکانه یک جسم $\Delta \vec{P}$ باشد، نیروی متوسط وارد بر آن از رابطه زیر

به دست می آید :

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t}$$

(۴-۲)

مثال ۱۴-۲



شکل ۸-۲

چکشی به جرم ۱/۵kg را با سرعت ۱۰ m/s

به سر میخی می کوبیم (شکل ۸-۲). اگر زمان برخورد

چکش با سر میخ ۵/۰۰۰ s باشد، بزرگی نیروی متوسطی

که به چکش وارد می شود، چه مقدار است؟

پاسخ

$$\vec{F} = \frac{\Delta P}{\Delta t} = m \left(\frac{v - v_0}{\Delta t} \right)$$

$$|\vec{F}| = \left| 1/5 \left(\frac{0 - 10}{0.005} \right) \right| = 3000 \text{ N}$$

دو خودروی A و B دارای مشخصات فنی متفاوت اند. جرم خودروی A برابر 1000 kg و جرم خودروی B برابر 800 kg است. سرعت خودروی A حداقل پس از $11/7 \text{ s}$ از صفر به 96 km/h می‌رسد، ولی سرعت خودروی B حداقل پس از $12/8 \text{ s}$ ، همین مقدار افزایش پیدا می‌کند. حداکثر برابند نیروهای وارد بر هر کدام از خودروهای A و B را حساب کنید.

نقش کیسه هوا در تصادف‌های رانندگی

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

جاسازی کیسه 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 کیسه پلاستیکی تولید



شکل ۹-۲

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

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

فعالیت ۲-۳

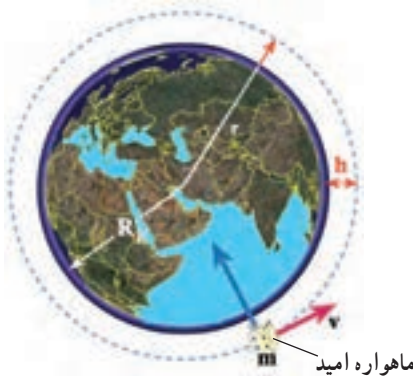
در یک مسابقه‌ پرش با نیزه، ورزشکاری از مانع پرش با ارتفاع ۶m بدون خطا عبور می‌کند.
نقش تشک را در جلوگیری از آسیب رسیدن به ورزشکار مورد بحث و بررسی قرار دهید.



شکل ۲-۱۰

۴-۲- حرکت دایره‌ای

حرکت یک جسم در مسیر دایره‌ای، نمونه 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 لباس شویی، آب میوه‌گیری و... اجسام درون آنها در مسیر دایره‌ای حرکت می‌کنند. در تصویرهای زیر نمونه‌هایی از حرکت اجسام بر مسیر دایره‌ای را مشاهده می‌کنید.



شکل ۲-۱۱-ب- طرحی از چرخش ماهواره امید به دور زمین



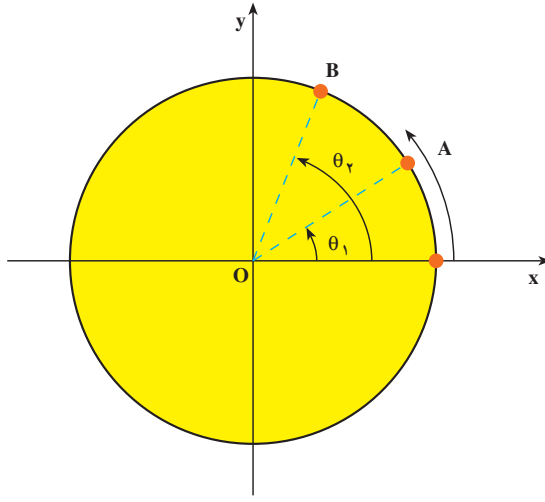
شکل ۲-۱۱-الف- تصویری از یک قطار هوایی در پارک تفریحی



شکل ۲-۱۱-پ- 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 ۲-۱۲). در این جا منظور از ذره، جسم کوچکی است که ابعاد آن در برابر شعاع دایره ناچیز باشد. مکان ذره را روی دایره در هر لحظه می‌توان با زاویه θ نسبت



شکل ۲-۱۲

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

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (2-5)$$

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

مثال ۲-۵

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

پاسخ

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

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{2\pi}{365 \times 24 \times 3600} = \frac{2\pi}{31536000} \approx 2 \times 10^{-7} \text{ (rad/s)}$$

سرعت زاویه‌ای لحظه‌ای: سرعت زاویه‌ای لحظه‌ای را، مانند آنچه در مورد تعریف سرعت

لحظه‌ای در فصل ۱ دیدیم، چنین تعریف می‌کنیم:

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

و یا

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2-6)$$

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

تمرین ۲-۴

مکان زاویه‌ای ذره‌ای که روی مسیر دایره‌ای حرکت می‌کند، با رابطه $\theta = 2t^2 + 6t$ بیان شده است. (t بر حسب ثانیه و θ بر حسب رادیان)

(الف) سرعت زاویه‌ای متوسط ذره را بین لحظه‌های $t_1 = 1s$ و $t_2 = 2s$ و

(ب) سرعت زاویه‌ای آن را در لحظه $t_3 = 3s$ حساب کنید.

۲-۵ - حرکت دایره‌ای یکنواخت

هرگاه اندازه سرعت زاویه‌ای ذره‌ای که بر روی مسیر دایره‌ای در حرکت ثابت بماند، می‌گوییم

ذره، حرکت دایره‌ای یکنواخت دارد. در چنین حرکتی، سرعت زاویه‌ای متوسط در هر بازه زمانی با

سرعت زاویه‌ای لحظه‌ای ذره برابر است.

$$\bar{\omega} = \omega = \frac{\theta - \theta_0}{t - t_0}$$

و یا

$$\theta = \omega t + \theta_0 \quad (2-7)$$

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

دوره: زمانی که طول می‌کشد تا ذره 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 ذره را در یک ثانیه بسامد (فرکانس) می‌گویند. بسامد را با f نمایش

می‌دهند. یکای بسامد $\frac{1}{s}$ یا هرتز (Hz) است.

روشن است که :

$$T = \frac{1}{f} \quad (۸-۲)$$

چون ذره در هر دور، 2π رادیان طی می کند، سرعت زاویه ای آن برابر است با :

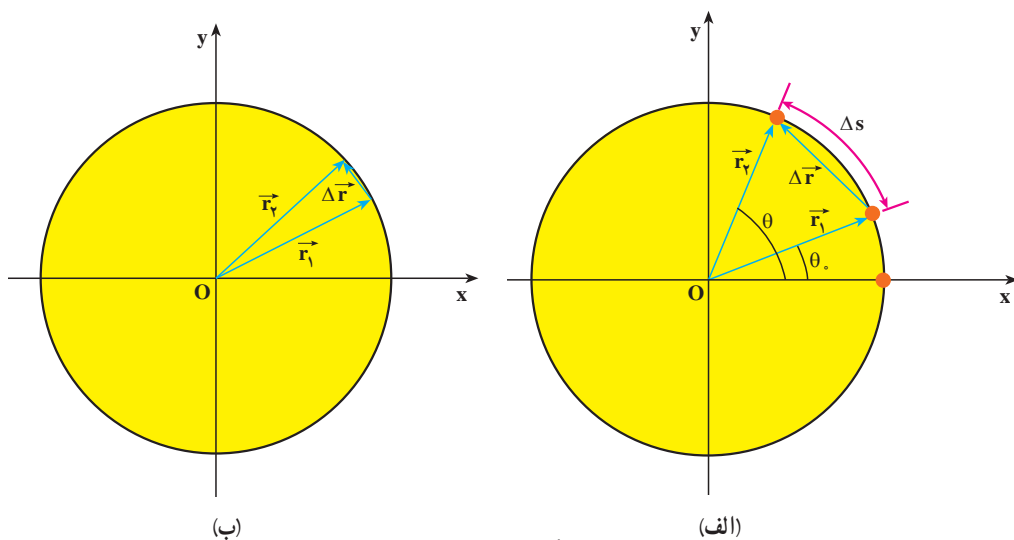
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (۹-۲)$$

تمرین ۲-۵

سرعت زاویه ای گردش ماه به دور زمین را محاسبه کنید (دوره گردش ماه به دور زمین را ۲۹ روز و حرکت آن را دایره ای یکنواخت فرض کنید).

سرعت خطی در حرکت دایره ای : در فصل قبل دیدید که موقعیت ذره را در صفحه می توان

با بردار مکان مشخص کرد (شکل ۲-۱۳). اگر بردار مکان ذره در لحظه t_1 ، \vec{r}_1 و در لحظه t_2 ، \vec{r}_2 باشد، جابه جایی ذره در بازه زمانی $\Delta t = t_2 - t_1$ برابر $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ خواهد بود. ذره در این بازه زمانی کمان Δs را می پیماید. اگر بازه زمانی Δt بسیار کوچک باشد، کمان Δs کوچک می شود و می توان طول کمان Δs را تقریباً با طول وتر مقابل آن، یعنی $|\Delta \vec{r}|$ برابر گرفت.



شکل ۲-۱۳

در فصل قبل دیدیم که سرعت متوسط متحرک را می‌توان از رابطه ۱-۲۲ به دست آورد و بزرگی سرعت لحظه‌ای نیز با رابطه زیر تعریف می‌شود:

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

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

$$|\vec{v}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (۱-۲)$$

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

$$\Delta\theta = \frac{\Delta s}{r} \quad \text{یعنی:}$$

و یا

$$\Delta s = r\Delta\theta \quad (۱۱-۲)$$

بنابراین رابطه ۲-۱ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

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

و یا

$$v = r\omega \quad (۱۲-۲)$$

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

تمرین ۲-۷

طول عقربه‌های ساعت شمار، دقیقه شمار و ثانیه شمار یک ساعت دیواری به ترتیب ۸ cm، ۱۲ cm و ۱۲ cm است. سرعت خطی نوک هر یک از عقربه‌های این ساعت را محاسبه کنید.



شکل ۲-۱۴

در یک شهربازی، گردونه‌ای افراد را در یک سطح افقی و در مسیر دایره‌ای می‌گرداند (شکل ۲-۱۴). به طوری که هر فرد حرکت دایره‌ای یکنواختی دارد. اگر گردونه در هر 10° 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.

پاسخ

دوره چرخش $T = 10\text{ s}$ است.

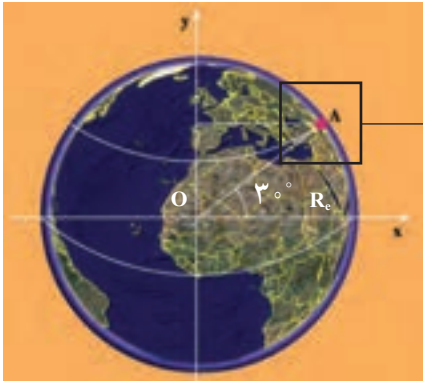
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{10} = \frac{\pi}{5} \text{ rad/s}$$

پس سرعت زاویه‌ای برابر است با:

و سرعت خطی آن نیز برابر خواهد بود با:

$$v = r\omega = 5 \times \frac{\pi}{5} = 3.14 \text{ m/s}$$

شهر آبادان در مدار جغرافیایی 3° شمالی قرار دارد. سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی شخصی را که در این شهر زندگی می‌کند حساب کنید. شعاع زمین را $R_e = 6.4 \times 10^6 \text{ m}$ بگیرید.



شکل ۲-۱۵

پاسخ

سرعت زاویه‌ای حرکت وضعی زمین، در تمام نقاط زمین یکسان است (چرا؟). با توجه به این که دورهٔ چرخش زمین به دور خود، ۲۴ ساعت است، می‌توانیم سرعت زاویه‌ای هر نقطه از زمین را محاسبه کنیم.

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

$$T = 24 \times 60 \times 60 = 86400 \text{ s}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{86400} = 7/27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

فاصلهٔ آبادان از محور چرخش زمین، با توجه به شکل ۲-۱۵ برابر است با:

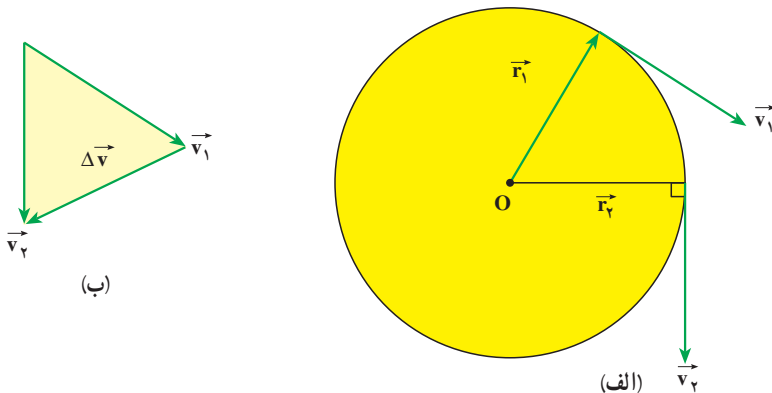
$$r = 6/4 \times 10^6 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 5/54 \times 10^6 \text{ m}$$

و سرعت خطی شخص در آبادان برابر است با:

$$v = r\omega = 5/54 \times 10^6 \times 7/27 \times 10^{-5} = 402/76 \text{ m/s}$$

شتاب در حرکت دایره‌ای یکنواخت: ذره‌ای را در نظر بگیرید که دارای حرکت دایره‌ای

یکنواخت است (شکل ۲-۱۶ الف). در فصل قبل دیدیم که بردار سرعت در هر لحظه مماس بر مسیر است. اگر مکان ذره در لحظهٔ t_1 ، r_1 و در لحظهٔ t_2 ، r_2 باشد، بردارهای سرعت متحرک در این نقاط به ترتیب بر r_1 و r_2 عمودند. بردار $\Delta v = v_2 - v_1$ در شکل ۲-۱۶ ب رسم شده است.



شکل ۲-۱۶

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

$$a = \frac{v^2}{r} \quad (2-13 \text{ الف})$$

و یا

$$a = r\omega^2 \quad (2-13 \text{ ب})$$

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

تمرین ۲-۷

شتاب مرکزگرای ماه به دور زمین را محاسبه کنید.
فاصله ماه از زمین $3/8 \times 10^8 \text{ m}$ و دوره حرکت ماه را ۲۹ روز بگیرید.

مثال ۲-۸

خودرویی در یک جاده به شعاع انحنای 200 m با سرعت ثابت 20 m/s در حرکت است. شتاب مرکزگرای این خودرو را حساب کنید.

پاسخ

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{400}{200} = 2 \text{ m/s}^2$$

۶-۲- دینامیک حرکت دایره‌ای یکنواخت

در بخش ۵-۲ 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، در نتیجه در حرکت دایره‌ای

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

با توجه به رابطه‌های ۱۳-۲ قانون دوم نیوتون در حرکت دایره‌ای یکنواخت به صورت زیر

درمی‌آید:

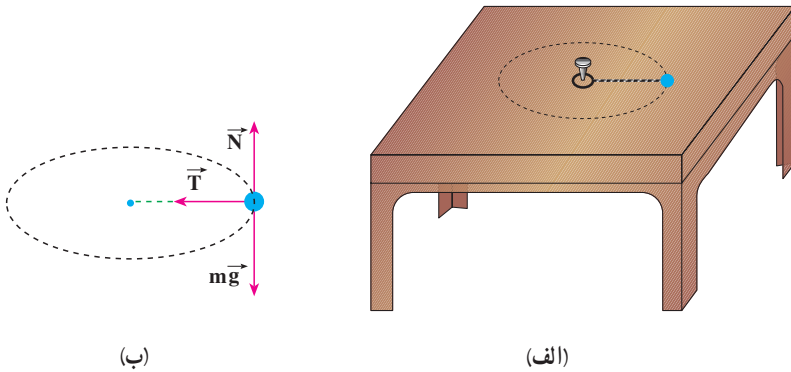
$$F = \frac{mv^2}{r} \quad \text{(الف-۱۴-۲)}$$

$$F = mr\omega^2 \quad \text{(ب-۱۴-۲)}$$

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

مثال ۹-۲

مهره‌ای به جرم 20g را به نخ می‌بندیم و به انتهای دیگر نخ، حلقه کوچکی وصل می‌کنیم، سپس حلقه را مطابق شکل ۱۷-۲-الف با میخ کوتاهی در وسط یک میز ثابت می‌کنیم. نیروی اصطکاک مهره با میز ناچیز است.



شکل ۱۷-۲

فاصله مهره از میخ 25cm 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 ۲-۱۷ ب نشان داده شده است.
در راستای قائم، نیروی وزن و نیروی عمودی تکیه‌گاه بر جسم اثر می‌کنند. برآیند 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:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \text{ rad/s}$$

و سرعت خطی نیز برابر است با:

$$v = r\omega = 0.25 \times 2\pi = \frac{\pi}{2} \approx 1.57 \text{ m/s}$$

و نیروی کشش نخ برابر است با:

$$T = m \frac{v^2}{r} = 2 \times 10^{-3} \times \frac{\pi^2}{4} \times \frac{1}{0.25} \approx 0.2 \text{ N}$$

تمرین ۲-۸

- در هر یک از موارد زیر نیروی مرکزگرا را مشخص کنید.
- ۱- در حرکت لباس‌هایی که در ماشین لباس‌شویی می‌چرخند.
 - ۲- در چرخش الکترون به دور هسته
 - ۳- در گردش سیاره‌ها به دور خورشید



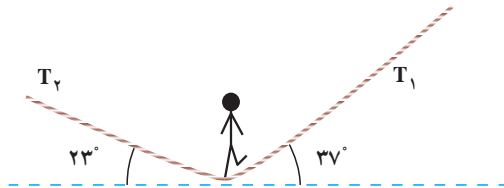
ابوریحان بیرونی

ابوریحان محمد بن احمد بیرونی، دانشمند برجسته ایرانی، در نیمه دوم قرن چهارم و اوایل قرن پنجم می زیست. وی در بیرون (حومه) شهر کاث، پایتخت خوارزمشاهیان، به دنیا آمد. او تا سن بیست و پنج سالگی در زادگاه خود مشغول فراگیری علمی چون جغرافیا، ریاضیات، ستاره شناسی، پزشکی، فقه، کلام و ... بود. بیرونی اولین فعالیت های 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 ابوالوفاء بوزجانی، از برجسته ترین منجمان آن دوره، رصد کرد. در واقع، ابوالوفاء نیز همین خسوف را در بغداد رصد کرده بود. با مقایسه 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 تألیف ها، ترجمه ها و آثار نیمه تمام او به ۱۸۰ عنوان می رسد 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.

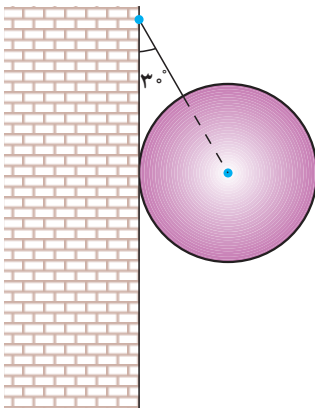
بیرونی در کتاب «افراد المقال فی امر الظلال»، یکی از نظریات مشهور ارسطو را با تکیه بر آزمایش رد می کند. نکته مهم و مورد توجه در آزمایش های بیرونی، شیوه علمی او در انجام دادن آزمایش هاست. وی مانند یک محقق امروزی در آزمایش خود به نکاتی توجه می کند؛ از جمله هنگام مقایسه خاصیتی ویژه از دو ماده می کوشد تا سایر شرایط برای آنها یکسان باشد و نیز به تکرار در آزمایش تأکید می کند تا مطمئن شود که نتایج حاصل از فرایند اتفاقی نیست. دیدگاه بیرونی درباره چپستی کهکشان راه شیری که در کتاب التفهیم آمده از اهمیتی بسزا برخوردار است؛ زیرا در میان طبیعی دانان مسلمان کمتر کسی به آن پرداخته است و همگی از نظریات ارسطو در این زمینه پیروی می کرده اند. تنها بیرونی و ابن هیثم نظریاتی نو در این زمینه مطرح کرده اند. بیرونی چنین می گوید: «مجره 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» درباره سیاهی هوا بر فراز نقاط مرتفع را نشانه مبالغه وی در پیروی از نظریه ای که از کتاب «الحس و المحسوس» ارسطو برمی آید، می داند. ابوریحان بر آن است که در این باره باید فقط با استناد به آزمایش و تجربه سخن گفت و می گوید که هیچ گاه از تغییر رنگ هوا در سرما یا نبود گرما سخنی نرفته است و قله کوه دماوند با بلندی بسیارش دیده می شود و هیچ نشانه ای از سیاهی در آن نیست.

- ۱- بر اساس قانون سوم نیوتون، به پرسش‌های زیر پاسخ دهید :
- الف) نیروهای وارد بر یک شخص، هنگامی که جسمی را هل می‌دهد و همچنین نیروهای وارد بر جسم چگونه است؟
- ب) نقش نیروهای مختلف در هنگام راه رفتن ما بر روی زمین چگونه است؟
- ۲- به جسمی به جرم 100 kg نیروی ثابت F در راستای قائم به طرف بالا وارد می‌شود. جسم از حال سکون با شتاب 5 m/s^2 به طرف بالا حرکت می‌کند و پس از 20 s نیروی F حذف می‌شود. الف) مقدار نیروی F را تعیین کنید.
- ب) ارتفاعی که جسم بالا می‌رود. $g = 10 \text{ m/s}^2$ (از مقاومت هوا چشم‌پوشی کنید).
- ۳- یک بازیگر سیرک به وزن 600 N روی طنابی مطابق شکل ۱۸-۲ در حال تعادل است. نیروهای کشش طناب را محاسبه کنید.



شکل ۱۸-۲



شکل ۱۹-۲

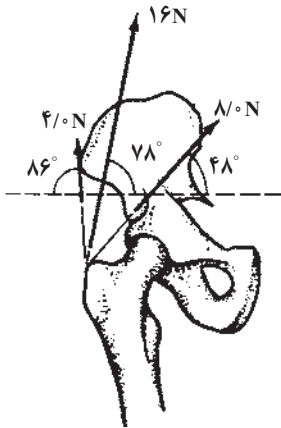
- ۴- کره‌ای به جرم 20 kg را مطابق شکل ۱۹-۲، به وسیله کابلی به دیوار قائم و بدون اصطکاک آویزان می‌کنیم. نیروی کشش کابل و واکنش دیوار را محاسبه کنید.

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



شکل ۲-۲۱

۶- کتابی را مانند شکل ۲-۲۱ 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 ۲-۲۲

۷- سه ماهیچه، استخوان ران را به لگن متصل می‌کنند. در شکل ۲-۲۲ مقدار و جهت نیروهایی که این ماهیچه‌ها به استخوان ران وارد می‌کنند، نشان داده شده است. برایندهای نیروهای وارد بر استخوان ران از طرف این ماهیچه‌ها را به دست آورید.

۸- پره‌های یک بالگرد (هلیکوپتر) در هر دقیقه 900° دور می‌گردد. کمیت‌های زیر را برای پره‌ها محاسبه کنید.

الف) دوره، بسامد و سرعت زاویه‌ای

ب) سرعت خطی و شتاب مرکزگرای نقطه‌ای که فاصله آن از محور دوران 3m است.

۹- ماهواره‌ای روی مدار دایره‌ای به دور زمین می‌گردد. اگر جرم ماهواره $m = 250\text{kg}$ ، جرم زمین $M_e = 5.98 \times 10^{24}\text{kg}$ ، ثابت جهانی گرانش $G = 6.67 \times 10^{-11}\text{N.m}^2/\text{kg}$ ، فاصله ماهواره از سطح زمین 2600km و شعاع زمین 6400km باشد، کمیت‌های زیر را محاسبه کنید:

الف) نیروی گرانش بین ماهواره و زمین

ب) سرعت ماهواره

پ) دوره گردش ماهواره

۱۰- یک ماهواره در چه فاصله‌ای از مرکز زمین باید قرار گیرد، تا همواره در یک نقطه در

بالای خط استوا باشد؟

۱۱- جرم ماهواره امید (شکل ۲-۲۳) تقریباً 27 کیلوگرم و فاصله آن از سطح زمین حدوداً

250 کیلومتر است. با توجه به داده‌های مسئله ۹، دوره، سرعت و نیروی گرانشی بین این ماهواره و زمین را به دست آورید.



شکل ۲-۲۳

حرکت نوسانی

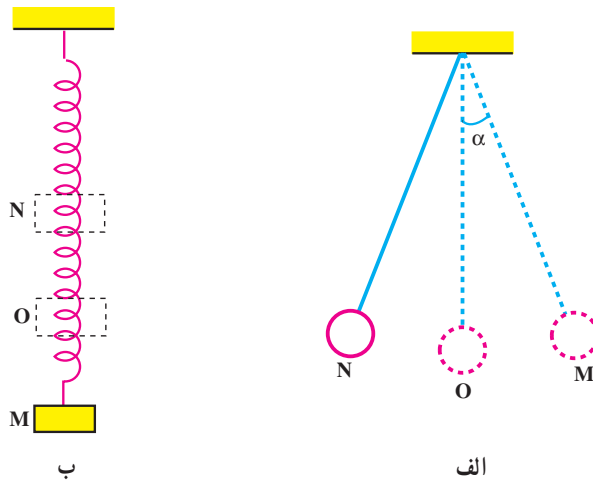


۳

فصل

حرکت نوسانی

نگاهی به فصل: گردش زمین به دور خورشید، گردش ماه به دور زمین، ضربان قلب انسان، ارتعاش تارهای کمانچه، تار و یا سه تار، بالا و پایین رفتن تاب بازی، پیدایش فصل های سال، طلوع و غروب خورشید، یا حرکت یک آونگ ساده (شکل ۱-۳-الف)، حرکت وزنه ای که به یک فنر متصل است (شکل ۱-۳-ب) و مثال های بسیار دیگری مانند اینها، حرکت های دوره ای هستند که با گذشت زمان بارها تکرار می شوند. در حرکت های دوره ای، متحرک پس از طی زمان معینی به وضعیت اولیه برمی گردد و حرکت خود را از نو آغاز می کند. در این فصل پس از معرفی پدیده های دوره ای به توصیف حرکت هماهنگ ساده می پردازیم؛ زیرا شناخت و بررسی این حرکت، پایه و اساس مناسبی برای درک امواج و انتشار آنها فراهم می کند.



شکل ۱-۳

۱-۳-۱- حرکت هماهنگ ساده

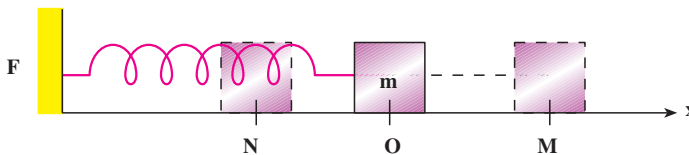
یک حرکت نوسانی را **هماهنگ ساده** می نامیم؛ وقتی مسیر رفت و برگشت متحرک روی یک پاره خط حول نقطه ای واقع در وسط آن باشد. برای مثال، حرکت آونگ (شکل ۱-۳-الف)، وقتی زاویه α خیلی کوچک باشد، به گونه ای که بتوان تاثرات و سینوس آن را برابر گرفت و همچنین بالا و

پایین رفتن وزنه آویخته به فنر (شکل ۱-۳-ب). در این دو حرکت، متحرک، در بازه‌های زمانی یکسان، از ابتدای پاره خط، یعنی از نقطه M به نقطه N می‌رود و برمی‌گردد و به این ترتیب، حول نقطه O واقع در وسط پاره خط نوسان می‌کند. از این پس دستگاهی را که دارای حرکت هماهنگ ساده است نوسانگر هماهنگ ساده می‌نامیم. نوسانگر وزنه-فنر در شکل ۱-۳-ب الگوی مناسبی برای بررسی حرکت نوسانی ساده است. ابتدا برخی مفهومی‌ها را در این حرکت معرفی می‌کنیم.

دوره و بسامد: در حرکت هماهنگ ساده بازه 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:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1-3)$$

دامنه نوسان: جسمی به جرم m را در نظر بگیرید که به سرآزاد یک فنر متصل است و می‌تواند در راستای محور x، روی یک سطح افقی که اصطکاک آن ناچیز است، جابه‌جا شود (شکل ۲-۳). در حالتی که فنر طول عادی خود را دارد برابند نیروهای وارد به جسم صفر و در نتیجه جسم در حال تعادل است.



شکل ۲-۳

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

نیروی بازگرداننده: در شکل ۲-۳، جهت نیروی فنر همواره به گونه‌ای است که می‌خواهد جسم را به حالت تعادل (نقطه O) برگرداند، این نیرو، نیروی بازگرداننده نامیده می‌شود. نیروی بازگرداننده فنر با تغییر طول فنر، متناسب است و از رابطه زیر که به قانون هوک معروف است، به دست می‌آید:

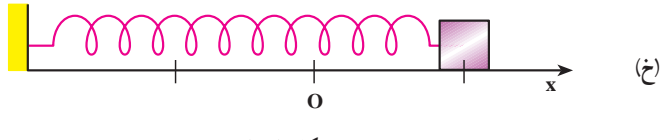
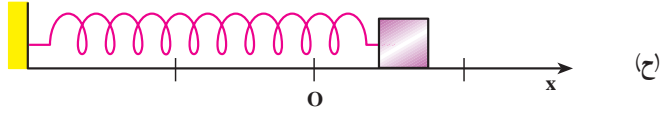
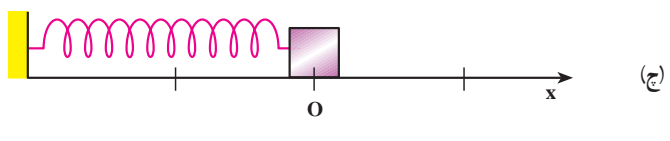
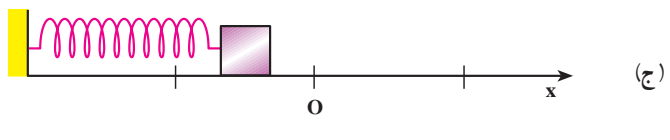
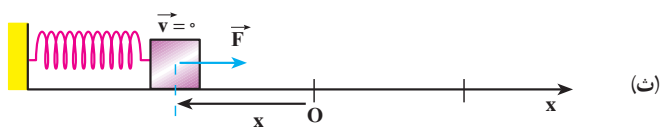
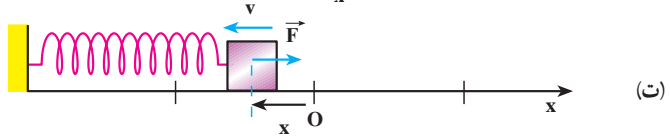
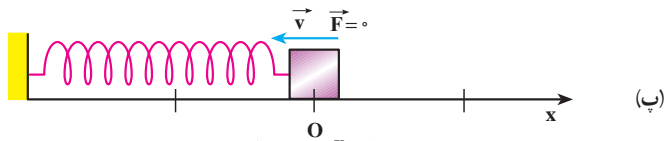
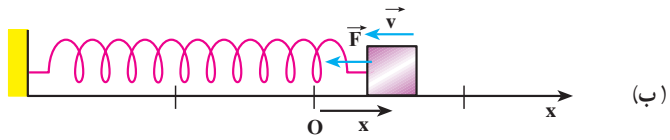
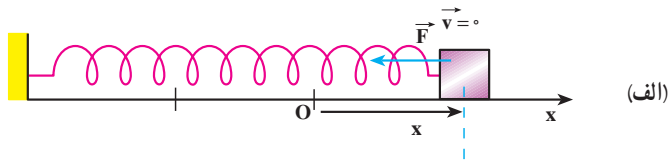
$$F = -kx \quad (2-3)$$

در این رابطه، x تغییر طول فنر، F نیروی بازگرداننده 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 رابطه ۲-۳ نشان می‌دهد که جهت نیروی بازگرداننده فنر همواره خلاف جهت بردار مکان جسم است. هر دستگاهی که نیروی بازگرداننده آن از قانون هوک پیروی کند، حرکت هماهنگ ساده خواهد داشت.

حال اثر نیروی بازگرداننده را در نوسانگر وزنه - فنر، در یک دوره، بررسی می‌کنیم. همان‌طور که در شکل ۳-۳ الف تا پ دیده می‌شود، اگر جسم را پس از خارج کردن از وضع تعادل رها کنیم، تحت اثر نیروی بازگرداننده به طرف وضع تعادل خود (نقطه O) برمی‌گردد و پس از رسیدن به نقطه 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 برآیند 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 ۱-۳

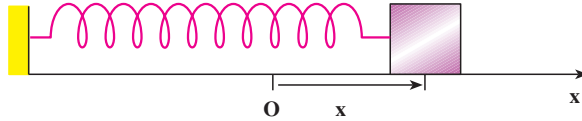
دیدیم در لحظه‌ای که فنر بیشترین فشردگی را پیدا می‌کند سرعت نوسانگر به صفر می‌رسد. اکنون با توجه به شکل‌های ۳-۳ ج تا خ نیروی وارد بر نوسانگر و همچنین مکان، سرعت و شتاب نوسانگر را پس از لحظه مذکور بررسی کنید.



شکل ۳-۳

۲-۳- معادله حرکت هماهنگ ساده

یک نوسانگر را در نظر بگیرید که مطابق شکل ۳-۴ در فاصله x از وضع تعادل قرار دارد.



شکل ۳-۴

بنا به رابطه ۲-۳ نیروی وارد بر وزنه در این لحظه $F = -kx$ است؛ اگر جرم وزنه m باشد بنا به قانون دوم نیوتون داریم:

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

$$a = -\frac{k}{m}x \quad (۳-۳)$$

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، معادله حرکت هماهنگ ساده باید به صورت زیر باشد*:

$$x = A \sin \omega t \quad (۴-۳)$$

اگر از رابطه ۳-۴ 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 رابطه ۳-۴ می‌توان نوشت:

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

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

از مقایسه رابطه اخیر با رابطه ۳-۳ نتیجه زیر حاصل می شود.

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5-3)$$

ω را بسامد زاویه ای می نامیم. یکای بسامد زاویه ای رادیان بر ثانیه است. در رابطه ۳-۴، x مکان متحرک در لحظه t و A دامنه نوسان است (چرا؟) همچنین $\phi = \omega t$ فاز حرکت در لحظه t می باشد؛ اگر در لحظه t_1 فاز حرکت:

$$\phi_1 = \omega t_1$$

و در لحظه t_2 فاز حرکت

$$\phi_2 = \omega t_2$$

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

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

یا

$$\Delta\phi = \omega\Delta t \quad (6-3)$$

در رابطه ۳-۶ اگر $\Delta t = 1s$ باشد، $\Delta\phi = \omega$ می شود؛ یعنی، بسامد زاویه ای (ω) تغییر فاز در هر ثانیه است.

رابطه بسامد زاویه ای و دوره تناوب: چون دوره تناوب تابع سینوسی، 2π است باید در هر دوره

(یعنی در زمان T) فاز به اندازه 2π تغییر کند. بنابراین، با توجه به رابطه ۳-۶ می توان چنین نوشت:

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

و از آنجا

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (7-3)$$

اکنون با توجه به رابطه های ۳-۵ و ۳-۷ رابطه های زیر به دست می آید:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (8-3)$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \quad (9-3)$$

رابطه ۳-۸ نشان می دهد که دوره به ویژگی های 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 نوسان های 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 ۱-۳

معادله حرکت نوسانگری در SI به صورت زیر است.

$$x = 0.05 \sin 60\pi t$$

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

ب) مکان نوسانگر را در لحظه صفر و در لحظه $\frac{1}{36}$ ثانیه به دست آورید.

پاسخ

الف) با توجه به معادله ۳-۴ و رابطه ۳-۷ نتایج زیر حاصل می‌شود:

$$A = 0.05 \text{ m} \quad \text{دامنه:}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 60\pi \Rightarrow T = \frac{1}{30} \text{ s} \quad \text{دوره:}$$

$$f = \frac{1}{T} = 30 \text{ Hz} \quad \text{بسامد:}$$

$$x_0 = 0.05 \sin 60\pi \times 0 = 0.05 \times 0 = 0 \quad \text{ب)}$$

$$x = 0.05 \sin 60\pi \times \frac{1}{36} \Rightarrow x = 0.05 \sin \frac{\pi}{6} = 0.025 \text{ m}$$

مثال ۲-۳

دامنه نوسان نوسانگر هماهنگ ساده‌ای ۲ cm و بسامد آن ۲۰ Hz است. معادله

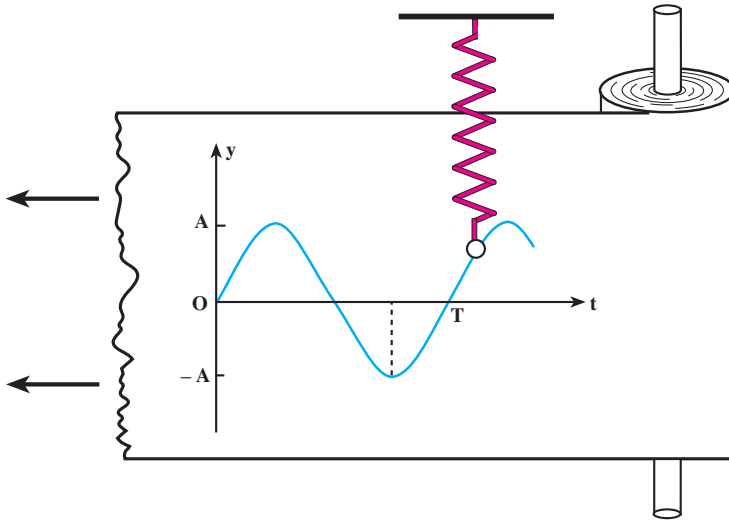
حرکت آن را بنویسید.

$$A = 0.02 \text{ m}, f = 20 \text{ Hz}, \omega = 2\pi f \Rightarrow \omega = 40\pi \text{ rad/s}, \quad \text{پاسخ}$$

$$x = A \sin \omega t \Rightarrow x = 0.02 \sin 40\pi t$$

رسم نمودار یک نوسانگر هماهنگ ساده: یکی از روش‌های نمایش نمودار مکان-زمان

حرکت نوسانگر هماهنگ ساده در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۵

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-فنر در امتداد قائم طوری نصب شده است که وزنه متصل به آن به وسیله 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 نشان‌دهنده 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 پیشینه، کمینه و محل برخورد نمودار را با محور زمان معلوم نموده و با مشخص کردن آنها در صفحه مختصات $x-t$ نمودار را رسم می‌کنیم. به مثال‌هایی در این باره توجه کنید:

مثال ۳-۳

دوره و دامنه نوسانگر هماهنگ ساده‌ای به ترتیب 0.2s و 6cm است. معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان-زمان آن را رسم کنید.

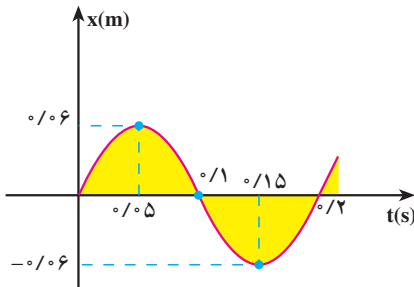
پاسخ

$$T = 0.2\text{s}, A = 0.06\text{m}, \omega = 10\pi\text{rad/s}$$

$$x = A\sin\omega t \Rightarrow x = 0.06\sin 10\pi t \quad \text{معادله حرکت:}$$

برای رسم نمودار تغییرات x بر حسب t به کمک نقطه‌یابی به ترتیب زیر، عمل

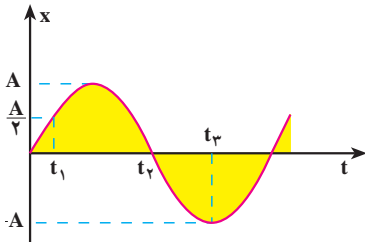
می‌کنیم:



شکل ۳-۶

t(s)	x(m)
0	0
$\frac{T}{4} = 0.05$	$0.06 = +A$
$\frac{T}{2} = 0.1$	0
$\frac{3T}{4} = 0.15$	$-0.06 = -A$
$T = 0.2$	0

مثال ۳-۴



شکل ۳-۷

نمودار شکل ۳-۷ مربوط به حرکت هماهنگ ساده‌ای است که دوره آن 0.2s ثانیه است. زمان‌های t_1 و t_2 و t_3 را به دست آورید.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 1 \cdot \pi \text{ rad/s} \Rightarrow x = A \sin 1 \cdot \pi t$$

پاسخ

با توجه به شکل ۳-۷ در لحظه t_1 مکان برابر $A/2$ است؛ بنابراین:

$$+\frac{A}{2} = A \sin 1 \cdot \pi t_1 \Rightarrow \sin 1 \cdot \pi t_1 = \frac{1}{2}$$

$$1 \cdot \pi t_1 = \frac{\pi}{6} \Rightarrow t_1 = \frac{1}{6} \text{ s}$$

در لحظه t_2 مکان صفر است؛ بنابراین:

$$0 = A \sin 1 \cdot \pi t_2$$

$$\Rightarrow 1 \cdot \pi t_2 = 0 \quad \text{یا} \quad 1 \cdot \pi t_2 = \pi$$

از تساوی $1 \cdot \pi t_2 = 0$ زمان t_2 صفر به دست می‌آید، در حالی که در شکل t_2

مثبت است؛ بنابراین:

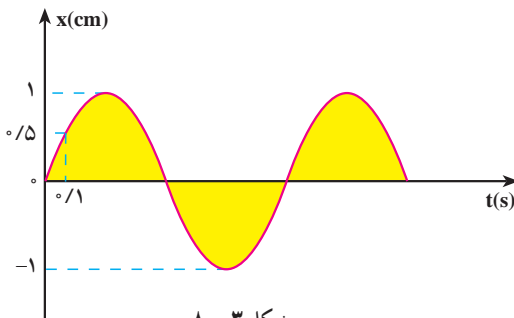
$$1 \cdot \pi t_2 = \pi \Rightarrow t_2 = \frac{1}{1} \text{ s}$$

در لحظه t_3 مکان $-A$ است؛ بنابراین:

$$-A = A \sin 1 \cdot \pi t_3 \Rightarrow \sin 1 \cdot \pi t_3 = -1$$

$$1 \cdot \pi t_3 = \frac{3\pi}{2} \Rightarrow t_3 = \frac{3}{2} \text{ s}$$

تمرین ۳-۱



نمودار مکان-زمان نوسانگری

در شکل ۳-۸

رسم شده است. مطلوب است:

الف) دوره حرکت

ب) مکان نوسانگر در لحظه

$$t = 0.5 \text{ s}$$

۳-۳- معادله‌های سرعت و شتاب در حرکت هماهنگ ساده

الف) معادله سرعت: با توجه به این که سرعت، مشتق مکان نسبت به زمان است با مشتق‌گیری

$$v = \frac{dx}{dt} \Rightarrow v = A\omega \cos \omega t \quad (10-3)$$

معادله ۱۰-۳ نشان می‌دهد که سرعت به ازای $\cos \omega t = \pm 1$ بیشینه می‌شود؛ پس داریم:

$$v_{\max} = A\omega \quad (11-3)$$

در لحظه‌ای که $\cos \omega t = \pm 1$ است، $\sin \omega t = 0$ و در نتیجه $x = 0$ ؛ یعنی، سرعت بیشینه مربوط به لحظه‌ای است که نوسانگر در حال گذر از وضع تعادل است.

تمرین ۲.۳

الف) به کمک رابطه‌های ۳-۴ و ۳-۱۰ نشان دهید که $v = \pm \omega \sqrt{A^2 - x^2}$ است.

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

ب) معادله شتاب: می‌دانیم که شتاب مشتق سرعت نسبت به زمان، یا مشتق دوم مکان نسبت به

زمان است؛ در نتیجه با استفاده از رابطه ۳-۴ یا ۳-۱۰ داریم:

$$a = -A\omega^2 \sin \omega t \quad (12-3)$$

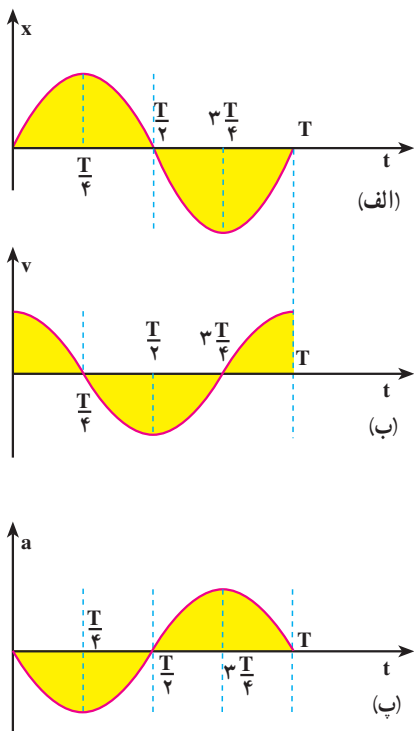
معادله ۱۲-۳ نشان می‌دهد که در حرکت هماهنگ ساده، شتاب نیز به‌طور دوره‌ای تغییر می‌کند و بیشینه آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$a_{\max} = A\omega^2 \quad (13-3)$$

با استفاده از رابطه ۳-۴ می‌توان رابطه ۱۲-۳ را به صورت زیر نوشت:

$$a = -\omega^2 x \quad (14-3)$$

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



شکل ۹-۳

در شکل‌های ۳-۹ الف - ب و پ، به ترتیب، نمودارهای مکان-زمان و سرعت-زمان و شتاب-زمان برای حرکت هماهنگ ساده‌ای که معادله آن به صورت $x = A \sin \omega t$ است نشان داده شده است.

همان‌طور که در این نمودارها دیده می‌شود در لحظه $x = 0, t = 0$ است. در این لحظه سرعت بیشینه و مثبت و شتاب صفر است. در لحظه $\frac{T}{4}$ ، x بیشینه و مثبت، سرعت صفر و شتاب بیشینه و منفی است. در لحظه $\frac{T}{2}$ ، $x = 0$ ، سرعت بیشینه و منفی و شتاب صفر است. در لحظه $\frac{3T}{4}$ ، x بیشینه و منفی، سرعت صفر و شتاب بیشینه و مثبت است. در لحظه T ، x صفر، سرعت بیشینه و مثبت و شتاب صفر است.

مثال ۳-۵

دامنه یک نوسانگر وزنه - فنر، 5 cm است. اگر جرم وزنه 20 g و ثابت فنر 2 N/m باشد:

الف) بیشینه سرعت و شتاب در SI چه اندازه است؟
 ب) در لحظه‌ای که مکان نوسانگر $+4 \text{ cm}$ است، سرعت و شتاب آن را به دست آورید.

پاسخ
 الف)

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{2}{0.02}} = 10 \text{ rad/s}$$

$$v_{\max} = A\omega = 0.05 \times 10 = 0.5 \text{ m/s}$$

$$a_{\max} = A\omega^2 = 0.05 \times 100 = 5 \text{ m/s}^2$$

ب) در تمرین ۱-۳ دیدیم که $v = \pm\omega\sqrt{A^2 - x^2}$ ، بنابراین

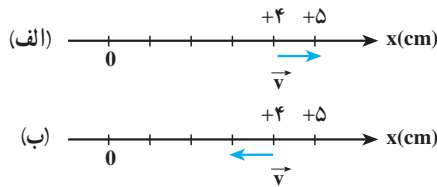
$$v = \pm 10 \sqrt{(0.05)^2 - (0.04)^2} = \pm 0.3 \text{ m/s}$$

علامت (\pm) نشان دهنده این است که در مکان $x = +4 \text{ cm}$ ممکن است سرعت در جهت محور x یا در خلاف جهت محور x باشد؛ یعنی، در لحظه ای که $x = +4 \text{ cm}$ است؛ ممکن است متحرک در حال دور شدن از مبدأ باشد که در این صورت $v = +0.3 \text{ m/s}$ است و یا در حال نزدیک شدن به مبدأ باشد که در این صورت $v = -0.3 \text{ m/s}$. این وضعیت به ترتیب، در شکل های ۱-۳ الف و ۱-۳ ب نشان داده شده است.

$$a = -\omega^2 x = -100 \times 0.04 = -4 \text{ m/s}^2$$

پس معلوم می شود در مکان $x = +4 \text{ cm}$ شتاب منفی و در خلاف جهت محور

x است.



شکل ۱-۳

۳-۴- انرژی مکانیکی نوسانگر (دستگاه جرم - فنر)

در فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم، هنگامی که فنری فشرده یا کشیده می شود در آن انرژی پتانسیل کشسانی ذخیره می شود؛ می توان نشان داد مقدار این انرژی از رابطه زیر به دست می آید:

$$U_e = \frac{1}{2} kx^2$$

با جای گذاری x از معادله ۳-۴ خواهیم داشت:

$$U_e = \frac{1}{2} kA^2 \sin^2 \omega t \quad (۱۵-۳)$$

با استفاده از رابطه ۳-۵ می توان نوشت:

$$U_e = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \sin^2 \omega t \quad (۱۶-۳)$$

از طرفی با توجه به رابطه ۳-۱۰ انرژی جنبشی این نوسانگر از رابطه زیر به دست می آید :

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \cos^2 \omega t \quad (۱۷-۳)$$

بنابراین، انرژی مکانیکی، یعنی مجموع انرژی پتانسیل و جنبشی این نوسانگر به ترتیب زیر به دست می آید :

$$E = U_e + K = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \sin^2 \omega t + \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \cos^2 \omega t$$

$$E = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 [\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t]$$

$$E = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \quad (۱۸-۳)$$

از رابطه های ۳-۱۵ و ۳-۱۷ می توان دریافت که انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی نوسانگر وزنه - فنر با زمان تغییر می کنند؛ یعنی، در لحظه ای که نوسانگر در فاصله x از مبدأ قرار دارد، بخشی از انرژی آن به صورت پتانسیل و بقیه به صورت جنبشی است. اما رابطه ۳-۱۸ نشان می دهد که انرژی مکانیکی نوسانگر مستقل از زمان است.

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

تمرین ۳-۳

الف) رابطه انرژی جنبشی نوسانگر ساده را بر حسب مکان نوسانگر (x) به دست آورید و با استفاده از آن و همچنین رابطه انرژی پتانسیل نوسانگر نشان دهید که انرژی مکانیکی آن به مکان بستگی ندارد.

ب) با استفاده از رابطه ای که به دست آوردید، مشخص کنید که در چه مکانی انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی نوسانگر صفر و یا بیشینه است.

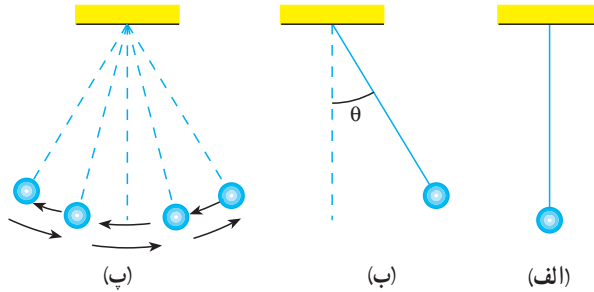
تمرین ۳-۴

نمودار تغییرات U_e و K و E را نسبت به مکان برای یک دوره نوسانگر ساده

رسم کنید.

۳-۵- آونگ ساده

آونگ ساده وزنه 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 ۳-۱۱-الف). اگر وزنه را پس از خارج کردن آونگ از وضع تعادل رها کنیم (شکل ۳-۱۱-ب) حول وضع تعادلش نوسان می‌کند (شکل ۳-۱۱-پ). در نوسان آونگ، نیروی بازگرداننده، مؤلفه نیروی وزن جسم در راستای مماس بر مسیر است.



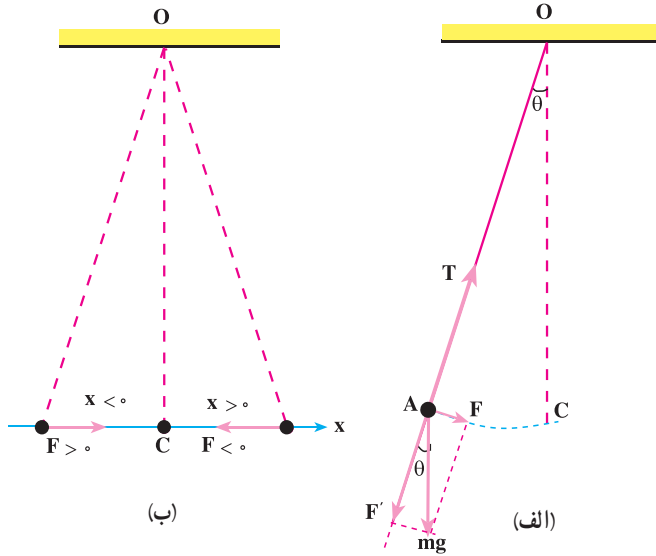
شکل ۳-۱۱

اگر زاویه انحراف اولیه از وضع قائم (θ) به اندازه کافی کوچک باشد، مسیر حرکت وزنه تقریباً یک پاره خط افقی است (شکل ۳-۱۲-ب). در این صورت، وزنه مانند وزنه متصل به فنر یک حرکت هماهنگ ساده با دامنه کم (حرکت نوسانی کم دامنه) انجام می‌دهد.

محاسبه دوره آونگ ساده کم دامنه: در آونگ ساده اگر اصطکاک قابل چشم‌پوشی و جرم نخ ناچیز باشد، بر وزنه آونگ نیروی وزن ($m\vec{g}$) و نیروی کشش نخ (\vec{T}) وارد می‌شود. همان‌طور که شکل ۳-۱۲-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. مؤلفه نیروی وزن در امتداد مماس بر مسیر $F = mg \sin\theta$ و در امتداد عمود بر مسیر $F' = mg \cos\theta$ است. مؤلفه مماس بر مسیر که نیروی بازگرداننده است می‌خواهد آونگ را به وضع تعادل برگرداند.

دیدیم که اگر زاویه 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، $\sin\theta \approx \theta = \frac{x}{l}$ است و می‌توان نوشت:

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



شکل ۱۲-۳

همان گونه که در شکل ۱۲-۳-ب دیده می‌شود مؤلفه نیروی وزن جسم در راستای مماس بر مسیر و همواره در خلاف جهت بردار مکان است. بنابراین:

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

همان طور که می‌بینید، نیروی بازگرداننده از قانون هوک (رابطه ۳-۲) پیروی می‌کند و حرکت آونگ ساده کم دامنه یک حرکت هماهنگ ساده است. اکنون با توجه به قانون دوم نیوتون داریم:

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

$$a = -\frac{g}{l}x \quad (۱۹-۳)$$

از رابطه ۱۴-۳ و ۱۹-۳ نتیجه می‌گیریم که:

$$\omega^2 = \frac{g}{l} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

و

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (۲۰-۳)$$

مثال ۷-۳

اندازه دوره و بسامد حرکت نوسانی کم دامنه یک آونگ ساده به طول 40 cm چقدر است؟ ($g = 10\text{ m/s}^2$).

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

پاسخ

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{0.4}{10}} = 2\pi \times \frac{2}{10} \approx 1.25\text{ s} \quad \text{و} \quad f = \frac{1}{T} = 0.8\text{ Hz}$$

مثال ۷-۳

طول آونگ ساده کم دامنه باید چند سانتی متر باشد تا بتواند در هر دقیقه 30 نوسان انجام دهد؟ ($\pi^2 = 10$ و $g = 9.8\text{ m/s}^2$).

$$T = \frac{t}{n} = \frac{60}{30} = 2\text{ s}$$

پاسخ

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{l}{g}$$

$$4 = 4 \times 10 \times \frac{l}{9.8} \quad \Rightarrow \quad l = 0.98\text{ m} = 98\text{ cm}$$

فعالیت ۲.۳

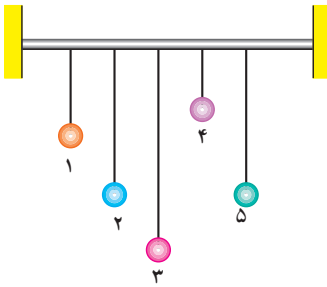
- ۱- به کمک یک گلوله و قطعه نخ به طول 40 cm آونگ ساده ای بسازید و دوره آن را به ترتیب با زاویه های انحراف 4 ، 6 و 20 درجه اندازه بگیرید.
 - ۲- گلوله آونگی را که ساخته اید به ترتیب، با چند گلوله دیگر تعویض کنید. سپس دوره هریک را با زاویه انحراف 6 درجه اندازه بگیرید.
 - ۳- طول آونگ هایی را که ساخته اید تغییر دهید و دوره نوسان آنها را با زاویه انحراف 6 درجه اندازه بگیرید.
- نتیجه فعالیت گروه را در کلاس به بحث بگذارید.

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

۳-۶- تشدید

در بخش‌های قبل دیدیم که وقتی یک نوسانگر ساده نظیر آونگ و یا دستگاه وزنه - 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 دوره) نوسان طبیعی از ویژگی‌های ساختاری نوسانگر است؛ مثلاً، بسامد آونگ ساده کم دامنه به طول آونگ (I) بستگی دارد؛ یعنی، اگر با دادن انرژی به یک آونگ دامنه نوسان آن را افزایش دهیم (به طوری که زاویه 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، دامنه نوسان آن به تدریج 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 دوره وارد کردن نیرو با دوره نوسان تاب برابر است. با اعمال این نیرو دامنه 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.



شکل ۳-۱۳

مطابق شکل ۳-۱۳ به یک طناب افقی آونگ‌های ساده‌ای با طول‌های متفاوت ولی جرم یکسان بیاویزید، به طوری که طول آونگ‌های شماره ۲ و ۵ با یکدیگر برابر باشد. اکنون آونگ شماره 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 نتیجه کار گروه را به کلاس گزارش دهید.

در این فعالیت با نوسان آونگ شماره ۵ آونگ‌های ۱ و ۳ و ۴ نیز به نوسان درمی‌آیند، اما پس از چند نوسان می‌ایستند؛ ولی آونگ شماره ۲ که دوره آن با آونگ شماره 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، دامنه نوسان تا مقدار بیشینه‌ای افزایش می‌یابد و از آن پس، حرکت نوسانی بدون کاهش دامنه ادامه می‌یابد. در این صورت می‌گوییم پدیده 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 ۳-۴ 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 ۳-۱

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

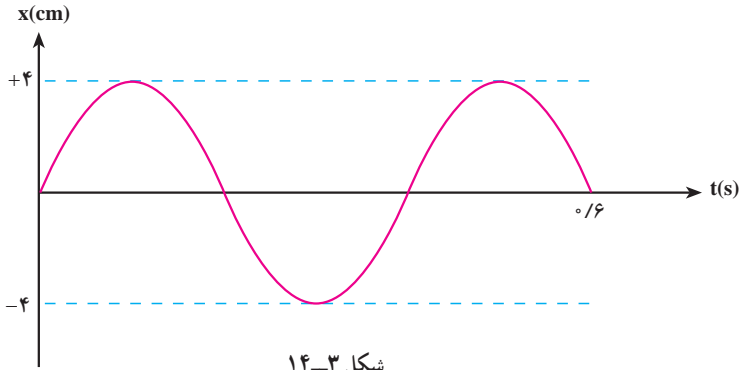
پدیده تشدید ممکن است مفید و یا برعکس مشکل‌زا باشد؛ مثلاً، در ساعت کوکی این پدیده مفید است. فنر کوک شده یک نیروی دوره‌ای بر رفاصک ساعت اعمال می‌کند که بسامد آن با بسامد نوسان رفاصک برابر است و در نتیجه تشدید رخ می‌دهد و باعث می‌شود که حرکت نوسانی رفاصک ادامه یابد. پدیده تشدید ممکن است اثر مخرب نیز داشته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

- ۱- توضیح دهید در حرکت هماهنگ ساده وزنه - فنر، اگر دامنه نوسان دو برابر شود، چه تغییری در دوره، بیشینه سرعت و انرژی مکانیکی نوسانگر ایجاد می‌شود؟
 - ۲- جهت سرعت و شتاب را در حرکت هماهنگ ساده، در دو حالت الف و ب، با هم مقایسه کنید و درباره نتیجه این مقایسه توضیح دهید.
 - الف) نوسانگر به مبدأ (وضع تعادل) نزدیک می‌شود.
 - ب) نوسانگر از مبدأ دور می‌شود.
 - ۳- آیا در حرکت هماهنگ ساده اندازه و جهت نیروی بازگرداننده ثابت است؟ آیا امکان دارد این نیرو با بردار مکان جسم از مبدأ هم جهت باشد؟ توضیح دهید.
 - ۴- اگر بیشینه سرعت نوسانگر وزنه - فنری دو برابر شود، انرژی کل آن چند برابر می‌شود؟
 - ۵- در لحظه‌ای که انرژی جنبشی یک نوسانگر وزنه - فنر ۳ برابر انرژی پتانسیل آن است مکان نوسانگر چند برابر دامنه نوسان آن است؟ سرعت و شتاب نوسانگر در این لحظه به ترتیب، چند برابر بیشینه سرعت و بیشینه شتاب نوسانگر است؟
 - ۶- دامنه نوسان یک حرکت هماهنگ ساده $m \cdot 10^{-2} \times 3$ و بسامد آن ۵ هرتز است. معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان - زمان آن را در یک دوره رسم کنید.
 - ۷- معادله حرکت، سرعت و شتاب هماهنگ ساده‌ای را بنویسید که دامنه آن ۴ cm و دوره آن ۴ s است. نمودار مکان - زمان، سرعت - زمان و شتاب - زمان را در یک دوره رسم کنید.
 - ۸- معادله حرکت هماهنگ ساده یک نوسانگر در SI به صورت $x = 0.05 \sin(2\pi t)$ است.
- الف) در چه زمانی پس از لحظه 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؟

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

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

ب) چه زمانی پس از لحظه صفر، برای اولین بار به ترتیب، سرعت و شتاب آن بیشینه می‌شود؟



۱۰- پیستون‌های یک اتومبیل ۴ سیلندر در حالت خلاص تقریباً حرکت نوسانی ساده دارند.

اگر دامنه نوسان آنها ۵۰ میلی‌متر و بسامد آن ۱۱۰ هرتز باشد، کمیت‌های زیر را به دست آورید.

الف) بیشینه سرعت پیستون‌ها

ب) بیشینه شتاب نوسان آنها

موج های مکانیکی



۴

فصل

موج‌های مکانیکی

نگاهی به فصل: مبحث موج یکی از مباحث‌های 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؛ این گونه موج‌ها را موج‌های مکانیکی می‌نامند. تشکیل موج بر سطح آب را کد، 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 (خلاء) نیز منتشر شوند، موج‌های الکترومغناطیسی نامیده می‌شوند؛ برای مثال، هم‌اکنون که در حال خواندن این نوشته‌ها هستید، اطلاعات را به صورت نوری که از صفحه 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 نقطه دیگر منتقل کنند.

۴-۱- موج

پیش از این با نیروی کشسانی فنر آشنا شدیم. اگر در یک فنر تغییر طولی ایجاد کنیم، بین هر دو حلقه مجاور فنر نیروی کشسانی به وجود 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، مایع‌ها و گازها محیط‌های کشسان هستند مثلاً اگر

یک تیغه فنری را خم کرده و رها کنیم، به حالت اول برمی‌گردد. اگر تویی 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 بیستون را به درون آن فرو ببریم و رها کنیم، بیستون به حالت اول برمی‌گردد. در همه این مثال‌ها، تیغه فنری، آب و هوای درون سرنگ محیط‌هایی کشسان هستند.

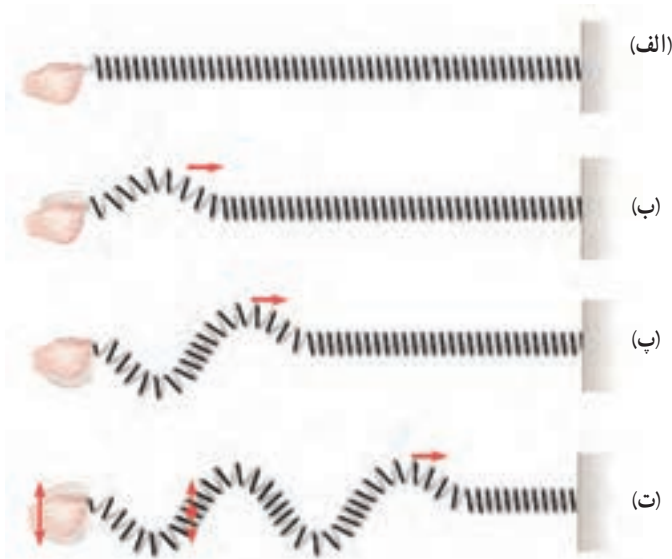
فعالیت ۱-۴

طناب درازی را به نقطه‌ای محکم کنید و آن را بکشید (شکل ۱-۴ الف). اکنون مطابق شکل ۱-۴ ب تغییر شکلی در آن ایجاد کنید. رفتار بعدی طناب را مشاهده و نتیجه مشاهده‌های خود را به کلاس گزارش کنید. همین آزمایش را با یک فنر تکرار کنید.



شکل ۱-۴

یک محیط کشسان در حال تعادل را در نظر 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 در نظر بگیرید که روی یک سطح افقی صاف به حال سکون قرار دارد (شکل ۲-۴ الف). اگر مطابق شکل ۲-۴ ب، چند حلقه فنر را به یک سمت بکشیم و تغییر شکلی در آن ایجاد کرده و آن را رها کنیم، می‌بینیم که حلقه‌های جابه‌جا شده به جای 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 ۲-۴ پ و ت) علت انتقال تغییر شکل، وجود نیروی بازگرداننده بین حلقه‌های فنر است.



شکل ۲-۴

به همین ترتیب، هرگاه تغییر شکلی (و یا آشفستگی) در یک جزء از محیط کشسانی که به حال 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 تپ و انتقال تپ در محیط را انتشار می‌گوییم.

فعالیت ۲-۴

سنگ کوچکی را از بالای سطح آب آرام استخر یا برکه‌ای رها کنید و آنچه را که رخ می‌دهد به دقت مشاهده کنید. نتیجه مشاهده خود را به کلاس گزارش کنید.

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

نوسان دیپازون با دامنه ثابت

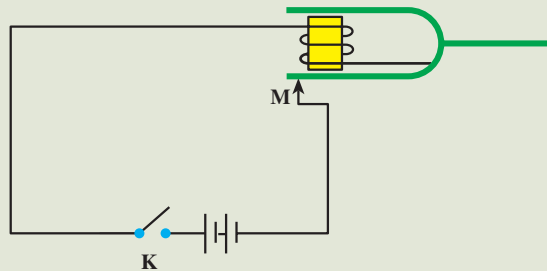
دیپازون، دو شاخه‌ای مانند شکل ۳-۴ است که اگر به یکی از شاخه‌های آن



شکل ۳-۴

ضربه‌ای وارد کنیم، هر دو شاخه با حرکت هماهنگ ساده نوسان می‌کنند. این نوسان میرا است و دیپازون بعد از تعدادی نوسان از حرکت باز می‌ایستد. برای آنکه نوسان‌های دیپازون ادامه یابد، می‌توان آن را در مدار الکتریکی مانند شکل ۴-۴ قرار داد. در این مدار، توسط آهنربای الکتریکی، نیروی مغناطیسی‌ای به طور دوره‌ای، بر شاخه‌های دیپازون (که خود از ماده مغناطیسی ساخته شده است) وارد و آن را به نوسان دائم وادار

می‌کند. با اتصال کلید K جریان الکتریکی در مدار برقرار و شاخه‌های دیپازون، جذب آهنربای الکتریکی می‌شوند. در نتیجه در نقطه M ، شاخه دیپازون از مدار جدا شده و جریان الکتریکی نیز قطع می‌شود. با قطع جریان، خاصیت مغناطیسی از بین می‌رود و شاخه‌های دیپازون به جای اول برمی‌گردند و دوباره اتصال برقرار می‌شود و این عمل ادامه می‌یابد. به این ترتیب، نوسان‌های دیپازون پایدار می‌ماند.



شکل ۴-۴

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



ب - نوسان‌های دست، در فنر موج دوره‌ای به صورت تراکم و انبساط ایجاد کرده است.



الف - دست با نوسان خود در طناب موجی دوره‌ای به صورت برجستگی و فرورفتگی ایجاد کرده است.

پ - موج‌های ایجاد شده در سطح آب به صورت دایره‌های متوالی برجسته و فرورفته منتشر می‌شوند.



شکل ۴-۵



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

بسامد موج: وقتی یک چشمه موج با بسامد

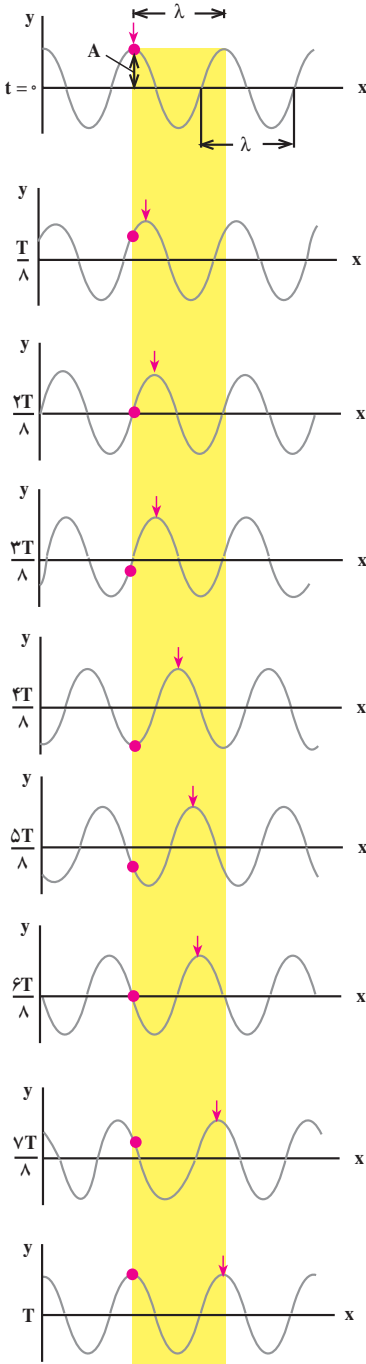
۷ در محیطی کشسان شروع به نوسان می‌کند، ذره‌های مجاور خود را نیز با همان بسامد به نوسان وامی‌دارد. به همین ترتیب، همه ذره‌های محیط با همان بسامد چشمه موج به نوسان درمی‌آیند.

شکل ۴-۶ - الف تا ت چگونگی نوسان یک

ذره محیط را که با رنگ قرمز مشخص شده است، ضمن انتشار موج نشان می‌دهد.

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

انتشار موج: شکل ۷-۴ حالت های مختلف



شکل ۷-۴ انتشار موج در طناب

طنابی را نشان می دهد که در آن موجی سینوسی منتشر می شود. در این شکل ها، یک قله موج را با پیکان مشخص کرده ایم. در حالت های مختلف شکل مشاهده می شود که پیکان که جهت محور x جابه جا می شود که نشان دهنده پیشروی موج در طول طناب است. این شکل ها، وضعیت نقطه های مختلف طناب را در بازه های زمانی $\frac{T}{8}$ نشان می دهد. اگر در یک لحظه معین یکی از نقطه های طناب در قله موج باشد و پس از t ثانیه نقطه دیگری که به فاصله x از آن واقع است به همان وضعیت برسد، سرعت پیشروی موج که آن را سرعت انتشار می نامیم برابر است با:

$$v = \frac{x}{t} \quad (۱-۴)$$

سرعت انتشار موج در یک محیط به ویژگی های فیزیکی محیط (جنس، دما و...) بستگی دارد اما به شرایط فیزیکی چشمه موج (سامد، دامنه و...) بستگی ندارد؛ برای مثال، سرعت انتشار موج در یک طناب که با نیروی کشیده شده است، به نیروی کشش طناب و نیز به جرم واحد طول آن بستگی دارد. سرعت انتشار موج عرضی (در همین فصل با موج های طولی و عرضی آشنا می شویم) در طناب (و یا در تار) یکنواختی به جرم m و طول L از رابطه زیر به دست می آید:

$$v = \sqrt{\frac{F}{m/L}} \quad (۲-۴ الف)$$

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

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

در نتیجه، سرعت انتشار موج در یک طناب را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (4-2) \text{ ب}$$

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

مثال ۱-۴

رسمانی به طول یک متر و جرم 100 g بین دو نقطه محکم کشیده شده است. اگر نیروی کشش ریسمان برابر 4 N باشد، سرعت انتشار موج‌های عرضی را در این طناب، محاسبه کنید.

پاسخ

ابتدا جرم واحد طول ریسمان را محاسبه می‌کنیم:

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

$$\mu = \frac{0.1}{1} = 0.1 \text{ kg/m}$$

اکنون به کمک رابطه ۴-۲ ب سرعت انتشار را به دست می‌آوریم:

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

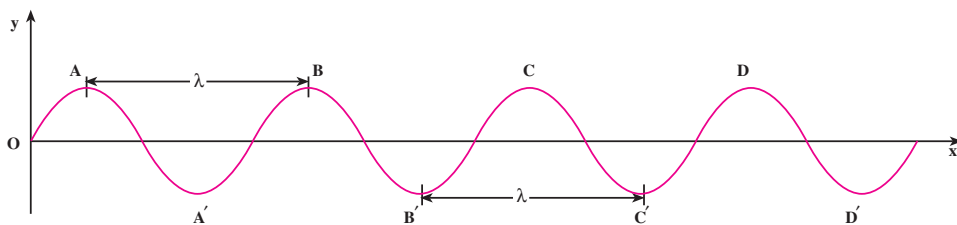
$$v = \sqrt{\frac{4}{0.1}} = 20 \text{ m/s}$$

فعالیت ۳-۴

در فعالیت ۴-۱، مشاهده انتقال تپ به دلیل آن که 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 به بحث بگذارید.

طول موج: به حالت های مختلف شکل ۷-۴ توجه کنید. در مدتی که یک نقطه محیط (مثلاً نقطه واقع در قله موج) یک نوسان انجام می دهد؛ یعنی، در مدت یک دوره T، قله موج که با علامت پیکان مشخص شده است، به اندازه پهنای نوار زرد رنگ پیش می رود اندازه این پیشروی را طول موج می نامیم و آن را با λ نشان می دهیم. اگر به هر نقطه دیگر موج، مثلاً دره موج هم توجه کنید، می بینید که در مدت یک دوره به اندازه طول موج منتقل می شود. بنابراین، طول موج را می توان به صورت مسافتی که موج در مدت یک دوره می پیماید، تعریف کرد.

در شکل ۸-۴ که انتشار موج را در یک طناب نشان می دهد، فاصله دو قله متوالی موج و یا فاصله دو دره متوالی برابر طول موج است.



شکل ۸-۴

بار دیگر به شکل ۸-۴ توجه کنید. در این شکل نقطه های دیگری نیز می توان یافت که فاصله آنها از یکدیگر برابر طول موج است. همچنین می توان دریافت که هر دو نقطه که فاصله آنها از یکدیگر برابر طول موج است، همواره در وضعیت نوسانی مشابهی قرار دارند. به چنین دو نقطه ای، نقاط هم فاز گفته می شود؛ برای مثال، نقطه های A و B و C و D همه در قله موج واقع اند و در نتیجه هم فازند. به همین ترتیب، نقطه هایی که فاصله آنها از یکدیگر دو، سه و یا $n \dots$ برابر λ (n عددی است صحیح) باشد، همواره در یک وضعیت نوسانی اند. پس می توان گفت: نقطه هایی از محیط که فاصله آنها از یکدیگر مضرب صحیحی از طول موج یا مضرب زوجی از نصف طول موج باشد، هم فازند.

اگر فاصله دو نقطه هم فاز را با Δx نشان دهیم داریم:

$$\Delta x = n\lambda = 2n \frac{\lambda}{2} \quad (۳-۴)$$

اکنون به دو نقطه متوالی طناب در شکل ۸-۴ که یکی در قله موج (نقطه A) و دیگری در دره موج (نقطه A') قرار دارد توجه کنید. اگر حرکت این دو نقطه را دنبال کنید، متوجه خواهید شد که حرکت آنها همواره در جهت های مخالف یکدیگر است. چنین دو نقطه ای را در فاز مخالف می نامیم.

فاصله 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 مخالف اند. فاصله این نقطه ها از یکدیگر مضرب فردی از نصف طول موج است. بنابراین: نقطه هایی از محیط که فاصله آنها از یکدیگر مضرب فردی از نصف طول موج باشد، در فاز مخالف اند. برای این نقطه ها داریم:

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

پرسش ۱-۴

روی شکل ۸-۴ نقطه هایی را که هم فازند و نقطه هایی را که در فاز مخالف اند پیدا کنید.

رابطه طول موج با سرعت و بسامد: اگر زمان انتشار برابر یک دوره، یعنی $t = T$ باشد، مسافتی که موج در این مدت می پیماید، برابر طول موج می شود؛ یعنی $x = \lambda$ است. با توجه به تعریف طول موج و رابطه ۱-۴ داریم:

$$\lambda = vT \quad (5-4)$$

چون دوره و بسامد، عکس یکدیگرند خواهیم داشت:

$$\lambda = vT = \frac{v}{f} \quad (6-4)$$

مثال ۲-۴

نیروی کشش طنابی 12 N و جرم واحد طول آن $30 \frac{\text{g}}{\text{m}}$ است. الف) اگر سر این طناب را با دیپازونی که بسامد آن 100 Hz 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.

$$\mu = 30 \text{ g/m} = 0.03 \text{ kg/m}$$

پاسخ

الف) با استفاده از رابطه ۲-۴ داریم:

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

$$v = \sqrt{\frac{12}{0.03}} = 20 \text{ m/s}$$

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \text{طول موج را از رابطه ۴-۶ محاسبه می‌کنیم:}$$

$$\lambda = \frac{20}{100} = 0.2 \text{ m}$$

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:

$$f_1 = f_2 = 100 \text{ Hz}$$

از رابطه ۴-۲ ب و با توجه به این که $\mu_1 = \mu_2$ است داریم:

$$\frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{F_2}{F_1}}$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{6}{12}} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

چون بسامد نوسان‌ها ثابت است، از رابطه ۴-۶ نتیجه می‌شود:

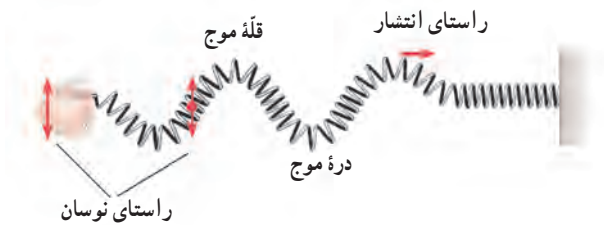
$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$\lambda_2 = 0.2 \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.14 \text{ m}$$

۴-۲- موج‌های عرضی - موج‌های طولی

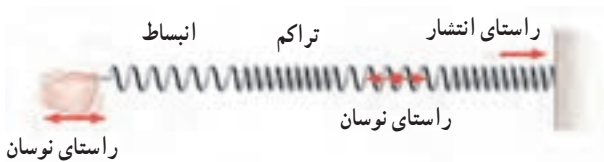
گفتیم وقتی یک چشمه موج با بسامد f در محیطی کشسان نوسان می‌کند ذره‌های مجاور خود را نیز با همان بسامد به نوسان درمی‌آورد و بدین ترتیب، همه ذرات محیط به نوسان در می‌آیند. راستای نوسان این ذره‌ها، ممکن است عمود بر راستای انتشار موج و یا موازی با آن باشد.

الف) موج عرضی: اگر راستای نوسان ذره‌های محیط، عمود بر راستای انتشار موج باشد موج را عرضی می‌نامند؛ برای مثال، موج‌های ایجاد شده در فنر در شکل ۴-۹ عرضی اند. موج عرضی در فنر و یا در طناب با قله‌ها و دره‌ها قابل تشخیص است.



شکل ۴-۹- موج عرضی در فنر

ب) موج طولی: اگر راستای نوسان ذره‌های محیط، موازی با راستای انتشار موج باشد، موج را طولی می‌نامند؛ برای مثال، در شکل ۴-۱۰ وقتی دیابازون را به نوسان درآوریم، حلقه‌های فنر به چپ و راست، یعنی در امتداد طول فنر، نوسان می‌کنند و موج طولی در طول فنر منتشر می‌شود.



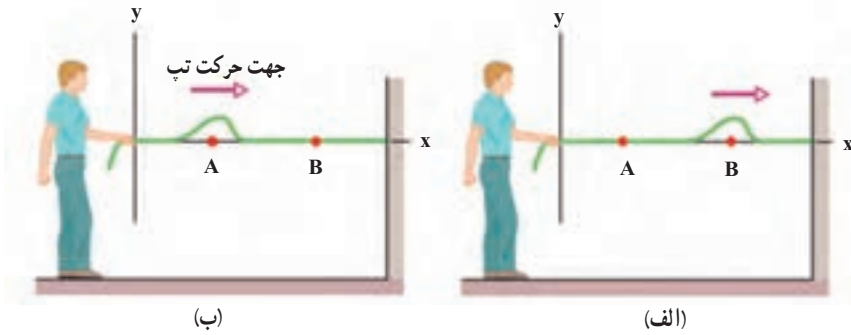
شکل ۴-۱۰- انتشار موج طولی در فنر

وقتی موج طولی در فنر منتشر می‌شود، حلقه‌های فنر به طور متناوب به هم نزدیک یا از هم دور می‌شوند. وقتی به هم نزدیک می‌شوند، حلقه‌ها متراکم شده و وقتی از هم دور می‌شوند، حلقه‌ها انبساط پیدا می‌کنند. موج طولی در فنر را با همین تراکم‌ها و انبساط‌های پی‌در پی می‌توان تشخیص داد. در فنر می‌توان هر دو نوع موج عرضی و طولی را ایجاد کرد.

۴-۳- تابع موج

وقتی یک موج در یک محیط همگن در حال انتشار است، شکل موج، در ضمن انتشار از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر تغییر نمی‌کند؛ مثلاً، اگر شکل یک تب در یک لحظه (مثلاً در $t = 0$) و در نقطه‌ی A به صورت شکل ۴-۱۱- الف باشد، بعد از Δt ثانیه (در لحظه‌ی t) این تب به نقطه‌ی B می‌رسد. شکل تب

در نقطه B و در لحظه t همان است که Δt ثانیه قبل در نقطه A بوده است (شکل ۱۱-۴ ب). به بیان دیگر، وضعیت نقطه B در لحظه t مانند وضعیت A در Δt ثانیه قبل از آن است.



شکل ۱۱-۴

اکنون فرض کنید چشمه موجی با دوره T (بسامد f) و دامنه A حرکت هماهنگ ساده ای انجام دهد و نوسان های آن با سرعت v در طنابی همگن منتشر شود. مبدأ مختصات را منطبق بر چشمه موج (ابتدای طناب) و راستای طناب را پیش از نوسان، محور x انتخاب می کنیم. وقتی چشمه به نوسان درآید، نوسان ها در طول طناب، منتشر می شوند. چشمه موج و نقطه ای از طناب که به آن متصل است در مکان $x = 0$ واقع اند. اگر جابه جایی هر نقطه طناب را از وضع تعادل خود با u نشان دهیم، وضعیت نوسانی آن با رابطه زیر بیان می شود:

$$u = A \sin \omega t = A \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (7-4)$$

موج بعد از زمان $\Delta t = \frac{x}{v}$ به نقطه ای واقع در مکان x می رسد. وضعیت این نقطه، همان گونه که قبلاً بیان شد، مانند وضعیت چشمه موج در Δt ثانیه قبل است که با جایگزین کردن مقدار « $t - \frac{x}{v}$ » به جای t در رابطه ۷-۴ مشخص می شود. بنابراین خواهیم داشت:

$$u = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = A \sin \left(\omega t - \frac{\omega x}{v} \right) \quad (8-4)$$

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

$$u = A \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x \right) \quad (9-4)$$

را با $\frac{2\pi}{\lambda}$ نشان می دهند و به آن عدد موج می گویند.

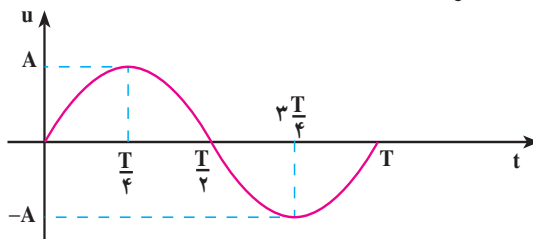
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} \quad (10-4)$$

یکای عدد موج در SI رادبان بر متر (rad/m) است؛ در نتیجه رابطه ۴-۹ به صورت زیر نوشته می شود.

$$u = A \sin(\omega t - kx) \quad (۱۱-۴)$$

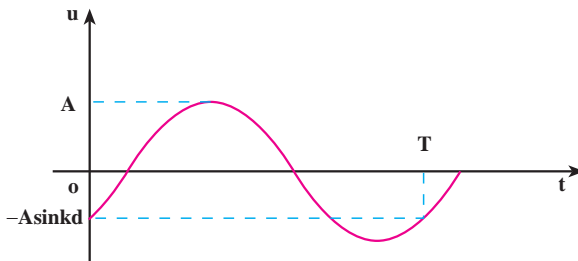
رابطه ۴-۱۱ وضعیت نوسانی نقطه ای از محیط را که به فاصله x از مبدأ مختصات (چشمه موج) واقع است، در لحظه t نشان می دهد. به این رابطه تابع موج می گوئیم.

تابع موج، تابعی دو متغیره است؛ یعنی در آن، u تابع دو متغیر زمان (t) و مکان (x) است؛ برای مثال، اگر به یک نقطه 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، لحظه ای دیگر از وضع تعادل خارج شده و فاصله آن از وضع تعادل برابر u می شود و در لحظه ای 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 بر حسب زمان (t) برای هریک از ذره های محیط به دست آورد و نمودار آن را نیز رسم کرد؛ مثلاً، این تابع برای چشمه موج که آن را مبدأ مختصات گرفته ایم ($x = 0$) به صورت $u = A \sin \frac{2\pi}{T} t$ و نمودار آن نیز به صورت زیر است:



شکل ۴-۱۲

تابع u برای یک ذره که به فاصله $x = d$ از چشمه موج واقع است، $u = A \sin(\frac{2\pi}{T} t - kd)$ خواهد بود. نمودار u برای این نقطه در شکل ۴-۱۳ آمده است. توجه کنید که شروع نمودار به بستگی دارد.



شکل ۴-۱۳

یک چشمه موج با بسامد 10^6 Hz نوسان‌هایی با دامنه 5 mm ایجاد می‌کند که با سرعت 10 m/s در امتداد محور x منتشر می‌شوند. طول موج و عدد موج را محاسبه کنید و تابع موج آن را نیز بنویسید.

پاسخ

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

با استفاده از رابطه ۴-۶ داریم:

$$\lambda = \frac{10}{10^6} = 10^{-5} \text{ m}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

با توجه به رابطه ۴-۱۰ خواهیم داشت:

$$k = \frac{2\pi}{10^{-5}} = 2 \cdot 10^5 \text{ rad/m}$$

با استفاده از رابطه ۴-۱۱ داریم:

$$u = A \sin(\omega t - kx) = A \sin(2\pi f t - kx)$$

$$u = 5 \times 10^{-3} \sin(2 \cdot 10^6 \pi t - 2 \cdot 10^5 \pi x) = 5 \times 10^{-3} \sin 2 \cdot 10^5 \pi (10^6 t - x)$$

تمرین ۱-۴

تابع موجی که در جهت محور x منتشر می‌شود برحسب یکاهای SI به صورت $u = 0.2 \sin(2\pi t - 4\pi x)$ است. دامنه، بسامد، طول موج و سرعت انتشار این موج را محاسبه کنید.

اگر موج عرضی باشد، نوسان‌دهنده‌های 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 دهنده یک موج عرضی است که نوسان آن در راستای محور y و انتشار آن در جهت محور x است:

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

(۱۲-۴)

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

$$u_x = A \sin(\omega t - kx) \quad (۱۳-۴)$$

همچنین می توان نشان داد که اگر موج در خلاف جهت محور x منتشر شود، تابع آن به صورت

زیر خواهد بود :

$$u_x = A \sin(\omega t + kx) \quad (۱۴-۴)$$

در رابطه های ۱۲-۴ و ۱۴-۴ به $\phi = \omega t - kx$ و یا $\phi = \omega t + kx$ ، فاز موج گفته می شود. چون شکل موج در هنگام انتشار تغییر نمی کند؛ فاز آن هم با گذشت زمان و انتشار موج، ثابت می ماند.

تمرین ۲-۴

نشان دهید که در تابع های $u = A \sin(\omega t - kx)$ و $u = A \sin(\omega t + kx)$ به ترتیب، سرعت های انتشار موج مثبت و منفی است؛ یعنی این تابع ها، موج هایی را نشان می دهند که در جهت محور x و در خلاف جهت آن منتشر می شوند.

تمرین ۳-۴

نقش یک موج را در لحظه ای مانند شکل ۴-۸ در نظر بگیرید. نشان دهید نقاطی که وضعیت نوسانی یکسان در دو لحظه دارند دارای اختلاف فاز $2n\pi$ است که $(n = 0, 1, \dots)$ و نقاطی که دارای وضعیت نوسانی قرینه اند دارای اختلاف فاز $(2m - 1)\pi$ است که $(m = 1, 2, \dots)$.

مثال ۴-۴

با دیافازونی به بسامد 50 Hz سر طناب کشیده شده ای را به نوسان درمی آوریم. دامنه نوسان ها 5 mm در راستای محور y و سرعت انتشار موج در طناب برابر 100 m/s و نوسان ها در جهت مثبت محور x منتشر می شود. الف) تابع موج ایجاد شده در طناب را بنویسید.

ب) معادله نوسان نقطه M از طناب را که به فاصله ۲۵cm از سر طناب (نقطه O) واقع است بنویسید.

پاسخ

الف) با استفاده از رابطه های $\omega = 2\pi f$ ، $\lambda = \frac{v}{f}$ و $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ داریم:

$$\omega = 2\pi f = 100\pi \text{ rad/s}$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{100}{50} = 2 \text{ m}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{2} = \pi \text{ rad/m}$$

با استفاده از رابطه ۴-۱۲ داریم:

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

$$u_y = 5 \times 10^{-2} \sin(100\pi t - \pi x)$$

$$x = 0.25 \text{ m} = \frac{1}{4} \text{ m}$$

ب) برای نقطه یاد شده داریم:

با قرار دادن مقدار x در تابع موج، نتیجه می شود:

$$u_{M} = 5 \times 10^{-2} \sin\left(100\pi t - \frac{\pi}{4}\right)$$

تمرین ۱۴-۱۴

چشمه موجی نوسان هایی با بسامد 20 Hz و دامنه 5 cm در یک محیط کشسان و در راستای محور y انجام می دهد. اگر این نوسان ها در خلاف جهت محور x و با سرعت 10 m/s در این محیط منتشر شوند:

الف) طول موج و عدد موج را محاسبه کنید.

ب) تابع این موج را بنویسید.

ب) کمترین فاصله نقطه M از چشمه موج چه اندازه باشد تا با چشمه موج در فاز مخالف قرار گیرد.

فاصله دو نقطه محیط از یکدیگر : محیطی را در نظر بگیرید که در آن موجی در حال انتشار

است. معادله نوسان دو نقطه A و B از این محیط که در یک جهت انتشار موج و به فاصله x_B و x_A از مبدأ مختصات واقع اند، با توجه به رابطه ۴-۱۲، به صورت زیر است :

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

اختلاف فاز این دو نقطه برابر است با :

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

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

$$|\Delta\phi| = \frac{2\pi}{\lambda} |\Delta x| = k |\Delta x| \quad (15-4)$$

از رابطه ۴-۱۵ با معلوم بودن اختلاف فاز دو نقطه محیط که در یک جهت انتشار موج اند، می توان فاصله دو نقطه را از یکدیگر (یعنی Δx) محاسبه کرد.

رابطه ۴-۱۵ نشان می دهد که اختلاف فاز دو نقطه محیط که به فاصله $\Delta x = 1\text{m}$ از یکدیگر و در یک جهت انتشار موج اند، برابر است با :

$$\Delta x = 1\text{m}$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} = k \quad (16-4)$$

رابطه ۴-۱۶ را می توان تعریفی برای عدد موج دانست و گفت : عدد موج برابر اختلاف فاز دو نقطه محیط است که به فاصله یک متر از یکدیگر قرار دارند.

مثال ۴-۵

موجی در یک محیط، در حال انتشار است. معادله نوسانی نقطه های A و B از این محیط، در SI، به صورت $u_B = 0.2 \sin(5\pi t - 0.4\pi)$ و $u_A = 0.2 \sin(5\pi t - 0.7\pi)$ است؛ اگر موج از نقطه A به نقطه B برود، کمترین فاصله دو نقطه را از یکدیگر به دست آورید. سرعت انتشار موج 20 m/s است.

پاسخ

ابتدا بسامد نوسان ها و سپس طول موج را محاسبه می کنیم :

$$\omega = 2\pi f$$

$$2\pi f = 50\pi \Rightarrow f = 25\text{Hz}$$

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

$$\lambda = \frac{20}{25} = 0.8\text{m} = 80\text{cm}$$

اکنون اندازه اختلاف فاز دو نقطه را محاسبه می‌کنیم:

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

$$\Delta\varphi = 0.7\pi - 0.4\pi = 0.3\pi\text{rad}$$

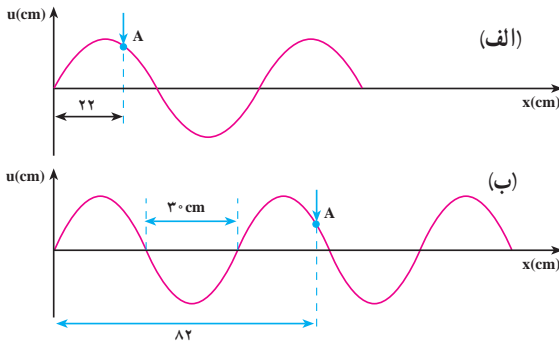
با استفاده از رابطه $15-4$ داریم:

$$\frac{3\pi}{10} = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta x = \frac{2\pi}{80}\Delta x \Rightarrow \Delta x = AB = 12\text{cm}$$

فعالیت ۱۴-۱۴

با استدلال توضیح دهید که چرا در مثال ۵-۴، Δx کمترین فاصله دو نقطه از محیط است که در یک جهت انتشار موج واقع‌اند.

تمرین ۵-۱۴



شکل ۱۴-۴

شکل های ۱۴-۴ الف

(الف)

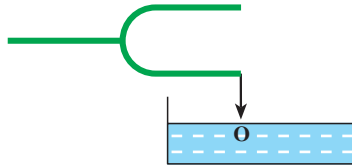
و ب، نقش یک موج را در دو لحظه t_1 و t_2 نشان می‌دهد که در امتداد محور x منتشر می‌شود. علامت پیکان، یک نقطه از موج را در این دو لحظه نشان می‌دهد. با فرض اینکه محور قائم، لزوماً محور y نیست مطلوب است:

(الف) این موج طولی است یا عرضی و عدد موج آن چه اندازه است؟

(ب) اگر بسامد نوسان‌ها 25Hz باشد، $\Delta t = t_2 - t_1$ چند ثانیه است؟

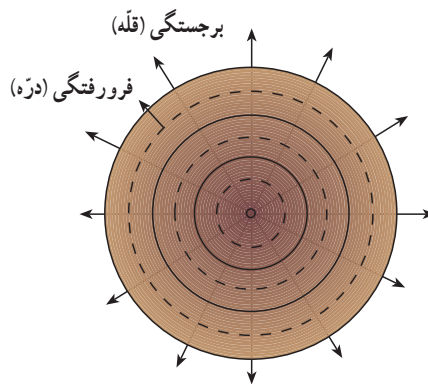
۴-۴- انتشار موج در دو و سه بُعد

اگر مطابق شکل ۱۵-۴ به کمک یک سوزنی که به انتهای یک شاخهٔ دیاپازون نصب شده است، ضربه‌هایی را در راستای قائم بر سطح آب درون تشتک وارد کنیم، موج‌های ایجاد شده به صورت دایره‌هایی به مرکز چشمهٔ موج، در سطح آب، یعنی در دو بُعد منتشر می‌شوند.



شکل ۱۵-۴

در شکل ۱۶-۴ دو دسته دایره می‌بینید. دایره‌های توپر، برجستگی‌ها و دایره‌های خط‌چین، فرورفتگی‌ها را در سطح آب نشان می‌دهند. به این دایره‌های در حال انتشار جبههٔ موج می‌گوییم و آن را چنین تعریف می‌کنیم: جبههٔ موج مکان هندسی نقطه‌هایی از محیط است که در آن نقطه‌ها تابع موج دارای فاز یکسانی است. بنابراین، اختلاف فاز نقطه‌های واقع بر یک جبههٔ موج همواره برابر صفر است.

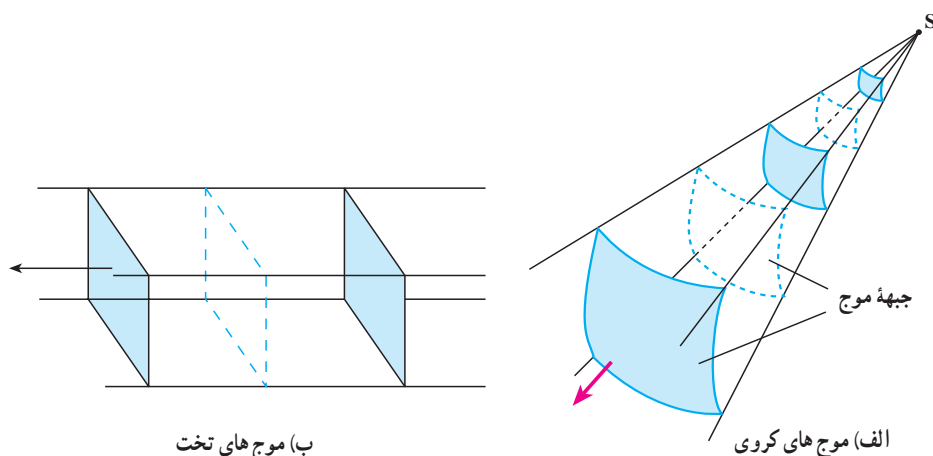


شکل ۱۶-۴

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

موج در سه بُعدند. اگر یک چشمه موج نقطه‌ای را در یک محیط همسانگرد سه بُعدی قرار دهیم (مثلاً بلندگوی کوچکی در هوای درون اتاق)، جبهه موج به صورت کره‌هایی خواهد بود که مرکز همه آنها، چشمه موج است و از چشمه موج در سه بُعد منتشر می‌شوند و شعاع آنها با انتشار موج به تدریج افزایش می‌یابد. به این موج‌ها، موج کروی می‌گوییم. شکل ۴-۱۷-الف قسمت‌های کوچکی از سطح موج‌ها را که از چشمه موج نقطه‌ای S گسیل می‌شوند نشان می‌دهد.

در فاصله بسیار دور از یک چشمه موج نقطه‌ای، قسمت‌های کوچکی از جبهه موج‌های کروی، همان گونه که در شکل ۴-۱۷-ب نشان داده شده است، به صورت صفحه‌هایی موازی یکدیگر درمی‌آیند. در این صورت به آنها موج تخت می‌گوییم.



شکل ۴-۱۷

موج حامل انرژی است: موج‌ها با خود انرژی را از نقطه‌ای به نقطه دیگر منتقل می‌کنند. اگر یک سر طنابی در دست شما باشد و از سر دیگر آن موجی به طرف شما منتشر شود، وقتی موج به دست شما می‌رسد، ضربه 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 دامنه 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 نقطه طناب تابعی از زمان است و با گذشت زمان تغییر می‌کند. مقدار متوسط توان انتقال انرژی از هر نقطه طناب در مدت زمان

یک دوره (T) از رابطه زیر به دست می آید

$$\bar{P} = 2\pi^2 A^2 f^2 \mu v \quad (17-4)$$

که در آن، μ ، جرم واحد طول طناب و v سرعت انتشار موج در طناب است. اینکه مقدار متوسط توان انتقال انرژی از هر نقطه 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 می رسد، چه پدیده ای رخ می دهد؟

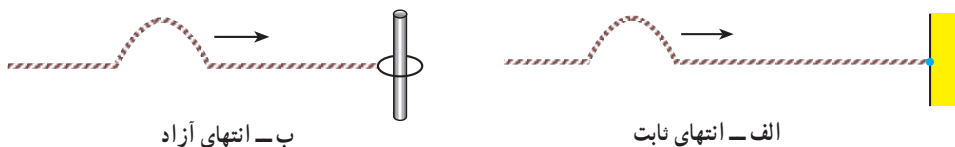
وقتی موج، به انتهای محیط می رسد، مقداری از انرژی این موج از مرز مشترک دو محیط عبور می کند و وارد محیط دوم می شود و بقیه آن از مرز مشترک بازتاب شده و به محیط اول برمی گردد.

برای بررسی پدیده بازتاب، باید اولاً، فرض کنیم که تمام انرژی موج از مرز مشترک دو محیط بازتاب شده و به محیط اول برمی گردد؛ ثانیاً، اصطکاک ناچیز است و انرژی موج هم تلف نمی شود. این بررسی ساده تر و آموزنده است.

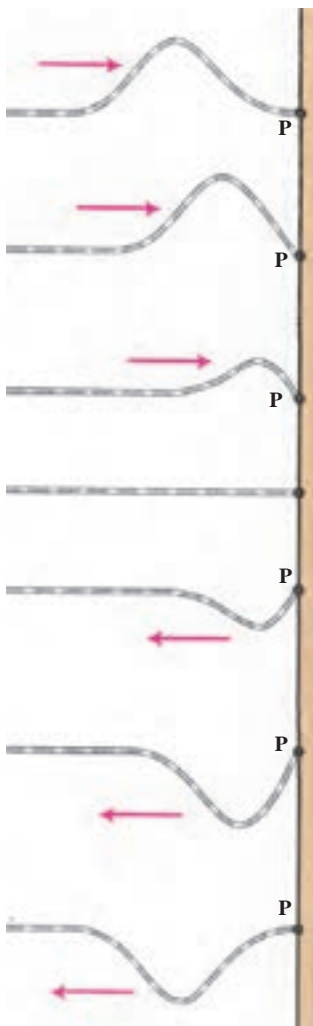
نتیجه به دست آمده در این مورد و در مورد دیگر موج های مکانیکی، نظیر موج های صوتی و موج های الکترومغناطیسی، نیز درست است.

بازتاب تپ (موج) از انتهای طناب به نحوه 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 می نامیم (شکل ۱۸-۴ الف) و همچنین ممکن است انتهای طناب به حلقه بسیار سبکی وصل شده باشد و روی میله قائمی بدون اصطکاک بتواند، بالا و پایین برود (شکل ۱۸-۴ ب). در این حالت، انتهای طناب انتهای آزاد نامیده می شود.

بدین ترتیب، انتهای ثابت نمی تواند نوسان کند، در صورتی که انتهای آزاد برای نوسان آزاد است.



شکل ۱۸-۴



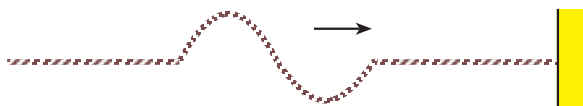
بازتاب از انتهای ثابت: وقتی تپ مطابق شکل ۱۹-۴

به انتهای ثابت P می‌رسد، جزء کوچکی از طناب که در مجاورت نقطه P قرار دارد، به آن نیرویی رو به بالا وارد می‌کند تا نقطه P را به نوسان وادارد. نقطه P از طناب، روی دیوار ثابت است و نمی‌تواند جابه‌جا شود. بنا به قانون سوم نیوتون، نقطه 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 چشمه 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 حالت‌های مختلف شکل ۱۹-۴ توجه کنید). تپ بازتابیده، در خلاف جهت تپ تابشی، روی طناب منتشر می‌شود.

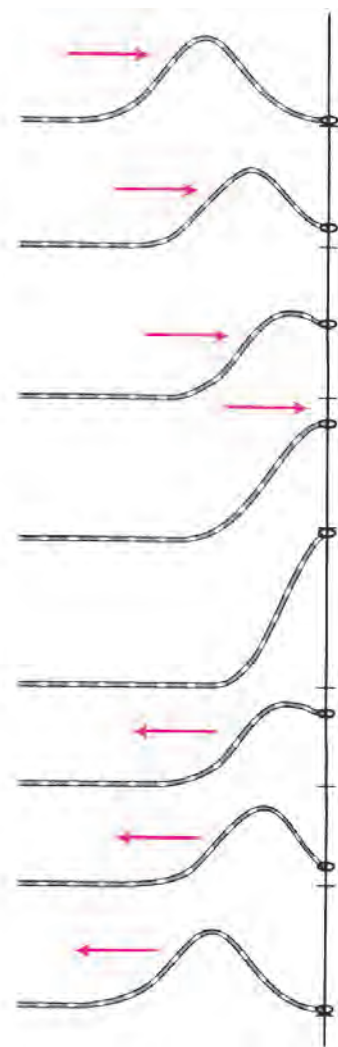
شکل ۱۹-۴ - انتهای طناب ثابت است.

تمرین ۴-۷

در شکل ۲۰-۴ تپی روی طنابی در حال انتشار است. شکل تپ بازتاب آن را از انتهای ثابت طناب، رسم کنید.



شکل ۲۰-۴

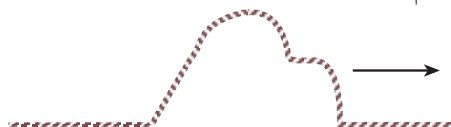


شکل ۴-۲۱- انتهای طناب آزاد است.

بازتاب از انتهای آزاد: اگر انتهای طناب آزاد باشد، وقتی تپ به آن می‌رسد، انتهای طناب را در جهت خود به حرکت درمی‌آورد. در شکل ۴-۲۱ تپ تابشی، انتهای طناب را بالا می‌کشد. در این حالت همان طور که شکل نشان می‌دهد، انتهای طناب به قله‌ای می‌رسد که جابه‌جایی آن از وضع تعادل، دو برابر جابه‌جایی سایر نقطه‌های طناب است. در این حالت، انتهای طناب، مانند چشمه 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 به جای اول برگردانیم؛ بنابراین، در انتهای آزاد، برجستگی به صورت برجستگی و فرورفتگی به صورت فرورفتگی، بازتاب می‌شود.

تمرین ۷-۴

تپی مانند شکل ۴-۲۲ در طنابی در حال انتشار است. شکل تپ بازتابی آن را از انتهای آزاد طناب، رسم کنید.



شکل ۴-۲۲

۴-۵- اصل برهم نهی موج ها

وقتی در یک مکان شلوغ و پرسر و صدا در حال حرکت هستید، صداهاى مختلفی از چشمه های صوتی متفاوت به گوش شما می رسد. هرچند انسان قادر است، گوش خود را روی صدای خاصی متمرکز کند و آن صدا را بشنود، اما صداهاى مختلف همگی و با هم در هوا منتشر می شوند و انتشار یک صوت، مانع انتشار صوت های دیگر نمی شود.



شکل ۴-۲۳

به شکل ۴-۲۳ نگاه کنید، در سطح آب دریاچه، موج هایی هم زمان در حال انتشارند. این موج ها، هر یک به طور مستقل به انتشار خود ادامه می دهند. مثال های بالا به طور عملی نشان دهنده اصلی به نام اصل برهم نهی هستند. مطابق این اصل:

هر موج در حال انتشار، بدون

آنکه برای انتشار سایر موج ها

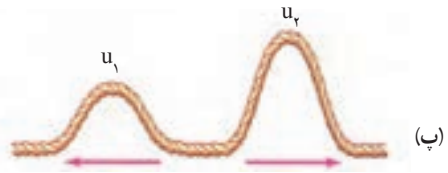
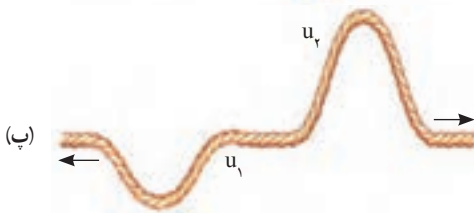
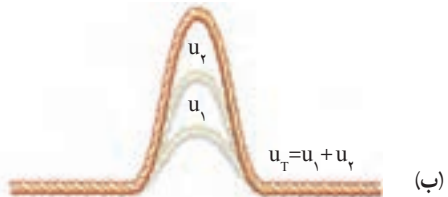
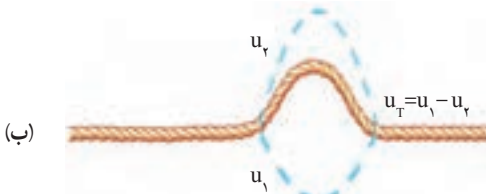
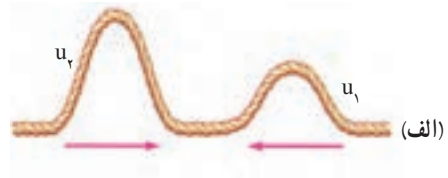
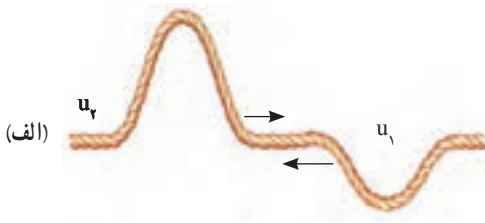
مزاحمتی ایجاد کند، از آنها عبور کرده و به انتشار خود ادامه می دهد. درست مانند آنکه هیچ موج دیگری در محیط منتشر نمی شود. در نقطه ای که دو و یا چند موج با هم تلاقی می کنند، جابه جایی ذره ای از محیط که در آن نقطه است، برابر برابند جابه جایی های حاصل از هر یک از موج هاست.

$$\vec{u}_T = \vec{u}_1 + \vec{u}_2 + \dots$$

(۴-۱۸)

به حالت های مختلف شکل ۴-۲۴ نگاه کنید. در حالت (الف) دو تپ عرضی در طول طناب به طرف یکدیگر در حال انتشارند. این دو تپ در حالت (ب) به یکدیگر رسیده اند و چون جابه جایی حاصل از دو تپ، هم جهت اند، برابند آنها برابر مجموع اندازه جابه جایی های حاصل از هر یک شده است. در حالت (ب) می گوئیم: برهم نهی موج ها سازنده است. در حالت (پ) دو تپ از یکدیگر عبور کرده و به انتشار خود ادامه داده اند.

در حالتی که جابه جایی ها در خلاف جهت یکدیگر باشند جابه جایی برابند برابر تفاضل اندازه جابه جایی هایی است که هر تپ به تنهایی در جزیی از طناب که با هم به آن رسیده اند، ایجاد می کند. به حالت های مختلف شکل ۴-۲۵ توجه کنید. در حالت (ب) می گوئیم: برهم نهی موج ها، ویرانگر است.



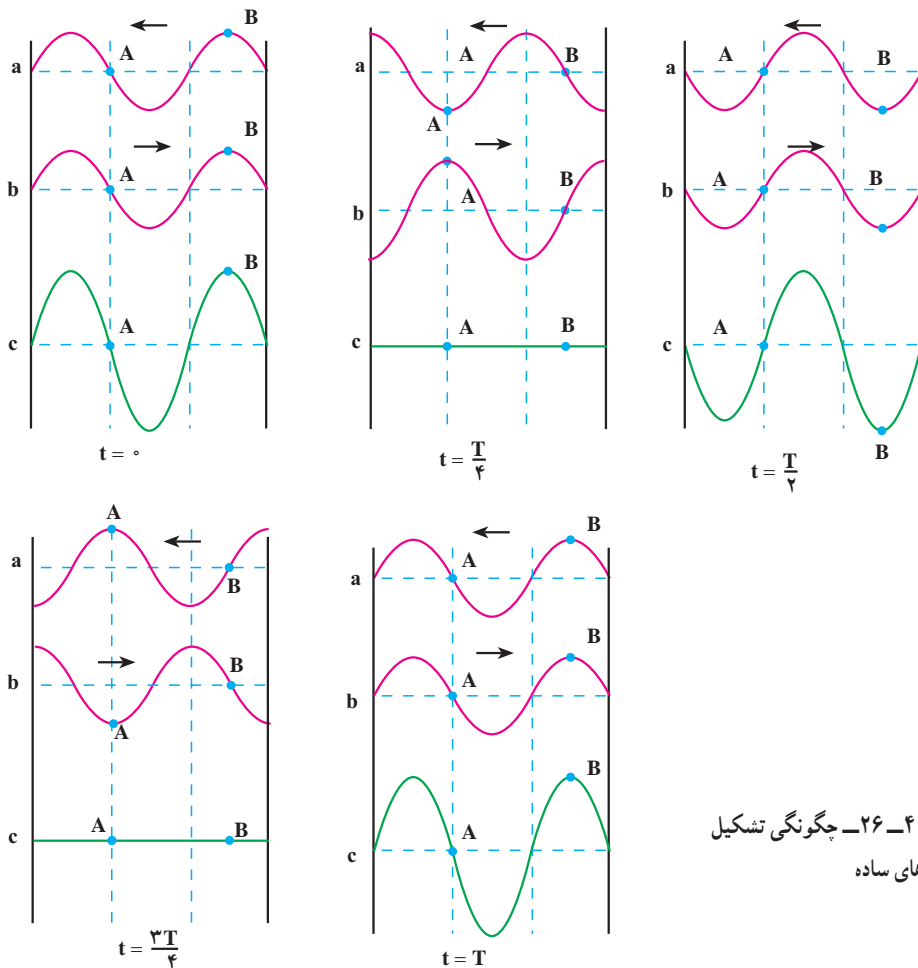
شکل ۲۵-۴

شکل ۲۴-۴

برهم نهی موج ها در یک بُعد؛ موج های ایستاده : فرض کنید که دو چشمه 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 نوسان هایی هم راستا ایجاد کنند. موج های حاصل از این دو چشمه یکسان، به سوی یکدیگر، منتشر می شوند. وقتی هر یک از دو موج در تمام طول طناب گسترده شده باشد، به هر جزء طناب در هر لحظه دو موج می رسد. بنا به اصل برهم نهی، جابه جایی هر جزء طناب در هر لحظه، برابر برابند جابه جایی های است که هر یک از دو موج در آن لحظه در آن جزء ایجاد می کنند. وضعیت نوسانی هر نقطه بستگی به مکان آن نقطه در طناب دارد. از برهم نهی چنین دو موجی در طناب، شکل خاصی به وجود می آید که به آن **موج ایستاده** گفته می شود.

گره و شکم : به بعضی از نقطه های طناب در هر لحظه دو موج می رسد که در آن نقطه جابه جایی های یکسان اما در خلاف جهت ایجاد می کنند. در نتیجه برهم نهی دو موج در چنین نقطه هایی ویرانگر و جابه جایی آنها از وضع تعادل صفر است. به این نقطه ها که همواره ساکن می مانند گره می گویند و آنها را با N نشان می دهند. جای گره ها در طول طناب، ثابت است.

به حالت‌های مختلف شکل ۴-۲۶ توجه کنید. در این حالت‌ها و در هر یک از لحظه‌های مشخص شده، موجی را که از راست به چپ منتشر می‌شود با a و موجی را که از چپ به راست شده، 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، حالت‌های c وضعیت طناب را هنگامی که موج‌های a و b روی آن منتشر می‌شوند، در بازه‌های زمانی $\frac{T}{4}$ (دوره موج است) نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۶- چگونگی تشکیل موج‌های ساده

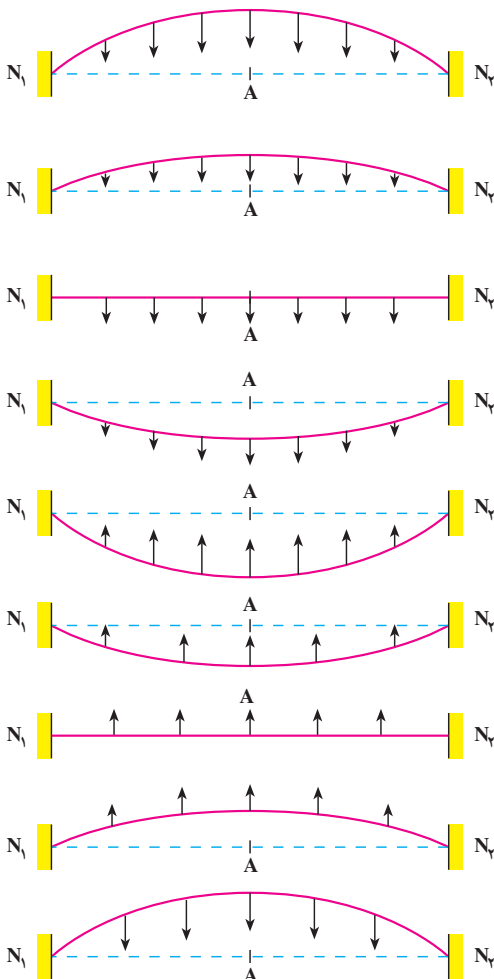
در حالت‌های مختلف شکل ۴-۲۶ به نقطه A توجه کنید. موج‌های a و b در هر لحظه به این نقطه، جابه‌جایی‌هایی هم اندازه اما در خلاف جهت می‌دهند. در نتیجه، همان‌گونه که حالت‌های c در لحظه‌های مختلف نشان می‌دهد، نقطه A همواره ساکن می‌ماند. نقطه A یک گره است.

در شکل ۴-۲۶ گره‌های دیگری نیز وجود دارند. آنها را مشخص کنید.

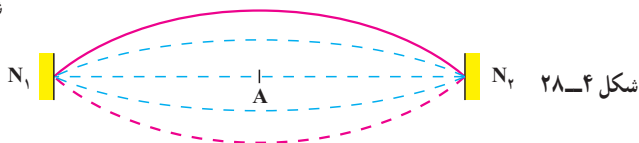
به بعضی نقطه‌های دیگر طناب نیز در هر لحظه دو موج می‌رسد، با این تفاوت که در این نقطه‌ها برهم نهی به گونه‌ای است که باعث می‌شود موج برآیند، با بیشینه دامنه نوسان کند. به این نقطه‌ها شکم، یا پادگره، می‌گویند و آنها را با A نشان می‌دهند. جای شکم‌ها نیز، مانند گره‌ها، ثابت است. در حالت‌های مختلف شکل ۴-۲۶ یکی از شکم‌ها را با نام B مشخص کرده‌ایم. نقطه B در مکانی واقع شده است که برهم نهی حاصل از دو موج a و b آن را با بیشینه دامنه به نوسان وا می‌دارد. نقطه B یک شکم است.

آیا در حالت‌های مختلف شکل ۴-۲۶ 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، فاصله دو گره متوالی برابر فاصله دو شکم متوالی و برابر نصف طول موج است. همچنین فاصله 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 رابطه معینی برقرار باشد. این رابطه به بسامد نوسان‌ها، سرعت انتشار موج در طناب (در نتیجه به نیروی کشش طناب و جرم واحد طول آن) و طول طناب بستگی دارد. علاوه بر این کمیت‌ها، این رابطه به ثابت و یا آزاد بودن انتهای طناب نیز بستگی دارد. در ادامه سعی می‌کنیم این رابطه را به دست آوریم. یکی از روش‌های ایجاد دو موج کاملاً یکسان که در خلاف جهت یکدیگر در طناب کشیده شده منتشر شوند، آن است که یک سر طناب را به کمک یک دیپازون به نوسان درآوریم. این نوسان‌ها از انتهای طناب، بازتاب شده و با موج‌های فرودی برهم نهاده می‌شوند و موج ایستاده را به وجود می‌آورند. برای بررسی، می‌توان دو حالت الف) دو سر طناب ثابت و ب) یک سر ثابت و سر دیگر آزاد را در نظر 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.



شکل ۴-۲۷



شکل ۴-۲۸

چون انتهای ثابت نمی‌تواند نوسان کند، در دو انتهای (دو سر) طناب، همواره گره ایجاد می‌شود. حالت‌های مختلف شکل ۴-۲۷ وضعیت طناب را در لحظه‌های مختلف و در یک دوره نشان می‌دهد.

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

در شکل ۴-۲۸ حالت‌های مختلف شکل ۴-۲۷ نشان داده شده است.

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

$$L = \frac{\lambda}{2} \quad (4-19)$$

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

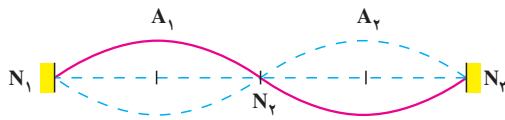
داشت:

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

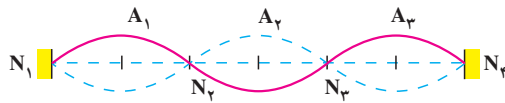
$$f_1 = \frac{v}{2L}$$

(۴-۲۰)

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 ثابت تار بازتاب می‌یابد که از برهم نهی آنها در طول سیم موج ایستاده تشکیل می‌شود. اگر یک سیم (تار مرتعش)، به گونه‌ای مرتعش شود که مانند شکل ۴-۲۷ 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 رابطه ۴-۲۰ به دست می‌آید. یک طناب (یا یک تار) را می‌توان به گونه‌ای به نوسان درآورد که تعداد گره‌ها و شکم‌های تشکیل شده در طول آن از حالت اصلی بیشتر باشد. شکل‌های ۴-۲۹ و ۴-۳۰ وضعیت‌هایی را نشان می‌دهد که در آنها به ترتیب دو و یا سه شکم تشکیل شده است.



شکل ۴-۲۹



شکل ۴-۳۰

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.

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \quad (21-4)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

رابطهٔ اخیر را می‌توان برحسب بسامد به صورت زیر نوشت:

$$f_n = \frac{nv}{2L} = nf_1 \quad (22-4)$$

روشن است که به ازای $n = 1$ ، بسامد اصلی به دست می‌آید. اگر $n = 2$ باشد ($f_2 = 2f_1$) به آن هم‌هنگ و یا مُد دوم و به همین ترتیب سوم، چهارم و... گفته می‌شود.

دو سر طنابی ثابت شده است. وقتی طناب را به ارتعاش درمی آوریم، در آن موج ایستاده تشکیل می شود. اگر طول طناب 60 cm و در آن ۳ گره ایجاد شده باشد؛ الف) طول موج و ب) بسامد نوسان طناب را به دست آورید. سرعت انتشار موج در طناب 240 m/s است.

پاسخ

الف) شکل ۴-۳۱ وضعیت نوسانی طناب را نشان می دهد. با توجه به شکل، معلوم

می شود که $n = 2$ است. با استفاده از رابطه ۴-۲۱ داریم:

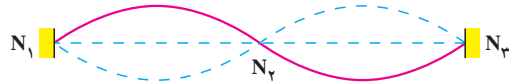
$$L = n \frac{\lambda_n}{2}$$

$$60 = 2 \frac{\lambda_2}{2}$$

$$\Rightarrow \lambda_2 = 60\text{ cm}$$

$$240 / 60 = \frac{240}{f}$$

$$\Rightarrow f = 400\text{ Hz}$$



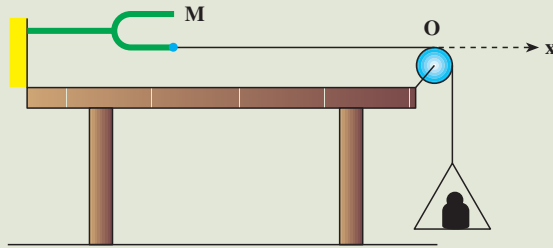
شکل ۴-۳۱

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

همان طور که دیدیم برای آنکه در طول طناب موج ایستاده تشکیل شود، باید رابطه ۴-۲۱ برقرار شود. برای برقراری این رابطه می توان طول طناب و یا نیروی کششی طناب و در نتیجه سرعت انتشار موج در طناب را تغییر داد.

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 ۴-۳۲ یک سر طناب نازکی را به دیاپازون وصل کنید و سر دیگر آن را از روی قرقره ثابتی بگذرانید و به آن کفه ای آویزان کنید. وزن کفه و وزنه درون آن، نیروی کشش را در طناب ایجاد می کند. وقتی دیاپازون را به نوسان درمی آورید، در



شکل ۴-۳۲

طناب موج ایجاد می‌شود. موج‌ها از انتهای ثابت O بازتاب می‌یابند و با موج‌های فرودی، برهم‌نهاد می‌شوند. با تغییر وزن درون کفه، می‌توانید نیروی کشش طناب و در نتیجه سرعت انتشار موج را در آن تغییر دهید. با این کار، بیشترین مقدار وزن را که به ازای آن در نقطه‌های O و M گره و در وسط آنها شکم تشکیل می‌شود، به دست آورید. با کاهش وزن درون کفه، حالت‌هایی را به وجود آورید که تعداد گره و شکم‌ها بیشتر شوند. با جایگزین کردن دیپازونی که بسامد دیگری دارد چه تغییری در آزمایش رخ می‌دهد؟ نتیجه این آزمایش را چگونه توجیه می‌کنید؟

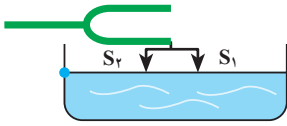
۴-۶- برهم‌نهی موج‌ها در دو بُعد - تداخل موج‌ها در سطح آب

در بخش قبل، برهم‌نهی دو موج کاملاً یکسان را در طناب یا تار بررسی کردیم. در این بخش به بررسی برهم‌نهی موج‌هایی می‌پردازیم که در دو بُعد، مثلاً در سطح آب، منتشر می‌شوند. با یک دیپازون، دو چشمه موج S_1 و S_2 را ایجاد می‌کنیم (شکل ۴-۳۳). طول سوزن‌های S_1 و S_2 با هم برابرند.



شکل ۴-۳۳

اکنون دیافازون را مطابق شکل ۴-۳۴ با سطح آب درون تشتکی در تماس قرار می‌دهیم و برای جلوگیری از بازتاب موج از روی دیواره‌های تشتک، دور تا دور دیواره را اسفنج نازکی می‌چسبانیم. در این صورت، موج‌ها وقتی به دیواره می‌رسند، توسط اسفنج، جذب می‌شوند. حال اگر دیافازون را به نوسان درآوریم، موج‌های دایره‌ای

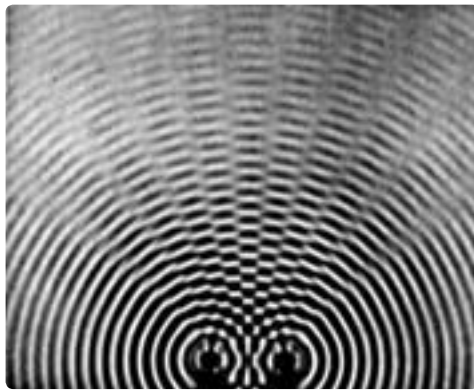


شکل ۴-۳۴

حاصل از هر یک از دو چشمه S_1 و S_2 در سطح آب منتشر می‌شوند. در نتیجه به هر ذره آب که در سطح آب تشتک قرار دارد، هم‌زمان دو موج می‌رسد. بنابراین وضعیت نوسانی ذره‌های آب، حاصل برهم‌نهی دو موجی است که با هم به هر ذره می‌رسند. در اینجا هم مانند تشکیل موج‌های ایستاده روی طناب، بعضی از ذره‌های سطح آب در هر لحظه دو موج دریافت می‌کنند که این دو موج می‌خواهند در هر ذره جابه‌جایی‌های هم‌اندازه اما در خلاف جهت یکدیگر ایجاد کنند، در نتیجه، برهم‌نهی دو موج در این نقاط، ویرانگر است و این ذره‌ها مانند گره‌ها، ساکن می‌مانند. مکان بعضی ذره‌ها طوری است که برهم‌نهی دو موجی که در هر لحظه به آنها می‌رسند، سازنده است و ذره‌های واقع در این مکان‌ها مانند شکم‌ها در موج ایستاده روی طناب، با بیشینه دامنه، نوسان می‌کنند. در طناب که محیطی یک‌بُعدی است، تعدادی نقطه گره و شکم به طور متوالی تشکیل می‌شود، اما در اینجا که سطح آن دو بُعدی است، نقطه‌های گره مشابه و نیز نقطه‌های شکم مشابه بی‌شماری وجود دارد.

شکل ۴-۳۵ تصویری را نشان می‌دهد که حاصل برهم‌نهی آزمایشی مشابه آزمایش یادشده بالا است.

این پدیده را تداخل موج‌ها می‌نامیم. شرط ایجاد چنین وضعیتی، یعنی شرط ایجاد تداخل موج‌ها آن است که دو چشمه موج، هم‌بسامد و هم‌فاز باشند.



شکل ۴-۳۵

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

۲- نوسان‌های حاصل از چشمه موجی با بسامد 200 Hz با سرعت 100 m/s در یک محیط منتشر می‌شود. اگر چشمه موج دیگری با بسامد 150 Hz را جایگزین چشمه اولی کنیم، نوسان‌های آن با چه سرعتی در این محیط منتشر می‌شود؟ برای پاسخ خود دلیل بیاورید.

۳- شکل ۴-۳۶ 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.

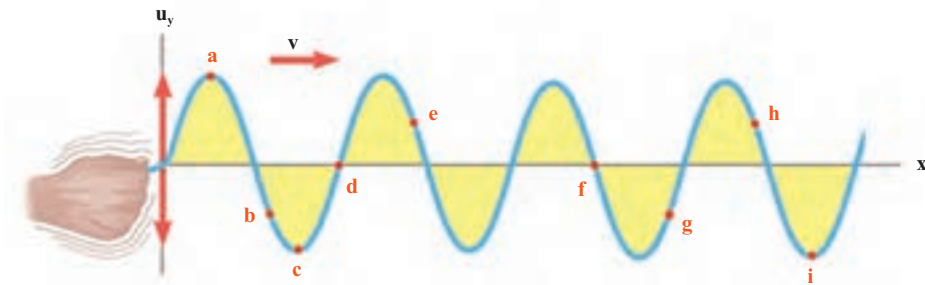
(الف) نقاط هم‌فاز را بنویسید.

(ب) نقاط با فاز مخالف را بنویسید.

(پ) شتاب نوسانی در کدام یک از نقاط صفر است؟

(ت) جهت سرعت نوسانی کدام یک 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 ۴-۳۶

۴- 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؟

۵- شکل ۴-۳۷، 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 دامنه آن نصف باشد. دامنه و طول موج را روی شکل مشخص کنید.



شکل ۴-۳۷

۶- سیمی به چگالی $7/8 \text{ g/cm}^3$ و سطح مقطع 5 mm^2 بین دو نقطه با نیروی 156 N کشیده شده است. سرعت انتشار موج را در این سیم محاسبه کنید.

۷- دو موج با بسامدهای 5 Hz و 75 Hz 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؟

۸- جرم سیم پیانویی به طول 8 m و متر برابر 6 گرم و نیروی کشش آن 432 N است. این سیم به گونه‌ای 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



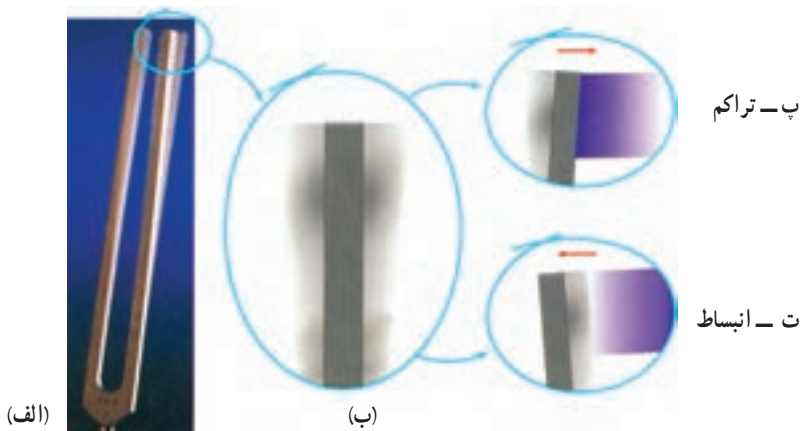
فصل

صوت

۱-۵- موج صوتی

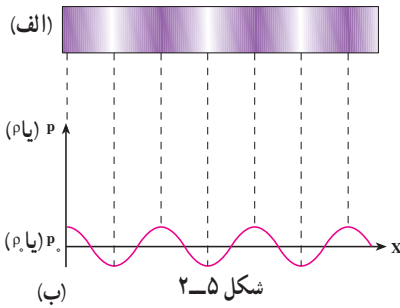
یکی از مهم ترین موج هایی که ما در زندگی روزمره با آن سروکار داریم موج صوتی است. برای مثال، از طریق این موج ها با یکدیگر گفت و گو می کنیم، با به صدا در آوردن بوق ماشین، به عابری که از خیابان عبور می کند هشدار می دهیم و ...

برای اینکه بدانیم موج های صوتی چگونه ایجاد می شوند فرایند تولید صوت به وسیله یک دیافازون را تشریح می کنیم. یک دیافازون را مطابق شکل ۱-۵ الف و ب در نظر بگیرد. قبل از ارتعاش دیافازون هوای مجاور آن در حال تعادل است و فشار و چگالی آن در همه جا ثابت و به ترتیب برابر P_0 و ρ_0 است. اکنون دیافازون را مرتعش می کنیم. هنگامی که شاخه آن مطابق شکل ۱-۵ ب به طرف راست حرکت می کند، لایه هوای مجاور خود را متراکم می کند و چگالی و فشار آن را نسبت به حالت تعادل افزایش می دهد که این لایه متراکم نیز به نوبه خود لایه مجاورش را متراکم می کند.



شکل ۱-۵

به این ترتیب یک آشفتگی یا تب ایجاد می شود که در آن فشار و چگالی بیشتر از حالت تعادل است. این تب تراکمی (پرفشار) در هوا منتشر می شود. هنگامی که شاخه دیافازون برمی گردد، همان طور که در شکل ۱-۵ ت می بینید، لایه هوای مجاور آن منبسط می شود و چگالی و فشار این لایه نسبت به حالت تعادل کاهش می یابد. این لایه انبساط یافته نیز به صورت یک تب انبساطی (کم فشار) در هوا منتشر

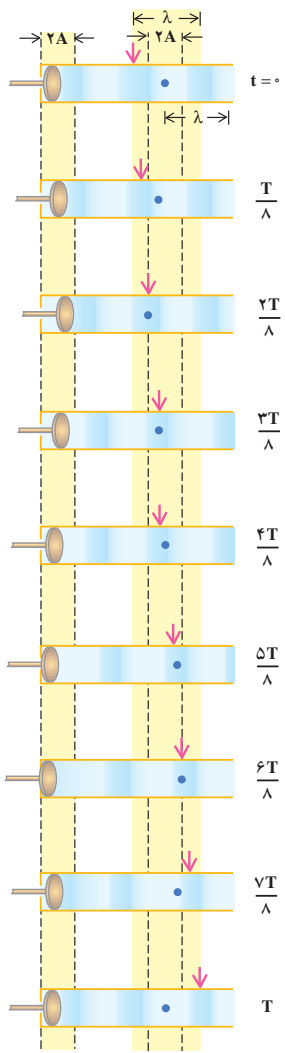


می شود. بنابراین هنگامی که دیافراگم مرتعش می شود تب های متوالی تراکمی و انبساطی (شکل ۲-۵) در هوا منتشر می کند. نمودار تغییرات فشار (چگالی) برحسب فاصله در یک لحظه از زمان در شکل ۲-۵ ب نشان داده شده است.

در مورد انتشار موج در طناب یا سطح آب دیدیم که آشفستگی یا تب به صورت برجستگی و یا فرورفتگی بود. اما در حالت انتشار صوت در هوا، آشفستگی یا تب به صورت لایه های تراکمی و انبساطی یا لایه های پرفشار و کم فشار است. همچنین دیدیم که هنگام انتشار موج در محیط ذره های محیط منتقل نمی شوند، بلکه حول نقطه تعادل خود حرکت نوسانی انجام می دهند؛ مثلاً، در شکل ۲-۴ دیدیم که اگر به یک نقطه از محیط نگاه کنیم، این نقطه (که با رنگ قرمز نشان داده شده است) در حین انتشار موج حول حالت تعادل خود نوسان می کند، ولی اگر به یک نقطه از موج که با پیکان مشخص شده است نگاه کنیم، این نقطه با سرعت ثابت در محیط حرکت می کند.

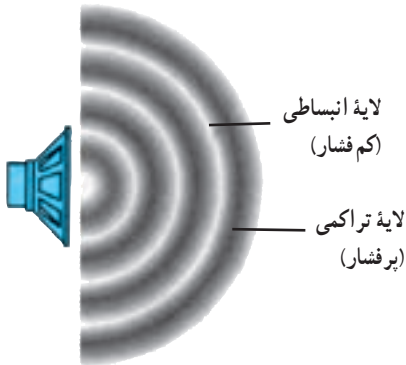
در انتشار صوت نیز ذره های هوا منتقل نمی شوند بلکه حول نقطه تعادل خود نوسان می کنند. لایه های تراکمی و انبساطی نیز در اثر این نوسان ها به وجود می آید.

در شکل ۳-۵ انتشار یک موج صوتی در یک لوله، در بازه های زمانی $\frac{T}{8}$ ، نشان داده شده است. در این شکل یکی از ذره های هوا (محیط) با رنگ آبی مشخص شده است. این نقطه، در حین انتشار موج پس از یک نوسان کامل به محل اولیه خود برمی گردد. در حالی که اگر یک نقطه از موج را مثلاً در ناحیه متراکم که در شکل ۳-۵ با پیکان مشخص شده است در نظر بگیریم، می بینیم که با سرعت ثابت در هوا حرکت می کند، چون در انتشار صوت ذره های هوا در راستای انتشار نوسان می کنند. این موج ها طولی اند.



شکل ۳-۵

مثال‌هایی از انتشار صوت در مایع‌ها و جامدها ذکر کنید.



شکل ۴-۵

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

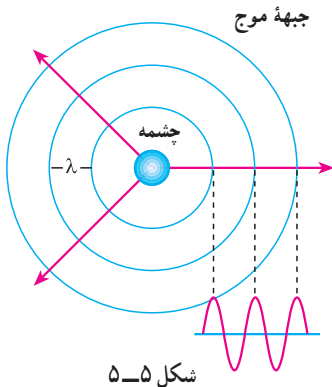
هنگامی که یک چشمهٔ صوت مرتعش می‌شود، صوت ایجاد شده در تمام جهت‌ها منتشر می‌شود.

لایه‌های تراکمی (پرفشار) و انبساطی (کم فشار) یک موج صوتی که از یک بلندگوی کوچک در هوا منتشر می‌شوند، در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.

پرسش ۱-۵

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

می‌شوند.



شکل ۵-۵

اگر یک چشمهٔ صوت، صوت را به طور یکنواخت در تمام جهت‌ها گسیل کند، صوت به صورت موج کروی در فضا منتشر می‌شود. جبهه‌های موج این امواج به صورت کره‌هایی به مرکز چشمهٔ صوت در شکل ۵-۵ نشان داده شده‌اند. جبهه‌های موج در این شکل نقاط پرفشار را نشان می‌دهند.

حدود شنوایی انسان

انسان نمی‌تواند هر موج صوتی با هر بسامدی را بشنود بلکه تنها می‌تواند موج‌هایی را که بسامد آنها بین 20 تا $20,000$ هرتز است، بشنود. بعضی حیوان‌ها مانند سگ‌ها گستره وسیع‌تری از بسامدها (15 تا $50,000$ هرتز) را می‌شنوند. خفاش‌ها تا بسامد $100,000$ هرتز را نیز می‌شنوند. موج‌های صوتی با بسامد پایین‌تر از 20 Hz را فرصوت و بالاتر از $20,000$ Hz را فراصوت می‌نامند. موج‌های فراصوت کاربردهای فراوانی در پزشکی و صنعت دارند.

۲-۵- 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 ۱-۵ داده شده است. چنان‌که می‌بینید هرچه ماده متراکم‌تر باشد، سرعت انتشار صوت در آن بیشتر است؛ زیرا در ماده متراکم، مولکول‌ها به یکدیگر نزدیک‌ترند و تب ایجاد شده می‌تواند در زمان کمتری به نقطه مجاور خود منتقل شود.

جدول ۱-۵- سرعت صوت در ماده‌های مختلف*

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

* 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 رابطه زیر به دست می‌آید:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \quad (1-5)$$

که در آن T دمای گاز برحسب کلوین، R ثابت عمومی گازها و M جرم مولکولی گاز است. γ نیز ضریب اتمیسیته گاز نام دارد که برای گازهای مختلف در جدول ۲-۵ داده شده است.

جدول ۲-۵- ظرفیت گرمایی مولی در حجم و فشار ثابت γ و M

M g/mol	γ	گاز	
۴	۱/۶۷	He	تک اتمی
۴۰	۱/۶۷	Ar	
۲	۱/۴۱	H _۲	دو اتمی
۲۸	۱/۴۰	N _۲	
۳۲	۱/۳۹	O _۲	

مثال ۱-۵

سرعت انتشار صوت را در هوا و در دمای ۲۷°C به دست آورید (برای هوا، $M = ۲۹\text{g}$)

$$(R = ۸/۳ \text{ J/mol}\cdot\text{K} \text{ و } \gamma = ۱/۴)$$

پاسخ

با استفاده از رابطه ۱-۵ داریم:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} = \sqrt{\frac{۱/۴(۸/۳)(۲۷۳ + ۲۷)}{۲۹ \times ۱۰^{-۳}}} \approx ۳۴۷ \text{ m/s}$$

با استفاده از اطلاعات جدول ۲-۵ سرعت صوت را در گازهای اکسیژن، نیتروژن و هلیوم در دمای صفر درجه سلسیوس محاسبه و نتیجه به دست آمده را با مقادیر جدول ۱-۵ مقایسه کنید.

کاربرد موج های صوتی

برای تعیین محل جسم هایی که زیر آب قرار دارند، از بازتاب موج های صوتی استفاده می شود. 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 می فرستند و با یک آشکارساز، بازتاب یا پژواک آن را اندکی بعد دریافت می کنند. سپس زمان رفت و برگشت موج را به دقت اندازه می گیرند و از روی آن فاصله جسمی را که موج را بازتابانده است تعیین می کنند. (سرعت صوت در آب مشخص است) با این روش عمق دریاها، محل صخره های زیر آب، محل کشتی های غرق شده، زیر دریایی ها و حتی محل تجمع گروهی از ماهی ها را که باهم حرکت می کنند می توان تعیین کرد.

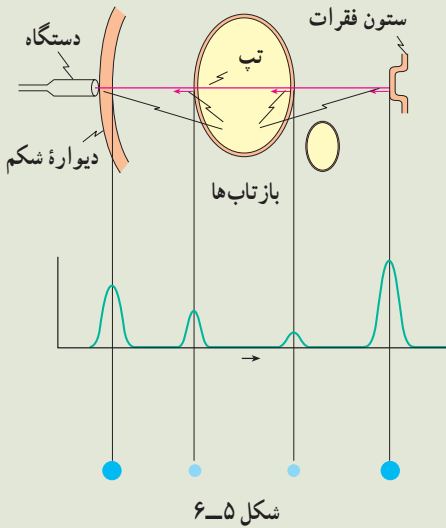
با این روش می توان ساختار داخلی زمین را نیز مشخص کرد. برای این منظور یک انفجار زیرزمینی ایجاد می کنند و با آشکارسازی بازتاب موج های تولید شده در اثر انفجار می توان ساختار نواحی مختلف زمین را تعیین کرد. این روش در اکتشاف نفت و موادمعدنی به کار می رود.

در کاربردهای بالا اغلب از بسامدهای بیش از 20 kHz که در ناحیه فراصوتی قرار دارد استفاده می شود؛ زیرا این موج ها علاوه بر این که قابل شنیدن نیستند دارای طول موج کوتاه اند و اجسام با ابعاد کوچک را می توان با استفاده از آنها آشکار کرد. در پزشکی هم از این موج ها برای از بین بردن بافت های ناخواسته و یا اجسام نامطلوب در بدن (مانند غده ها و یا سنگ های کلیه) استفاده می شود. این موج ها بر روی ماده ناخواسته متمرکز می شوند؛ برای مثال، تابش متمرکز این موج ها بر روی سنگ کلیه

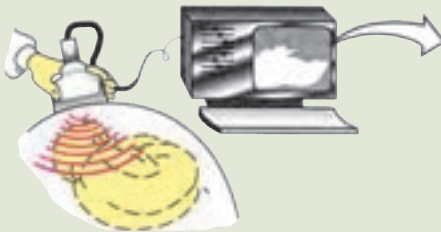
باعث می‌شود که سنگ به پاره‌های کوچک شکسته شده و به تدریج از بدن دفع گردند. بدون این که احتیاجی به عمل جراحی باشد.

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 مورد نظر 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 ۵-۶). 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 ۵-۷). تصویر یک جنین که با استفاده از فراصوت تهیه شده نیز در این شکل نشان داده شده است.



شکل ۵-۷

۵-۳- 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 لوله صوتی می‌نامند.

هنگامی که در دهانه لوله 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 لوله صوتی باز و انتهای دیگر بسته و یا این که هر دو انتهای آن باز باشد، دو حالت متفاوت به وجود 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 ۵-۸ 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. بیشینه دامنه در این شکل حالتی را نشان می‌دهد که در آن جابه‌جایی ذرات لایه هوا بیشینه است) در این حالت طول لوله، L ، با فاصله گره تا شکم برابر است یعنی:

$$L = \frac{\lambda_1}{4} \quad (2-5)$$

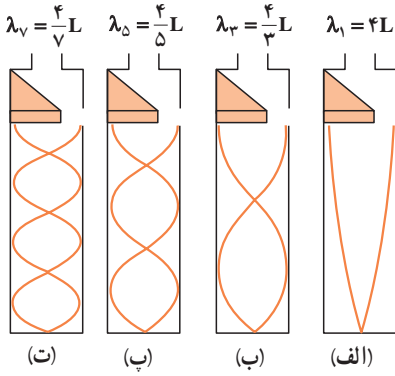
و یا طول موج صوت برابر است با:

$$\lambda_1 = 4L \quad (3-5)$$

اگر سرعت صوت در داخل لوله v باشد، بسامد این صوت، f_1 ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L} \quad (4-5)$$

موج ایستاده 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 ۵-۸ ب، پ، ... تعداد بیشتری گره و شکم



شکل ۵-۸

در لوله تشکیل می‌شود یعنی ممکن است در داخل لوله دوگره، سه گره، ... n گره تشکیل شود. در این صورت، همان گونه که در این شکل می‌بینید، طول لوله به ترتیب برابر است با $\frac{3}{4}\lambda_3$ ، $\frac{5}{4}\lambda_5$ ، ...، $\frac{\lambda_{2n-1}}{4}(2n-1)$ و در حالی که n گره در داخل لوله صوتی تشکیل می‌شود، طول موج مربوط به $2n-1$ امین هماهنگ با رابطه زیر داده می‌شود:

$$\lambda_{2n-1} = \frac{4L}{2n-1}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5-5)$$

و بسامد این صوت برابر است با:

$$f_{2n-1} = \frac{(2n-1)v}{4L} = (2n-1)f_1, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (6-5)$$

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 لوله صوتی که یک انتهای آن بسته است به‌شمار می‌روند.

مثال ۲-۵

در یک لوله صوتی که یک انتهای آن بسته است، می‌خواهیم یک صوت اصلی با بسامد 340 Hz ایجاد کنیم. الف) طول لوله باید چه قدر باشد؟ ب) بسامد هماهنگ‌های سوم و پنجم را حساب کنید. سرعت صوت در هوا را 340 m/s فرض کنید.

پاسخ

الف) با استفاده از رابطه $v = \lambda f$ داریم:

$$\lambda_1 = \frac{v}{f_1} = \frac{340}{340} = 1 \text{ m}$$

در این صورت با استفاده از رابطه ۵-۲ طول لوله برابر است با:

$$L_1 = \frac{\lambda}{4} = 0.25 \text{ m}$$

ب) با استفاده از رابطه ۵-۶ برای $n=2$ و $n=3$ داریم:

$$f_2 = (2 \times 2 - 1)340 = 1020 \text{ Hz} \quad \text{و} \quad f_3 = (2 \times 3 - 1) \times 340 = 1700 \text{ Hz}$$

ب) هر دو انتهای لوله باز است. در این حالت در هر دو انتها شکم تشکیل می‌شود. برای صوت اصلی، همان‌طور که در شکل ۹-۵ الف نشان داده شده است، دو شکم در دو انتها و یک گره در وسط لوله تشکیل می‌شود. در این حالت طول لوله برابر فاصله دو شکم است. در این صورت داریم:

$$L = \lambda_1 / 2 \quad (7-5)$$

یعنی، طول موج صوت برابر با $\lambda = 2L$ است.

در نتیجه بسامد اصلی برابر است با:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L} \quad (8-5)$$

همانگ‌های دیگر این صوت هنگامی

پدیدار می‌شوند که مطابق شکل ۹-۵ ب، 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 رابطه زیر به دست می‌آید:

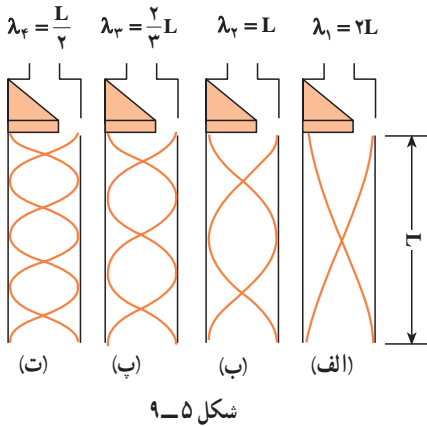
$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad n = 1, 2, \dots \quad (9-5)$$

و بسامد این صوت برابر است با:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n \frac{v}{2L} = n f_1 \quad n = 1, 2, \dots \quad (10-5)$$

ملاحظه می‌کنید که تمام همانگ‌ها 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.



شکل ۹-۵

تمرین ۵-۲

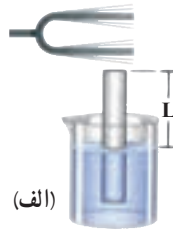
بسامد صوت اصلی و همانگ‌های دوم و سوم را در یک لوله صوتی به طول ۱ m

که هر دو انتهای آن باز است تعیین کنید (سرعت صوت را در هوا 340 m/s فرض کنید).

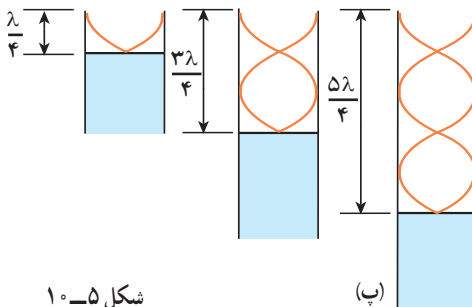
در قسمت قبل دیدیم که برای ایجاد موج‌های ایستاده، باید در دهانه لوله صوتی بدمیم. در واقع، از این طریق به راحتی نمی‌توان امواج ایستاده در لوله ایجاد کرد. روش مناسب و مؤثر برای انجام این کار این است که از پدیده تشدید استفاده کنیم. در فصل سوم با پدیده تشدید آشنا شدیم و دیدیم که اگر یک نوسانگر را با یک نیروی 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 لوله 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 دیافراگم را در نزدیکی دهانه لوله به نوسان درآوریم. اگر بسامد نوسان این دیافراگم با هریک از بسامدهای طبیعی لوله صوتی برابر باشد، تشدید رخ خواهد داد. بدین وسیله می‌توان موج ایستاده با بسامد موردنظر را در لوله صوتی ایجاد کرد.

فعالیت ۲-۵

در شکل ۵-۱ الف و ب می‌توان با تغییر مکان لیوان یا لوله، طول لوله 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)



شکل ۵-۱

(ب)



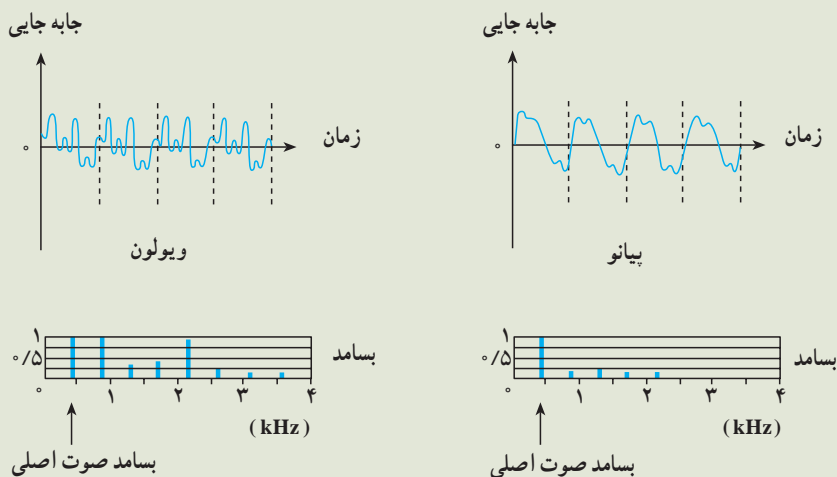
(ب)

با استفاده از یک لوله صوتی، آزمایشی را برای اندازه‌گیری سرعت صوت در هوا طراحی کنید.

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 مشخصه 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 اول آن ایجاد نمی‌شود، بلکه هماهنگ‌های دیگر آن نیز به وجود 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 ۵-۱۱ نسبت موج صوتی حاصل از پیانو و ویولون نشان داده شده است. در این شکل، نسبت دامنه هماهنگ‌ها به دامنه صوت اصلی نیز آمده است. در هر دو مورد بسامد صوت اصلی ۴۴۰ هرتز است؛ ولی تعداد و دامنه 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 به شکل موج مرکب بستگی دارد. یعنی طنین به نوع، تعداد و دامنه 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 - ۱۱

اکنون به توصیف صوت های موسیقی می پردازیم. برای این منظور لازم است چند مفهوم را تعریف کنیم.

۱- صوت موسیقی یا نت، صوتی است که (مانند شکل ۵-۱۱) از ارتعاش های منظم تشکیل شده است و اثر خوشایندی بر گوش انسان دارد.

۲- فاصله موسیقی، نسبت بسامد دو نت را فاصله موسیقی می نامند. تجربه نشان می دهد که هر فاصله ای برای انسان خوشایند نیست.

۳- گام موسیقی، مجموعه ای از چند نت است که فاصله آنها برای گوش خوشایند است. گام های متفاوتی در موسیقی وجود دارد. اکنون به توصیف گام طبیعی (زارلن) می پردازیم.

گام طبیعی از هشت نت $do_1, re, mi, fa, sol, la, si, do_2$ تشکیل شده است که فاصله آنها از یک نت مینا (do_1) که کمترین بسامد را دارد، به صورت زیر است:

$$9 \quad \frac{re}{do_1} = \frac{9}{8}, \quad \frac{mi}{do_1} = \frac{5}{4}, \quad \frac{fa}{do_1} = \frac{4}{3}, \quad \frac{sol}{do_1} = \frac{3}{2}, \quad \frac{la}{do_1} = \frac{5}{3}, \quad \frac{si}{do_1} = \frac{15}{8}$$

$\frac{do_2}{do_1} = 2$ ، بسامد do_2 دو برابر بسامد do_1 است و اکتاو do_1 نامیده می شود. اگر do_2 رانت مینا بگیریم، با رعایت فاصله های فوق می توان گام دوم را ساخت. به همین ترتیب

می توان بر مبنای do_p که اکتاو do_p است گام سوم را ساخت و به همین ترتیب ادامه داد. به عنوان مثال، اگر بسامد نت مینا را $65/25$ هرتز اختیار کنیم، با استفاده از نسبت های بالا می توانیم بسامد نت های دیگر را به دست آوریم؛ در این صورت داریم:

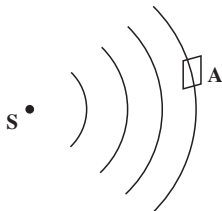
$$\frac{re_1}{do_1} = \frac{9}{8}$$

$$re_1 = \frac{9}{8} do_1 = 73/41 \text{ Hz}$$

به همین ترتیب بسامدهای $81/56$ ، 87 ، $97/88$ ، $108/75$ و $122/34$ هرتز به ترتیب برای me_1 ، fa_1 ، sol_1 ، la_1 ، si_1 به دست می آیند. برای do_p که اکتاو do_1 است بسامد $130/5$ هرتز محاسبه می شود. اکنون می توانیم بر مبنای do_p گام بعدی را بسازیم. برای نت های این گام به ترتیب مقدارهای $146/81$ ، $163/13$ ، 174 ، $195/75$ ، $217/5$ ، $244/69$ هرتز به دست می آیند. هر یک از این نت ها اکتاو نت متناظر در گام اول است (چرا؟) به همین ترتیب برای گام سوم به ترتیب مقدارهای 261 ، $293/6$ ، $326/25$ ، 348 ، $391/5$ ، 435 ، $489/38$ هرتز به دست می آیند. این مثال، نت های گام طبیعی را بر مبنای قرارداد $la_p = 435 \text{ Hz}$ به دست می دهد. اکنون به عنوان تمرین تعیین کنید که بسامدهای 1044 و 870 هرتز بسامد چه نت هایی هستند و در کدام گام قرار دارند؟

۵-۴- شدت صوت

در بخش ۴-۴ دیدیم که موج ها (در طناب یا سطح آب) با خود انرژی حمل می کنند و این انرژی



شکل ۵-۱۲

با مجذور دامنه و مجذور بسامد موج متناسب است. این بیان در مورد موج های صوتی نیز درست است. در شکل ۵-۱۲ چشمه صوتی S را می بینید که موج های صوتی را در فضا منتشر می کند. فرض کنید انرژی E در زمان t به سطح A که عمود بر راستای انتشار صوت است برسد.

شدت صوت بنا به تعریف عبارت است از: مقدار انرژی ای که در واحد زمان به واحد سطح عمود بر راستای انتشار می رسد؛ در نتیجه، شدت صوت I در مکانی که سطح A قرار گرفته با رابطه زیر بیان می شود:

$$I = \frac{E}{At} \quad (5-11)$$

رابطه ۱۱-۵ را می توان با استفاده از تعریف توان ($P = \frac{E}{t}$) به صورت زیر نوشت:

$$I = \frac{P}{A} \quad (12-5)$$

یکای شدت موج در SI وات بر مترمربع (W/m^2) است.

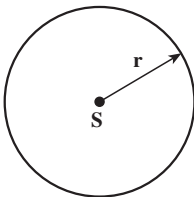
مثال ۳-۵

به سطح یک میکروفون که مساحت آن 3 cm^2 است در مدت ۵ ثانیه $1/5 \times 10^{-11} \text{ J}$ انرژی صوتی می رسد. شدت صوت در سطح میکروفون چه مقدار است؟ (سطح میکروفون عمود بر راستای انتشار صوت است).

پاسخ

با استفاده از رابطه ۱۱-۵ داریم:

$$I = \frac{E}{At} = \frac{1/5 \times 10^{-11}}{3 \times 10^{-4} \times 5} = 10^{-8} \text{ W/m}^2$$



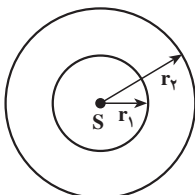
شکل ۱۳-۵

اکنون ممکن است این پرسش پیش بیاید که: چرا هرچه از چشمه صوت دور می شویم صدا ضعیف تر می شود؟ برای پاسخ دادن به این سؤال چشمه صوت S را در نظر می گیریم که موج های کروی در فضا ایجاد می کند (شکل ۱۳-۵).

فرض کنید توان چشمه صوت P باشد و چشمه در تمام جهتهای

فضا، موج را به صورت یکسان گسیل کند. شدت صوت در روی کره ای به شعاع r چه قدر است؟ اگر از اتلاف انرژی صوتی در هوا صرف نظر کنیم، در واحد زمان انرژی P به سطح کره ای به مساحت $4\pi r^2$ می رسد. در نتیجه شدت صوت بر روی این کره برابر است با:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (13-5)$$



شکل ۱۴-۵

این رابطه نشان می دهد که با دور شدن از چشمه S شدت صوت کاهش می یابد. حال برای این که ببینیم این کاهش به چه نسبتی صورت می گیرد، دو جبهه موج کروی به شعاع های r_1 و r_2 در نظر می گیریم (شکل ۱۴-۵).

انرژی ای که در واحد زمان به سطح کره ای با شعاع r_1 می رسد (P_1) با انرژی ای که در واحد زمان به سطح کره ای با شعاع r_2 می رسد (P_2) برابر است. بنابراین داریم:

$$P_1 = P_2 \quad (14-5)$$

$$I_1 = \frac{P_1}{4\pi r_1^2} \quad \text{شدت صوت روی سطح کره ۱ برابر است با:}$$

$$I_2 = \frac{P_2}{4\pi r_2^2} \quad \text{و روی سطح کره ۲ برابر است با:}$$

با جای گذاری این رابطه ها در رابطه ۱۴-۵ داریم:

$$4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \quad \text{و یا} \quad (15-5)$$

همان طور که این رابطه نشان می دهد، شدت صوت با مجذور فاصله از چشمه صوت نسبت عکس دارد.

مثال ۴-۵

شدت صوت یک سخنران در یک سالن در فاصله ۴ متری $W/m^2 \times 10^{-6}$ است. شدت صوت او در فاصله ۲۰ متری چه قدر است؟

پاسخ

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \quad \text{با استفاده از رابطه ۱۵-۵ داریم:}$$

$$\frac{I_2}{10^{-6}} = \left(\frac{4}{20}\right)^2 = \frac{1}{25} \quad \text{با جای گذاری مقادیر } r_1 \text{ و } r_2 \text{ و } I_1 \text{ داریم:}$$

$$I_2 = 4 \times 10^{-8} W/m^2$$

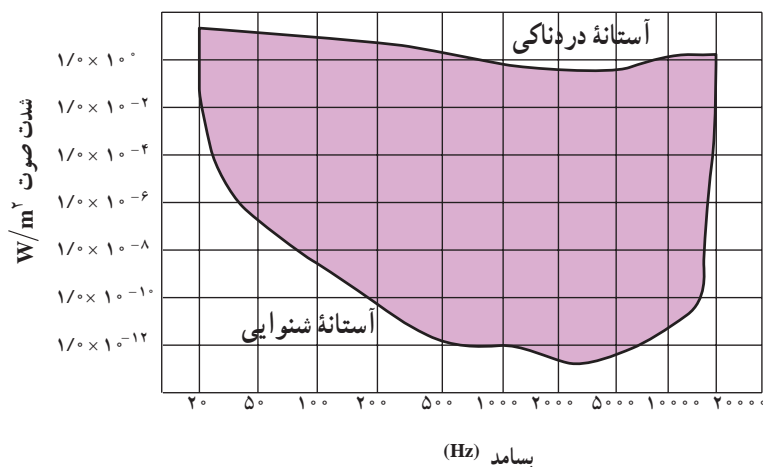
یعنی در مقایسه با فاصله ۴ متری، شدت صوت در فاصله ۲۰ متری ۲۵ مرتبه کاهش می یابد. به نظر شما آیا این بدان معنا است که صوت در فاصله ۴ متری ۲۵ بار بلندتر از صوت در فاصله ۲۰ متری شنیده می شود؟

شدت صوت برای برخی صوت‌ها در جدول ۳-۵ آمده است.

جدول ۳-۵- شدت صوت و تراز شدت صوت برای برخی صوت‌ها

تراز شدت صوت dB	شدت صوت W/m^2	صدا
۰	10^{-12}	شدت صوت مینا
۱۰	10^{-11}	نفس کشیدن
۲۰	10^{-10}	برگ درختان در نسیم صحبت کردن از فاصله
۴۰	10^{-8}	یک متری
۶۰	10^{-6}	همهمه در فروشگاه سروصدای خودروها در
۷۰	10^{-5}	خیابان شلوغ
۱۲۰	۱	آستانه دردناکی (برای بسامد ۱۰۰۰ Hz)
۱۳۰	۱۰	مسلسل غرش هواپیمای جت
۱۴۰	10^2	درحین بلندشدن راکت فضایی، در موقع
۱۷۰	10^5	بلندشدن

آهسته‌ترین صدایی (کمترین شدت) را که انسان می‌تواند بشنود آستانه شنوایی می‌نامند، و بلندترین صدایی (بیشینه شدت) که انسان می‌تواند بشنود بدون اینکه گوش او به درد آید آستانه دردناکی می‌نامند. آستانه شنوایی و آستانه دردناکی به بسامد بستگی دارند. نمودار شدت صوت در آستانه شنوایی و دردناکی را به صورت تابعی از بسامد، در شکل ۵-۱۵ مشاهده می‌کنید.



شکل ۵-۱۵

پرسش ۲-۵

با استفاده از نمودار شکل ۵-۱۵ تعیین کنید که آستانه شنوایی و دردناکی در بسامد $10,000$ هرتز تقریباً چه قدر است.

هرچه شدت صوت بیشتر باشد، مقدار انرژی ای که گوش دریافت می کند بیشتر است و انسان صدا را بلندتر احساس می کند، 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 می کنیم دو برابر نمی شود. در جدول ۳-۵ می بینید 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 و گو است. ولی می دانید که ما غرش هواپیما را هیچ گاه 10^1 برابر بلندتر از گفت و گوی دو نفر احساس نمی کنیم. به این علت به تعریف تراز شدت صوت که درک انسان را از بلندی صوت بیان می کند 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 می دهند و یکای آن را به افتخار بل فیزیک دان امریکایی مخترع تلفن، بل (B) و دسی بل (dB) نام گذاری کرده اند. هر بل برابر ده دسی بل است.

$$\beta = \log \frac{I}{I_0} \quad \text{بل (B)} \quad (16-5)$$

$$\beta = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad (\text{dB}) \quad \text{دسی بل} \quad (17-5)$$

I_0 شدت صوت مبنا است که برابر با آستانه شنوایی گوش سالم در بسامد 1000 هرتز (10^{-12} W/m^2) در نظر گرفته می شود. در جدول ۳-۵ شدت پاره‌ای از صوت‌ها برحسب دسی بل بیان شده است.

مثال ۵-۵

در جدول ۳-۵ شدت صوت آستانه دردناکی (برای بسامد 1000 Hz) 1 W/m^2 ذکر شده است. تراز شدت صوت را برای آن به دست آورید.

پاسخ

با استفاده از رابطه ۱۷-۵ داریم:

$$\beta = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} = 10 \cdot \log \frac{1}{10^{-12}} = 120 \text{ dB}$$

تمرین‌های فصل پنجم

- ۱- کدام یک از عامل‌های زیر بر سرعت صوت در هوا مؤثر است؟
(الف) شکل موج (ب) دامنه موج (پ) بسامد موج (ت) دمای هوا
- ۲- آزمایشی برای اندازه‌گیری سرعت صوت در آب طراحی کنید.
- ۳- دلفین، مانند خفاش، از خود فراصوت گسیل می‌کند. طول موج صوت دلفین با بسامد 10^5 Hz در آب چه قدر است؟
- ۴- ناظری در سطح زمین ایستاده است، صدای رعد 5 ثانیه پس از مشاهده برق به گوش او می‌رسد. اگر دمای هوا 27°C باشد، فاصله ناظر از محل ایجاد رعد و برق چه مقدار است؟
- ۵- دانش‌آموزی بین دو صخره قائم ایستاده است و فاصله او از صخره نزدیکتر 240 متر است. دانش‌آموز فریاد می‌زند و اولین پژواک صدای خود را پس از $1/5$ ثانیه و صدای پژواک دوم را 1 ثانیه بعد از پژواک اول می‌شنود.
- (الف) سرعت صوت را در هوا به دست آورید. (ب) فاصله بین دو صخره را محاسبه کنید.

۶- یک انتهای یک لوله صوتی، باز و انتهای دیگر بسته است. الف) طول لوله برای این که هوای داخل لوله در بسامد اصلی 6°Hz به تشدید درآید چه قدر است؟ ب) بارسم شکل، هماهنگ اصلی و هماهنگ های سوم و پنجم آن را نمایش دهید. ب) طول موج صوت اصلی و هماهنگ های سوم و پنجم آن را تعیین کنید. سرعت صوت را 340 m/s در نظر بگیرید.

۷- تمرین ۶ را در حالتی که هر دو انتهای لوله صوتی باز است حل کنید.

۸- طول یک لوله صوتی که هر دو انتهای آن باز است $1/7\text{m}$ است. بسامد هماهنگ سوم این لوله را محاسبه کنید. سرعت صوت را 340 m/s در نظر بگیرید.

۹- یک چشمه صوت موج های کروی در هوا گسیل می کند. الف) نسبت شدت صوت در دو نقطه که فاصله آنها از چشمه صوت d_1 و $2d_1$ است چه قدر است؟ ب) کاهش شدت صوت گسیل شده از چشمه عملاً بیشتر از آن است که در قسمت الف) به دست می آید. علت چیست؟

۱۰- دو نفر به فاصله های d_1 و d_2 از یک چشمه صوت ایستاده اند. تراز شدت صوت برای این دو نفر به ترتیب 2°dB و 1°dB است. نسبت $\frac{d_2}{d_1}$ را حساب کنید.

۱۱- در فاصله 2°m از چشمه صوتی تراز شدت صوت 6°dB است. با این فرض که جذب صوت به وسیله هوا قابل چشم پوشی است، در چه فاصله ای از این چشمه می توان صوت را به زحمت شنید. آیا به نظر شما پاسخ به دست آمده منطقی است؟

۱۲- پرده صماخ گوش شخصی به قطر $7/5^\circ$ سانتی متر، به مدت ۲ ساعت، صوتی با تراز 9°dB را جذب می کند. در این مدت پرده گوش چه مقدار انرژی برحسب ژول جذب کرده است؟

موج‌های الکترومغناطیسی



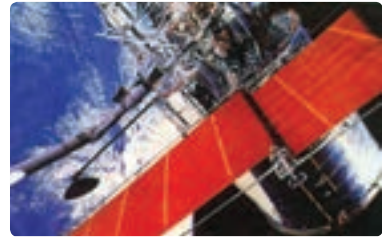
فصل

موج‌های الکترومغناطیسی

نگاهی به فصل: آیا می‌دانید انرژی حیاتی مورد نیاز گیاهان، جانوران، انسان و ... از چه طریق

و چگونه به زمین می‌رسد؟

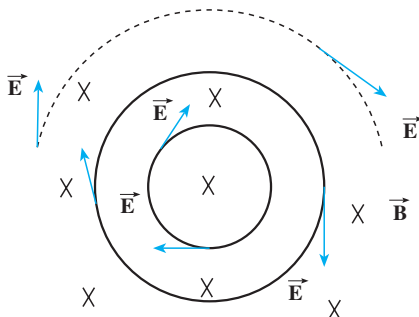
آیا می‌دانید رادیو، تلویزیون، تلفن، بی‌سیم، ماهواره‌ها و ... بر چه اساسی کار می‌کنند؟



شکل ۱-۶

هر موجود زنده‌ای در زمین به انرژی خورشید نیاز دارد، به طوری که بدون انرژی خورشید حیات روی کره 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 (۱۸۶۷-۱۷۹۱ میلادی) و جیمز کلارک ماکسول فیزیک‌دان اسکاتلندی (۱۸۷۹-۱۸۳۱ میلادی) نقش عمده‌ای در کشف پدیده‌های الکترومغناطیسی و مطالعه بر روی آنها داشتند.



شکل ۲-۶

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 ۲-۶ میدان مغناطیسی \vec{B} تغییر کند، در اثر تغییر شار یک نیروی محرکه در مدار القا می‌شود. در واقع و به طور عمیق‌تر می‌توان گفت که

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 به وجود می‌آید. در فیزیک (۳) و آزمایشگاه هم چنین دیدیم که هنگامی که میدان الکتریکی داخل یک رسانا وجود دارد، در آن اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد می‌کند در نتیجه می‌توان گفت: «نیروی محرکه القایی از این میدان الکتریکی القایی حاصل می‌شود.» ماکسول پیش‌بینی کرد همان‌طور که در اثر تغییر میدان مغناطیسی در فضا، میدان الکتریکی تولید می‌شود، در اثر تغییر میدان الکتریکی نیز میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود؛ یعنی، علاوه بر 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 هرتر فیزیک‌دان آلمانی (۱۸۹۴-۱۸۵۷ میلادی) وجود این موج‌ها را به‌طور تجربی نشان داد.

۶-۱- چگونه تشکیل موج‌های الکترومغناطیس توسط یک آنتن

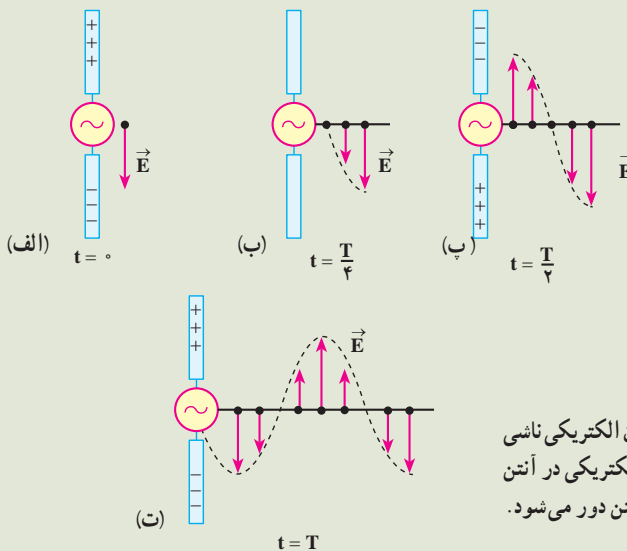
موج‌های الکترومغناطیس از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تشکیل شده‌اند. عامل اصلی ایجاد موج‌های الکترومغناطیسی، ذرات باردار شتاب‌دارند؛ یعنی، وقتی ذره باردار شتاب‌دار می‌شود بخشی از انرژی خود را به صورت موج‌های الکترومغناطیسی گسیل می‌کند، گسیل موج‌های الکترومغناطیسی توسط اجسام را تابش می‌نامند.

چگونه تولید موج‌های الکترومغناطیسی توسط آنتن

در آنتن، یک منبع ولتاژ متناوب برای ایجاد نوسان بار الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد و این شیوه‌ای مرسوم برای شتاب‌دار کردن ذرات است. از آنتن‌ها به عنوان چشمه موج‌های الکترومغناطیس در ایستگاه‌های رادیویی، مخابراتی و ... استفاده می‌شود. شکل ۶-۳ نحوه تولید یک موج الکترومغناطیس را در یک آنتن نشان می‌دهد. دو میله فلزی به یک مولد متناوب (ac) متصل شده‌اند. چون ولتاژ خروجی این مولد به صورت سینوسی است، بار روی میله‌ها دائماً تغییر می‌کند. در لحظه $t = 0$ s بار روی میله بالایی بیشینه و مثبت و روی میله پایینی بیشینه و منفی است. سپس بار این میله‌ها کاهش می‌یابد

و در لحظه $t = \frac{T}{4}$ به صفر می‌رسد (شکل ۳-۶-ب) در ادامه این حرکت، علامت بار میله‌ها معکوس می‌شود، یعنی بار میله بالایی منفی و بار میله پایینی مثبت می‌شود و مقدار آن نیز افزایش می‌یابد تا در لحظه $t = \frac{T}{2}$ به یک مقدار بیشینه برسد (شکل ۳-۶-پ). تغییر بار میله‌ها به همین ترتیب ادامه می‌یابد.

در زمان $t = 0$ بار مثبت در میله بالایی و بار منفی در میله پایینی بیشینه است (شکل ۳-۶-الف). 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.

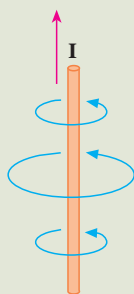


شکل ۳-۶- میدان الکتریکی ناشی از نوسان بارهای الکتریکی در آنتن با سرعت نور از آنتن دور می‌شود.

با کاهش بار روی میله‌ها، شدت میدان الکتریکی در نزدیکی میله‌ها، کاهش می‌یابد و میدان الکتریکی بیشینه رو به پایینی که در لحظه $t = 0$ تولید شده بود از میله دور می‌شود. هنگامی که بارهای مثبت و منفی روی میله‌ها صفر است (مانند شکل ۳-۶-ب) میدان الکتریکی نیز صفر است. این وضعیت $\frac{1}{4}$ دوره ($t = \frac{T}{4}$) بعد از شروع نوسان پیش می‌آید. با ادامه این عمل، میله بالایی، بار منفی، بعد از زمان $t = \frac{T}{2}$ ، دارای بیشترین مقدار بار منفی و میله پایینی دارای بیشترین بار مثبت می‌شود. در این حالت میدان الکتریکی ایجاد شده

رو به بالاست (شکل ۶-۳-پ) و با ادامه یافتن نوسان بار الکتریکی روی میله‌ها میدان الکتریکی مطابق شکل ۶-۳-ت تشکیل می‌شود. در تمام این مراحل میدان الکتریکی نزدیک آنتن با نوسان بار الکتریکی روی آن هم فاز است؛ یعنی، جهت میدان الکتریکی در زمانی که میله بالایی مثبت است رو به پایین و وقتی میله بالایی منفی است، رو به بالاست و اندازه میدان در هر لحظه به مقدار بار روی میله در آن لحظه بستگی دارد.

با ادامه نوسان بارهای الکتریکی روی میله‌ها، میدان‌های الکتریکی ایجاد شده با سرعت نور از آنتن دور می‌شوند. در شکل ۶-۳-گویی از میدان الکتریکی را در لحظه‌های مشخص از نوسان مشاهده می‌کنید. همان‌گونه که می‌بینید در طول یک دوره از نوسان بار، میدان الکتریکی ایجاد شده در ابتدای دوره به اندازه 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 به صورت دایره‌هایی هم‌مرکز به دور آنتن اند (شکل ۶-۴). این خط‌ها بر میدان الکتریکی تولید شده در هر نقطه عمودند.



شکل ۶-۴- چگونگی تشکیل خطوط میدان مغناطیسی در اطراف یک آنتن که از آن جریان الکتریکی متغیر می‌گذرد.

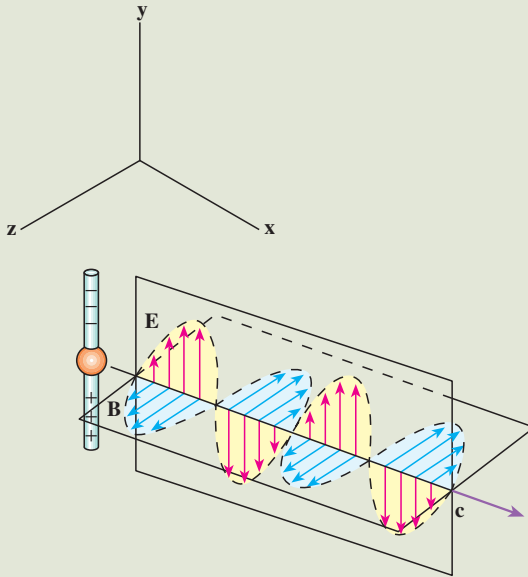
با عوض شدن جهت جریان، جهت میدان مغناطیسی نیز وارونه می‌شود و با تغییر جریان نسبت به زمان، میدان مغناطیسی نیز همانند میدان الکتریکی در اطراف آنتن تغییر می‌کند.

تا اینجا دیدیم که نوسان بارهای الکتریکی روی میله‌ها، در فضا میدان الکتریکی و مغناطیسی متغیر تولید می‌کند. اما علاوه بر اینها دو پدیده دیگر نیز رخ می‌دهد. همان‌طور که دیدیم:

(الف) میدان مغناطیسی متغیر با زمان، میدان الکتریکی تولید می‌کند.

(ب) میدان الکتریکی متغیر با زمان - همان‌طور که ماکسول پیش بینی کرده بود-

میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند.



این میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی القایی هم فازند؛ یعنی، در هر نقطه هر دو میدان هم‌زمان با هم بیشینه یا کمینه می‌شوند (شکل ۵-۶). علاوه بر این میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر یکدیگر و هر دوی آنها بر راستای حرکت موج عمودند.

در نتیجه این دو پدیده و مواردی که در بالا ذکر شد، یک موج الکترومغناطیسی ایجاد می‌شود که در فضا منتشر می‌شود (شکل ۵-۶).

شکل ۵-۶- 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.

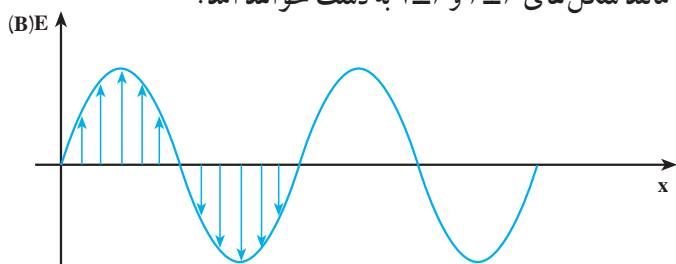
موج‌های الکترومغناطیسی نیز، مانند موج‌های مکانیکی، در زمان و مکان تغییر می‌کنند، با این تفاوت که در موج‌های مکانیکی ذره‌های تشکیل دهنده محیط نوسان می‌کنند و در موج‌های الکترومغناطیسی، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در هر نقطه از فضا به‌طور نوسانی تغییر می‌کنند. همین موضوع سبب می‌شود که موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار خود، الزاماً به محیط مادی 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) بر حسب مکان یا زمان استفاده کنیم. ابتدا تغییرات میدان الکتریکی را توصیف می‌کنیم.

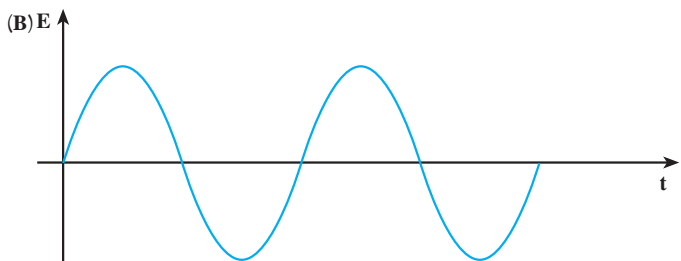
یک موج الکترومغناطیسی را در نظر می‌گیریم که در جهت محور x منتشر می‌شود. نمودار میدان الکتریکی بر حسب مکان این موج در شکل ۶-۶ رسم شده است. این نمودار، میدان الکتریکی را در تمام نقطه‌ها در امتداد محور x و در یک لحظه نشان می‌دهد. می‌بینید که در جهت محور x ، میدان

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 بر حسب زمان نشان داد. این نمودار در شکل ۶-۷ 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 بر حسب مکان و میدان مغناطیسی بر حسب زمان را نیز می‌توان مانند نمودارهای مربوط به میدان الکتریکی رسم کرد که باز هم نمودارهایی مانند شکل‌های ۶-۶ و ۶-۷ به دست خواهد آمد.

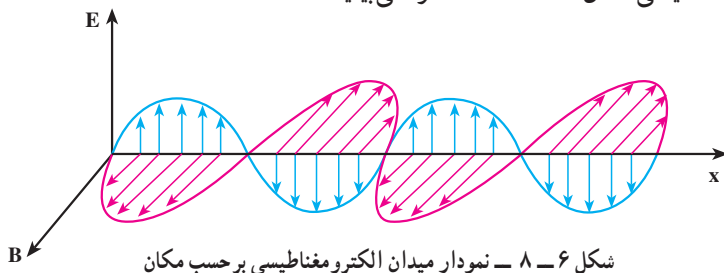


شکل ۶-۶ - نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی) بر حسب مکان، یک موج الکترومغناطیسی در امتداد محور x ، در یک لحظه از زمان.



شکل ۶-۷ - نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی) بر حسب زمان، یک موج الکترومغناطیسی در یک نقطه از محور x .

در شکل ۶-۸ نمودارهای میدان الکترومغناطیسی بر حسب مکان که در آن هم میدان الکتریکی و هم میدان مغناطیسی نشان داده شده است را می‌بینید.



شکل ۶-۸ - نمودار میدان الکترومغناطیسی بر حسب مکان

تعریف‌هایی که قبلاً در مورد موج‌های مکانیکی بیان کردیم، در مورد موج‌های الکترومغناطیسی هم به کار 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 فاصله بین دو نقطه متوالی از موج است که در آن دو نقطه میدان‌های الکتریکی (و یا مغناطیسی) هم‌فازند. سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی نیز، همچون موج‌های مکانیکی از رابطه $v = \lambda f$ به دست می‌آید.

پرسش ۱-۴

با توجه به شکل ۶-۵ توضیح دهید که موج‌های الکترومغناطیسی طولی اند یا عرضی؟

۶-۲- سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی

میدان مغناطیسی و الکتریکی حاصل از جریان نوسانی در یک آنتن به طور 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 رابطه زیر به دست می‌آید:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (۶-۱)$$

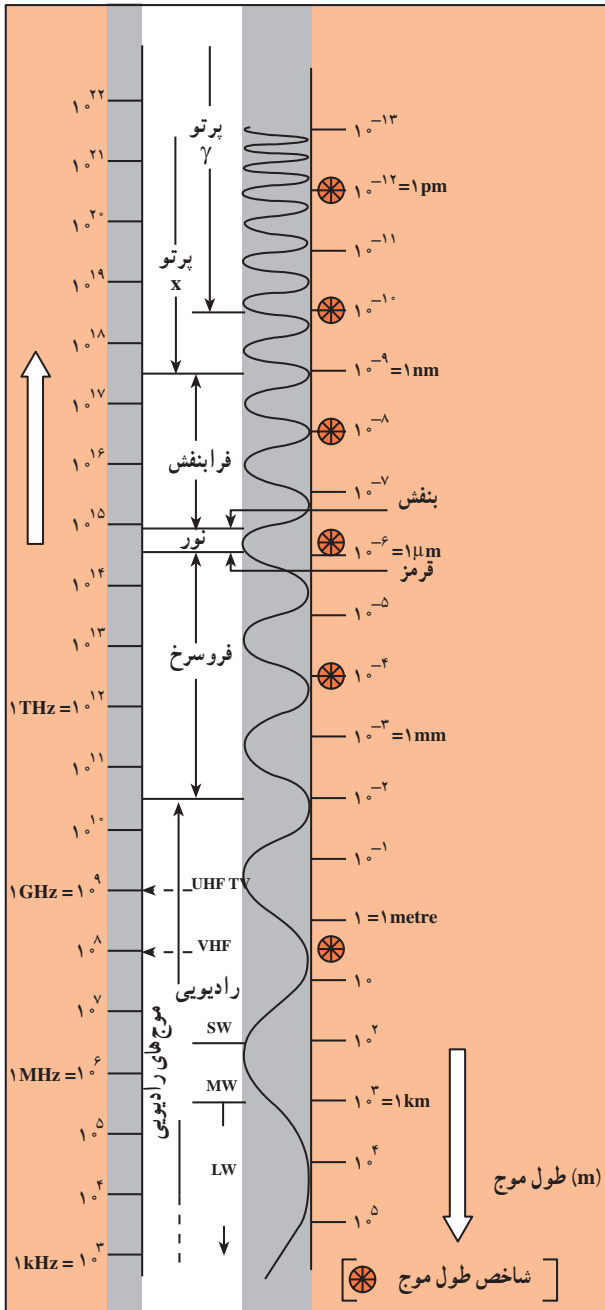
که در آن ϵ_0 ضریب گذردهی الکتریکی در خلأ و μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ است. از فیزیک (۳) و

آزمایشگاه به یاد دارید که $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$ و $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$ است. با قرار دادن مقادیر بالا در رابطه ۶-۱ سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی در خلأ به دست می‌آید:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8.85 \times 10^{-12} \times 4\pi \times 10^{-7}}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

که این مقدار برابر سرعت انتشار نور در خلأ است.

۳-۶- طیف موج های الکترومغناطیسی



شکل ۳-۶-۹- طیف موج های الکترومغناطیسی

موج های الکترومغناطیسی

طیف گسترده ای از نظر بسامد (و طول موج) دارند. به نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی، نام هایی از قبیل: موج های رادیویی، نوری، تابش گرمایی، فرابنفش، γ ، X، ... و اتلاق می شود. در هریک از این ناحیه ها تابش به طریق خاصی تولید و آشکار می شود. جدول ۳-۶-۱ نحوه تولید، کاربرد و آشکارسازی نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی را نشان می دهد؛ مثلاً، نور که گستره کوچکی از این طیف است، مستقیماً بر شبکه چشم اثر می کند و از این طریق آشکار می شود اما آشکارسازی موج های رادیویی توسط وسیله های الکترونیکی خاصی مانند رادیو، تلویزیون و ... صورت می گیرد.

شکل ۳-۶-۹ گستره (طیف)

موج های الکترومغناطیسی را نشان می دهد. این موج ها، طیف پیوسته ای را تشکیل می دهند. با وجود تفاوت بسیار زیاد در بسامد، نحوه تولید و آشکارسازی آنها، ماهیت و قانون های حاکم بر همه آنها یکسان

است.

جدول ۶-۱- نحوه تولید، آنسکارسازی و کاربرد طیف موج های الکترومغناطیسی

نام و حدود طول موج	چشمه	وسایل آنسکارسازی	بعضی از ویژگی های خاص و کاربرد
پرتو گاما (γ) $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$	هسته مواد رادیواکتیو و پرتوهای کیهانی	شماسر گر گایگر- مولر و فیلم عکاسی	فوتون های با انرژی بسیار بالا و با قدرت نفوذ بسیار زیاد، خیلی خطرناک کاربرد: بافت های سرطانی را از بین می برد، برای پیدا کردن ترک در فلزات، برای ضد عفونی کردن تجهیزات و وسایل
پرتوی ایکس (X) $10^0 \text{ pm} = 10^{-10} \text{ m}$	لامپ پرتو X	فیلم عکاسی و صفحه فلوروسان	فوتون های بسیار پر انرژی و با قدرت نفوذ زیاد، خیلی خطرناک کاربرد: استفاده در پرتونگاری، استفاده در مطالعه ساختار بلورها، معالجه بیماری های پوستی، استفاده در پرتودرمانی
فرا بنفش (UV) $10^0 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$	خورشید، جسم های خیلی داغ، جرقه الکتریکی، لامپ بخار جیوه	فیلم عکاسی، فوتوسل	ویژگی ها: توسط شیشه جذب می شود، سبب بسیاری از واکنش های شیمیایی می شود، باخته های زنده را از بین می برد. کاربرد: لامپ های UV در پزشکی
نور مرئی $0.4 \text{ } \mu\text{m} = 4 \times 10^{-7} \text{ m}$ (سبز)	خورشید، جسم های داغ، لیزرها	چشم، فیلم عکاسی، فوتوسل	ویژگی ها: در دیدن اجسام نقش اساسی دارد، برای رشد گیاهان و عمل فتوسنتز نقش حیاتی دارد. کاربرد: در سیستم های مخابراتی (لیزر و تارهای نوری) مورد استفاده قرار می گیرد.
فروسرخ (IR) $10^0 \text{ } \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$	خورشید، جسم های گرم و داغ	فیلم های مخصوص عکاسی	ویژگی: هنگامی که جذب می شود، پوست را گرم می کند. کاربرد: برای گرم کردن، برای فیلم برداری و عکاسی در مه و تاریکی، عکاسی IR توسط ماهواره ها
رادیویی 2 m (VHF)	اجاق های مایکروویو، آنتن های رادیویی و تلویزیونی	رادیو و تلویزیون	کاربرد: در آشپزی، رادیو، تلویزیون، مخابرات ماهواره ای و در رادارها برای آنسکارسازی هواپیما، موشک و کشتی

با استفاده از شکل ۹-۶ موج‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی را به ترتیب افزایش طول موج، نام ببرید.

در شکل ۹-۶ 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 10^{-13} متر است و برعکس بلندترین طول موج مربوط به موج‌های رادیویی است که در حدود 10^5 متر است.

مثال ۱-۷

محدوده طول موج، امواج الکترومغناطیسی مرئی از 400 نانومتر (میکرون 10^{-6}m) تا 700 نانومتر (میکرون 10^{-6}m) مربوط به طول موج بنفش تا 700 نانومتر (میکرون 10^{-6}m) مربوط به طول موج قرمز است. محدوده بسامد نور مرئی را به دست آورید.

پاسخ

با استفاده از رابطه $c = \lambda f$ داریم:

$$f_{\text{بنفش}} = \frac{c}{\lambda_{\text{بنفش}}} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 10^{-7}} = 7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$f_{\text{قرمز}} = \frac{c}{\lambda_{\text{قرمز}}} = \frac{3 \times 10^8}{7 \times 10^{-7}} \approx 4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

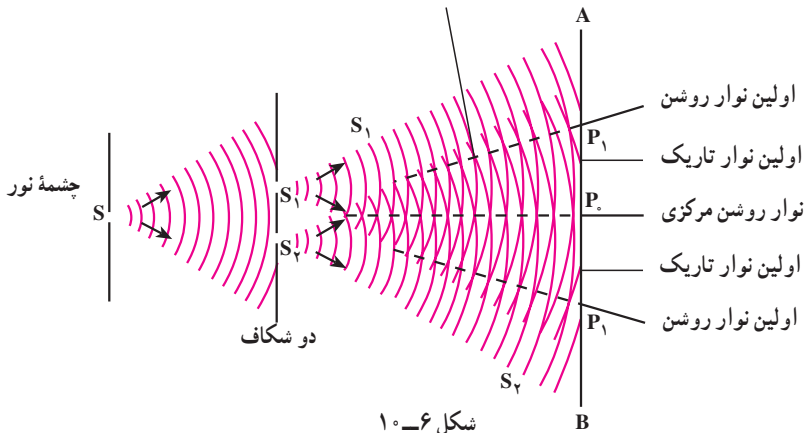
یعنی گستره بسامد نور مرئی بین $4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$ تا $7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ است.

- جمله‌های زیر را کامل کنید.
- ۱- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر یکدیگر ...
 - ۲- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هر دو بر عمودند. بنابراین موج‌های الکترومغناطیسی از نوع موج‌های
 - ۳- نوسان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با یکدیگر
 - ۴- موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار نیاز به و انرژی را از محلی به محل دیگر منتقل می‌کنند.
 - ۵- همهٔ موج‌های الکترومغناطیسی با سرعت منتشر می‌شوند.

۴-۶- تداخل موج‌های نوری

در فصل نوسان و موج با تداخل موج‌های مکانیکی آشنا شدیم و در آن جا دیدیم که اگر دو سوزن که به فاصلهٔ نزدیکی از هم قرار دارند با بسامد معینی بر سطح آب درون یک ظرف هم‌زمان ضربه بزنند، موج‌هایی در سطح آب به وجود 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 ۶-۱۰ 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.



دو موجی که به نقطه P روی محور تقارن دو شکاف می‌رسند، هم‌فازند زیرا آنها دوراه مساوی S_1P_1 و S_2P_1 را تا پرده پیموده‌اند. تداخل این دو موج سازنده است و در نتیجه در محل P_1 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 نقطه P را در شکل ۶-۱۱ 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.

$$\Delta\phi = k(d_2 - d_1) = \frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1)$$

اگر $\Delta\phi$ مضرب زوجی از π باشد؛ یعنی

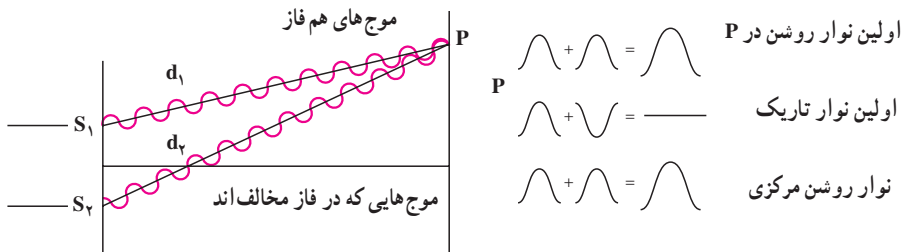
$$\Delta\phi = \pm 2n\pi, \quad n = 0, 1, \dots \quad (2-6)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) = \pm 2n\pi \quad \text{یا:}$$

$$\Rightarrow d_2 - d_1 = \pm n\lambda = \pm 2n \frac{\lambda}{2}$$

در این صورت دو پرتویی که به پرده می‌رسند هم‌فازند و تداخل سازنده ایجاد می‌شود و در این نقطه‌ها نوار روشن تشکیل می‌شود. در رابطه ۶-۲ 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 $n = 2, 3, \dots$ به‌دست آورد.



شکل ۱۱-۶

حال اگر $\Delta\phi$ مضرب فردی از π باشد؛ یعنی :

$$\Delta\phi = \pm(2m-1)\pi, \quad m = 1, 2, \dots \quad (3-6)$$

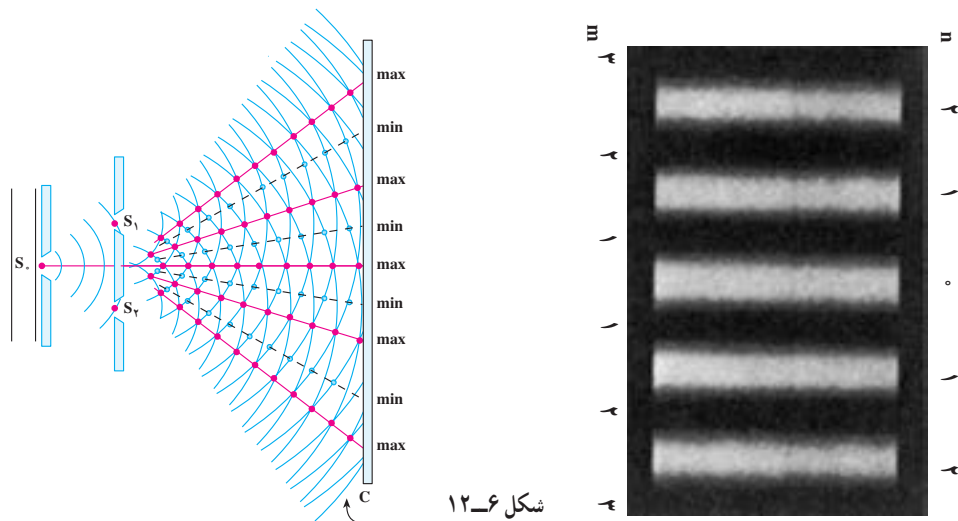
$$\frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) = \pm(2m-1)\pi$$

یا :

$$d_2 - d_1 = \pm(2m-1)\frac{\lambda}{2}$$

در این صورت دو موجی که به پرده می‌رسند در فاز مخالف هم خواهند بود و تداخل ویرانگر صورت می‌گیرد و در نتیجه در این نقاط نوار تاریک خواهیم داشت. در رابطه $m = 1, 3, 5, \dots$ 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 ۱۲-۶ نوارهای روشن و تاریک را نشان می‌دهد. در دو طرف شکل، شماره نوارهای روشن که با مقادیر مختلف n و شماره نوارهای تاریک که با مقادیر مختلف m داده می‌شوند نیز آمده است.



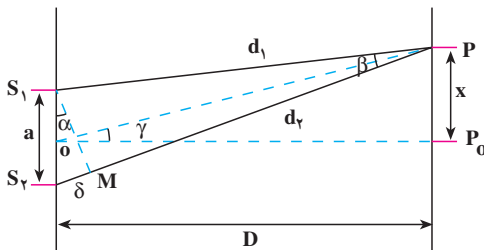
شکل ۱۲-۶

نشان دهید اختلاف راه برای مکان‌هایی که نوار تداخلی روشن داریم، مضرب

زوجی از نصف طول موج، $\delta = 2n \frac{\lambda}{2}$ ، و برای مکان‌هایی که نوار تاریک داریم، مضرب

فردی از نصف طول موج، $\delta = (2m-1) \frac{\lambda}{2}$ ، است

اندازه‌گیری طول موج: با استفاده از آزمایش ینگ می‌توان طول موج نور را اندازه‌گیری



شکل ۶-۱۳

کرد. در شکل ۶-۱۳ طرحی از این آزمایش

رسم شده است. در این شکل، فاصله دو

شکاف از هم a و فاصله شکاف‌ها از پرده D

است. فرض کنید نوار روشن n ام در نقطه P

در فاصله x از نوار مرکزی روی پرده تشکیل

شده است. دایره‌ای به مرکز P و به شعاع PS_1

رسم می‌کنیم، دایره PS_1 را در نقطه M قطع می‌کند. اختلاف راه نوری بین دو پرتو PS_1 و PS_2 برابر

است با:

$$\delta = S_2M = d_2 - d_1$$

اگر فاصله پرده از صفحه دو شکاف بسیار بزرگتر از فاصله دو شکاف، یعنی $D \gg a$ باشد، زاویه γ

و نیز زاویه β (بین پرتوهایی که به P می‌رسند) بسیار کوچک خواهند بود و می‌توان S_1M را عمود بر S_2P

و OP در نظر گرفت. در این صورت، زاویه‌های α و γ با یکدیگر برابرند، در نتیجه:

$$\tan \alpha = \tan \gamma \quad \text{و} \quad \tan \gamma = \frac{x}{D}$$

$$\tan \alpha = \sin \alpha = \frac{\delta}{a}$$

چون زاویه α کوچک است:

بنابراین:

$$\frac{x}{D} = \frac{\delta}{a} \quad (۴-۶)$$

برای نوار روشن n ام:

$$\frac{x}{D} = \frac{n\lambda}{a} \quad (۵-۶)$$

که از آن رابطه زیر به دست می آید :

$$\lambda = \frac{xa}{nD} \quad (6-6)$$

با اندازه گیری فاصله نوار روشن از نوار مرکزی می توان طول موج را اندازه گرفت.

پرسش ۳-۷

به نظر شما اگر آزمایش یانگ را با نور سفید انجام دهیم، طرح تداخلی چگونه خواهد بود؟

مثال ۲-۷

آزمایش یانگ را با نور زرد سدیم انجام داده ایم. فاصله دو شکاف یانگ از یکدیگر $a = 1/2 \text{ mm}$ و فاصله شکاف تا پرده $1/2 \text{ m}$ است؛ اگر فاصله نوار روشن بیستم از وسط نوار مرکزی $11/8 \text{ mm}$ باشد، طول موج نور زرد سدیم چند متر است؟

پاسخ

با استفاده از رابطه ۶-۶ داریم :

$$\lambda = \frac{ax}{nD} = \frac{1/2 \times 10^{-3} \times 11/8 \times 10^{-3}}{20 \times 1/2} = 5/9 \times 10^{-7} \text{ m}$$
$$= 0.59 \mu\text{m}$$

۱- شکل ۶-۱۴ طیف موج‌های الکترومغناطیسی را با یک مقیاس تقریبی نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۴

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؟

۲- چهار وجه اشتراک و دو تفاوت برای نور فروسرخ و امواج رادیویی بیان کنید.

۳- 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؟

۴- الف) طول موج نور نارنجی $10^{-7} \times 6/42$ است، بسامد این نور چند هرتز است؟

ب) بسامد نور قرمز در حدود $10^{14} \times 4/28$ است، طول موج این نور در هوا و آب را حساب کنید. (سرعت نور در هوا را 3×10^8 m/s و در آب را $2/25 \times 10^8$ m/s فرض کنید.)

۵- گستره طول موج‌های رادیویی زیر را به دست آورید.

الف) باند AM در گستره بسامدی 540 تا 1600 کیلوهرتز

ب) باند FM در گستره بسامدی 88 تا 108 مگاهرتز

۶- آزمایش ینگ را با نور تک‌رنگ سبز انجام داده و نوارهای تداخلی را بر روی پرده موازی با سطح شکاف‌ها تشکیل داده‌ایم. برای این که فاصله 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) فاصله پرده از شکاف‌ها را زیاد کنیم.

(۴) فاصله دو شکاف را از هم کم کنیم.

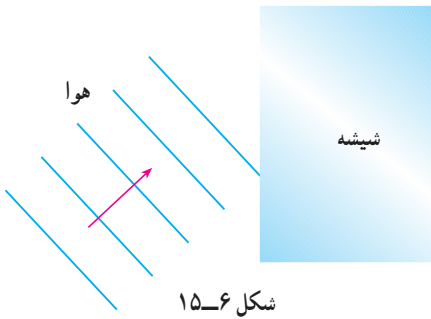
۷- اگر آزمایش ینگ عیناً در آب انجام گیرد چه تغییری در وضعیت نوارها نسبت به هوا حاصل

می‌شود؟ توضیح دهید.

۸- یک صافی مقابل چراغ جیوه قرار می دهیم، به طوری که تمام طول موج ها به جز ناحیه سبز آن جذب می شود. با این نور سبز، طرح تداخلی آزمایش یانگ را به فاصله دو شکاف $a = 0.6 \text{ mm}$ روی پرده ای به فاصله $D = 2.5 \text{ m}$ از دو شکاف تشکیل می دهیم؛ اگر فاصله دو نوار روشن پهلوی هم 2.7 mm باشد، طول موج نور سبز را حساب کنید.

۹- در آزمایش دو شکاف یانگ، فاصله دو شکاف 0.4 mm و فاصله پرده تا دو شکاف 80 cm است؛ اگر طول موج نور 600 nm باشد فاصله نوار دهم روشن از نوار مرکزی را حساب کنید.

۱۰- در شکل ۱۵-۶ موج های نور فرودی از هوا وارد شیشه می شوند. بعضی از آنها در سطح



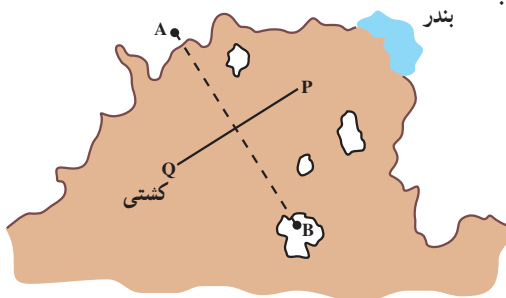
جدایی دو محیط بازتابیده و بعضی شکسته شده وارد شیشه می شوند. با استدلال توضیح دهید کدام یک از کمیت های زیر برای موج های بازتابیده و موج های شکسته شده یکسان است؟

- الف) سرعت
- ب) طول موج
- پ) امتداد
- ت) شدت نور
- ث) بسامد

۱۱- در شکل ۱۶-۶ یک خط ساحلی با دو ایستگاه رادیویی دریانوردی زمینی A و B دیده می شود که در فاصله زیادی از هم قرار گرفته اند. هر دو ایستگاه پیوسته سیگنال های رادیویی هم فاز گسیل می کنند که بسامد آنها 1.5 MHz است.

الف) طول موج این سیگنال ها چند متر است؟

ب) یک کشتی از مسیر QP به سوی بندر در حرکت است. هنگامی که این کشتی به نقطه ای درست در وسط خط فرضی AB می رسد، سیگنالی دریافت می کند که دامنه آن درست دو برابر دامنه هر موجی است که از یک ایستگاه به تنهایی دریافت می کرد. این مشاهده چه موضوعی را درباره سیگنال های گسیل شده از A و B نشان می دهد؟



پ) توضیح دهید در شرایط هوای مه آلود چگونه می توان از این سیگنال های رادیویی برای ادامه مسیر استفاده کرد؟

شکل ۱۶-۶

آشنایی با فیزیک اتمی



فصل

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 به دست 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 سده نوزدهم میلادی توانسته بودند برای بسیاری از پدیده‌های طبیعی توجیه‌های قانع‌کننده‌ای ارائه کنند. مجموعه 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 سده نوزدهم میلادی دانشمندان پدیده‌هایی را مشاهده کردند که دیگر با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند. امروزه به مجموعه نظریه‌ها و قانون‌هایی که به توجیه این پدیده‌ها می‌پردازد، فیزیک جدید (یا نوین) می‌گویند.

شالوده فیزیک جدید را نظریه‌های «نسبیت» و «کوانتومی» تشکیل می‌دهد. نظریه نسبیت مربوط به مطالعه پدیده‌ها در سرعت‌های بسیار زیاد و نزدیک به سرعت نور است. نظریه کوانتومی نیز به مطالعه پدیده‌ها در مقیاس‌های بسیار کوچک، مانند مولکول‌ها، اتم‌ها و ذره‌های ریزی که اتم‌ها را می‌سازند، می‌پردازد. ذره‌هایی که اتم‌ها را می‌سازند، ذره‌های زیر- اتمی نامیده می‌شوند. این نام اشاره بر آن دارد که این ذره‌ها اجزای اتم‌ها هستند و از اتم‌ها کوچک‌ترند.

نظریه‌های نسبیت و کوانتومی هر دو طی بیست و پنج سال اول سده بیستم مطرح شدند. نظریه نسبیت را برای نخستین بار آلبرت اینشتین عرضه کرد. نظریه کوانتومی نیز نتیجه 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.

۱-۷- نظریه کوانتومی

آیا تاکنون به نوری که از زغال افروخته و با 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 همه 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 به دست آورد. اگر بین طول موج‌هایی که در یک طیف وجود دارد فاصله‌ای نباشد، آن طیف را طیف پیوسته می‌گوییم.

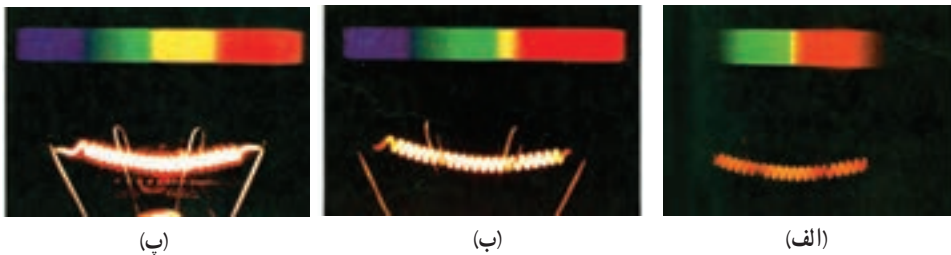
آزمایش نشان می‌دهد که تابش گسیل شده از هر جسم به دمای آن و برخی از خصوصیت‌های سطح آن بستگی دارد و در آن همه طول موج‌ها از فرسرخ، مرئی و فرابنفش به صورت یک طیف پیوسته وجود دارد.

در دمای پایین، مثلاً در دمای اتاق یا کمی بالاتر، بیشترین تابش گسیل شده دارای طول موج‌هایی در ناحیه فرسرخ 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، به تدریج از طول موج‌های بلند به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر و به طرف نور مرئی نزدیک می‌شوند. وقتی دمای جسم به اندازه کافی بالا رود، از آن نور قرمزرنگی گسیل می‌شود، (شکل ۱-۷).



شکل ۱-۷

در دماهای باز هم بالاتر، اجسامی مانند رشته تنگستن داغ درون لامپ روشنایی، نور سفید (یعنی نوری با طیف پیوسته که همه طول موج‌های نور مرئی را در طیف خود دارد) گسیل می‌کنند (شکل ۲-۷).



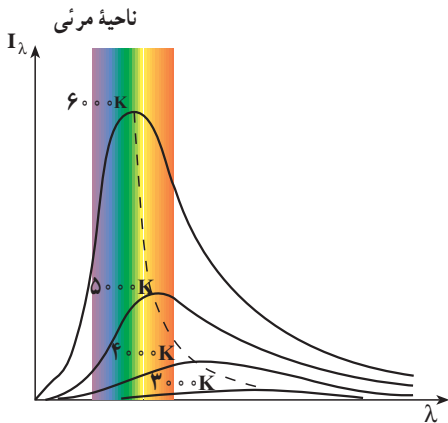
شکل ۲-۷- رشته داغ تنگستن و طیفی که از آن گسیل می‌شود. با افزایش دما از (الف) به (ب) و سپس به (پ) طیف گسیل شده تغییر می‌کند و نور گسیل شده از قرمز به سفید تغییر رنگ می‌دهد.

پرسش ۱-۷

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 گسیل شده 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 الکترومغناطیسی‌ای که در بازه 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 گستره طول موج گسیل می‌شود. اگر یکای طول موج را میکرون (μm) و یکای سطح را سانتی متر مربع (cm^2) اختیار کنیم، یکای تابندگی $\mu\text{m}^2/\text{cm}^2 \cdot \text{W}$ خواهد شد.



شکل ۳-۷- نمودار تقریبی تابندگی پرتوی گسیل شده از جسم بر حسب طول موج

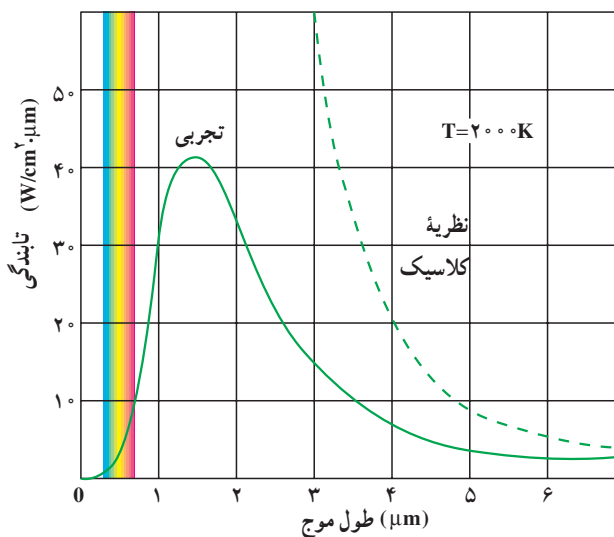
تابندگی یک جسم (I_λ) در طول موج‌ها و دماهای مختلف اندازه‌گیری شده و نتیجه آن در شکل ۳-۷ برای چهار دمای مختلف با تقریب رسم شده است. گستره طول موج‌های مرئی نیز در این شکل مشخص شده است. سطح زیر نمودار تابندگی بر حسب طول موج برابر با شدت تابشی جسم است. همان‌طور که از شکل پیداست با افزایش دما سطح زیر منحنی بیشتر می‌شود.

فعالیت ۱-۷

با بررسی شکل ۳-۷ 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 همه طول موج‌ها با تابندگی یکسان تابش می‌شوند یا نه؟ پ) اگر نتیجه دیگری از این بررسی به دست آورده‌اید به کلاس گزارش کنید.

همان‌طور که در شکل ۳-۷ می‌بینید، هرچه دمای جسم بیشتر باشد، بیشینه 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 نظریه فیزیک کلاسیک تابش گرمایی که از سطح یک جسم گسیل می‌شود نیز از نوسان‌های ذره‌های باردار که درون جسم و در نزدیکی سطح آن، واقع‌اند سرچشمه می‌گیرد.



شکل ۴-۷

کوتاه تابندگی جسم به سمت بی نهایت میل کند که با نتیجه های تجربی شکل ۳-۷ سازگاری نداشت. در شکل ۴-۷ منحنی حاصل از محاسبه های نظری براساس فیزیک کلاسیک (خط چین) همراه با یک منحنی تجربی برای دمای ۲۰۰۰ کلوین نشان داده شده است.

تا ابتدای سده بیستم میلادی، فیزیک دانان نتوانسته بودند با به کار بردن قانون ها و مفهومی های فیزیک کلاسیک، از جمله موج های الکترومغناطیسی گسیل شده از سطح یک جسم، منحنی های تجربی شکل ۳-۷ را توجیه کنند. به عبارت دیگر از محاسبه های آنان نتیجه شد که تابندگی با توان چهارم طول موج نسبت عکس دارد. این موضوع سبب می شود که در طول موج های

فعالیت ۲-۷

در گروه خود دو منحنی شکل ۴-۷ را مورد بحث قرار دهید و موارد ناسازگاری بین آن دو را مشخص کنید.

همان طور که در شکل ۴-۷ 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، کوچک تر خواهد بود. آزمایش نشان می دهد که میان λ_m و دمای مطلق جسم، رابطه زیر برقرار است که قانون جابه جایی وین نام دارد.

$$\lambda_m T = \text{مقدار ثابت} = 2/9 \times 10^{-3} \text{ m.K} \quad (1-7)$$

واژه جابه جایی در این قانون، مربوط به چگونگی حرکت یا جابه جایی بیشینه تابندگی با تغییر دمای جسم است.

دمای بدن انسان 37°C است با محاسبه نشان دهید پیشینه تابندگی بدن انسان در چه ناحیه‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی است.

پاسخ

$$\lambda_m T = 2/9 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

$$\lambda_m = \frac{2/9 \times 10^{-3}}{273 + 37}$$

$$\Rightarrow \lambda_m \approx 9/35 \times 10^{-6} \text{ m}$$

با استفاده از شکل ۶-۹، 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 گسیل شده 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.

کمیت 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 کمیت‌هایی 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 کمیت‌های گسسته را «کوانتومی» می‌نامند. کمترین مقدار یک کمیت کوانتومی را مقدار پایه یا «کوانتوم» آن کمیت می‌خوانند.

برای مثال، در مبحث الکتريسيته ديده ايم كه مقدار بار الكتريكي موجود در يك جسم باردار مضرب درستي از بار يك الكترون ($e = 1/6 \times 10^{-19}C$) است. به اين ترتيب مي گوييم كه بار الكتريكي هر جسم باردار يك كميت كوانتومي است و هر كوانتوم آن برابر بار الكتريكي يك الكترون است. در فصل ۵ همين كتاب نيز ديديم كه بسامد حاصل از موج ايستاده در طنابي كه دو سر آن ثابت شده است به صورت $f_n = nf_1$ و در واقع مضرب صحيحي از مقدار پايه آن، يعني بسامد هماهنگ اول است و بنا بر اين بسامد امواج ايستاده تشكيل شده در طناب نيز كميتي گسسته است.

نظريه پلانك درباره تابش: بنا بر نظريه پلانك مقدار انرژي اي كه جسم به صورت تابش هاي الكترومغناطيسي گسيل مي كند همواره مضرب درستي از يك مقدار پايه است و اين مقدار پايه به بسامد موج الكترومغناطيسي بستگي دارد. به اين ترتيب داريم:

$$E = nhf \quad (2-7)$$

در اين رابطه n يك عدد صحيح مثبت است و ضريب h مقدار ثابتي است كه ثابت پلانك نام دارد. نخستين برآورد اين ثابت توسط پلانك به كمك تطبيق نتيجه محاسبه با منحنی های تجربي مربوط به تابش جسم صورت گرفت. هم اكنون مقدار پذيرفته شده براي اين ثابت برابر با $h = 6/63 \times 10^{-34}Js$ است.

hf كوانتوم انرژي تابشي گسيل شده با بسامد f است و n كه تعداد كوانتوم ها را مشخص مي كند، عدد كوانتومي نام دارد.

در رابطه ۲-۷ اگر ثابت پلانك را برحسب ژول ثانيه قرار دهيم، انرژي برحسب ژول به دست مي آيد؛ ولي در بحث درباره اجزای سازنده اتم ها، ژول به دليل آنكه يكای بزرگی است مناسب نیست و معمولاً از يكای ديگري براي انرژي به نام الكترون ولت (eV) استفاده مي شود. يك الكترون ولت برابر مقدار انرژي موردنياز براي عبور يك الكترون از اختلاف پتانسيل ۱ ولت در خلا است. درحالی كه يك ژول برابر با مقدار انرژي بار الكتريكي برابر يك كولن در عبور از اختلاف پتانسيل يك ولت است. در نتيجه رابطه بين الكترون ولت و ژول به صورت زير است:

$$1eV = 1/6 \times 10^{-19}J = (1/6 \times 10^{-19}C) \times (1V)$$

پتانسيل يك ولت

تمرین ۱-۷

ثابت پلانك را برحسب eV.s به دست آوريد.

تمرین ۲-۷

نور زرد با بسامد تقریبی $6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ، بسامد اصلی نور خورشید را تشکیل می‌دهد. انرژی‌ای که هر کوانتوم این نور (فوتون) حمل می‌کند بر حسب eV چه مقدار است؟

تمرین ۳-۷

انرژی یک کوانتوم رنگ معینی از نور مرئی، برابر $5 \times 10^{-19} \text{ J}$ است. رنگ این نور را مشخص کنید.

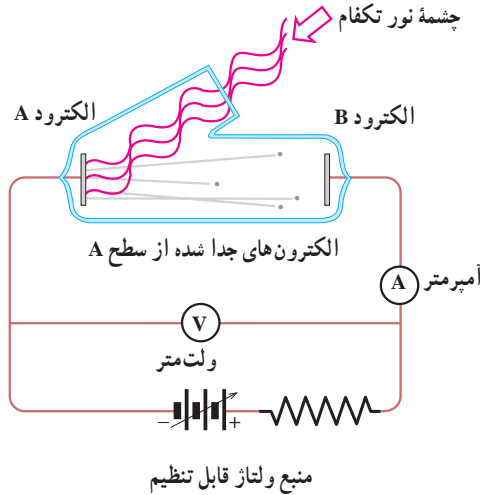
تمرین ۴-۷

بیشترین طول موج گسیلی که از بدن انسان تابش می‌شود برابر $940 \mu\text{m}$ است. الف) بسامد این تابش چه مقدار 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 بر حسب eV چه مقدار است؟

۲-۷- فوتون و پدیده فوتوالکتریک

در سال ۱۸۸۷ میلادی، هانریش هرتز دانشمند آلمانی، مشاهده کرد که وقتی نوری با طول موج بسیار کوتاه – مانند نور فرابنفش – به کلاهی فلزی یک الکتروسکوپ (برق‌نما) باردار منفی می‌تابد، باعث تخلیه الکتروسکوپ (برق‌نما) می‌شود. آزمایش‌های دیگر نشان دادند که این تخلیه الکتریکی، به دلیل جدا شدن الکترون‌ها از سطح کلاهی فلزی روی داده است. این پدیده، یعنی جدا کردن الکترون‌ها از سطح یک فلز توسط تاباندن نور بر آن را پدیده فوتوالکتریک و الکترون‌های گسیل شده از سطح فلز را فوتوالکترون می‌نامند.

برای بررسی پدیده فوتوالکتریک از دستگاهی مطابق شکل ۵-۷ استفاده می‌کنیم. در این دستگاه دو الکتروود فلزی A و B در یک محفظه‌ی خلأ قرار دارند و از بیرون به یک منبع ولتاژ قابل تنظیم متصل شده‌اند. الکتروود A در مقابل یک چشمه نور تکفام (تک بسامد) قرار دارد.



شکل ۵-۷

آزمایش نشان می‌دهد که اگر نوری بر الکتروود A تابد هر قدر هم که ولتاژ بالا باشد، جریانی در مدار مشاهده نمی‌شود. ولی هنگامی که نوری با بسامد مناسب به الکتروود 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 الکتروود A و گسیل آنها شده است. بر اساس قوانین فیزیک کلاسیک، اگر شدت نور برای گسیل فوتوالکترون‌ها از الکتروود A کافی باشد، اثر فوتوالکتریک باید در هر بسامدی رخ دهد. در حالی 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 پدیده فوتوالکتریک باید به تفسیر کوانتومی آن پردازیم. پیش از این دیدیم که بنا بر فرضیه 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 پدیده فوتوالکتریک، با استفاده از فرضیه 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

فرمز انرژی کمتری دارد. اگر بسامد یک موج الکترومغناطیسی برابر f باشد، انرژی فوتون آن برابر خواهد بود با

$$E = hf \quad (۳-۷)$$

براساس پیشنهاد اینستین انرژی یک موج الکترومغناطیسی با بسامد f تنها می‌تواند مضرب درستی از انرژی یک فوتون باشد؛ یعنی:

$$E = nhf \quad (۴-۷)$$

در این صورت می‌گوییم این موج از n فوتون تشکیل شده است.

مثال ۷-۲

الف) انرژی فوتون نور زرد با طول موج میانگین 589nm را برحسب الکترون‌ولت به دست آورید. ثابت پلانک برابر است با $h = 4/14 \times 10^{-15} \text{eVs}$.
ب) تعداد فوتون‌هایی را که در یک ثانیه از یک لامپ زرد 60 واتی گسیل می‌شوند، محاسبه کنید.

پاسخ

الف) موج‌های الکترومغناطیسی با سرعت نور حرکت می‌کنند؛ از این رو داریم:

$$\lambda f = c$$

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

$$= \frac{4/14 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8}{589 \times 10^{-9}}$$

$$= 2/11 \text{ eV}$$

ب)

$$E_T = Pt = 60 \times 1 = 60 \text{ J} = 37/5 \times 10^{11} \text{ eV}$$

$$E_T = nhf = nE$$

$$37/5 \times 10^{11} = n \times 2/11$$

$$n = 1/8 \times 10^{20}$$

یعنی در هر ثانیه $1/8 \times 10^{20}$ فوتون از این لامپ گسیل می‌شود که عدد بسیار بزرگی است.

اینشتین همچنین فرض کرد که در پدیده فوتوالکتریک، هر فوتون (با انرژی hf) صرفاً با یک الکترون برهم کنش می‌کند؛ به طوری که اگر انرژی فوتون به قدر کافی بزرگ باشد، بخشی از آن صرف جدا کردن الکترون از فلز می‌شود و مابقی آن به انرژی جنبشی الکترون جدا شده تبدیل می‌شود. این فرض اینشتین را می‌توان به کمک قانون پایستگی انرژی، به صورت زیر نوشت:

$$hf = W + K \quad (5-7)$$

که در آن W انرژی لازم برای جدا کردن الکترون از سطح فلز و K انرژی جنبشی الکترون جدا شده 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_0 باشد، انرژی جنبشی سریع‌ترین فوتوالکترون‌های گسیل شده از آن برابر خواهد بود با:

$$K_{\text{بیشینه}} = hf - W_0 \quad (6-7)$$

W_0 را تابع کار فلز می‌نامند و همان‌گونه که گفتیم حداقل کار لازم برای خارج کردن یک الکترون از فلز است.

در رابطه ۶-۷ اگر hf از W_0 کوچک‌تر باشد، هیچ الکترونی از فلز کنده نمی‌شود. در نتیجه hf باید حداقل برابر W_0 باشد. به این ترتیب، بسامد قطع از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$f_0 = \frac{W_0}{h} \quad (7-7)$$

مثال ۳-۷

تابع کار تنگستن 4.52 eV است. الف) بسامد و طول موج قطع تنگستن را حساب کنید. ب) بیشینه انرژی جنبشی الکترون‌ها را هنگامی که طول موج 198 nm به کار می‌رود، حساب کنید.

پاسخ

الف) بسامد قطع برابر است با

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{W_0}{h} = \frac{4.52 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}} \\ &= 1.09 \times 10^{15} \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

با توجه به رابطه $\lambda_0 = \frac{c}{f}$ ، طول موج قطع برابر است با

$$\lambda_0 = \frac{3 \times 10^8}{1.09 \times 10^{15}} = 2.7 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$= 270 \text{ nm}$$

$$K_{\text{بیشینه}} = hf - W_0 \quad (\text{ب})$$

$$= \frac{hc}{\lambda} - W_0$$

$$= \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{198 \text{ nm}} - 4.52 \text{ eV}$$

$$= 1.74 \text{ eV} \approx 2.7 \times 10^{-19} \text{ J}$$

تمرین ۷ - ۵

طول موج قطع برای اثر فوتوالکتریک در یک فلز معین برابر ۲۵۴ nm است.
الف) تابع کار این فلز بر حسب الکترون-ولت چه مقدار است؟
ب) آیا اثر فوتوالکتریک به ازای $\lambda > 254 \text{ nm}$ مشاهده خواهد شد یا به ازای $\lambda < 254 \text{ nm}$ ؟ چرا؟

تمرین ۷ - ۶

تابع کار فلز روی ۴/۳۱ eV است. هرگاه نور بر سطحی از جنس روی بتابد و فوتوالکترن‌ها مشاهده شوند،
الف) بلندترین طول موجی که سبب گسیل فوتوالکترن‌ها می‌شود چه مقدار است؟
ب) وقتی نور به طول موج ۲۲۰ nm به کار گرفته شود، انرژی جنبشی بیشینه فوتوالکترن‌ها چقدر می‌شود؟

۳-۷- طیف اتمی

علاوه بر آنچه تا اینجا به آنها اشاره کردیم، پدیده‌های دیگری نیز هستند که فیزیک کلاسیک قادر به تفسیر آنها نبود. لذا فیزیک دانان با فرض‌های غیر کلاسیکی – مانند فرضیه‌های پلانک و اینشتین که قبلاً به آنها اشاره شد – توانستند این پدیده‌ها را به خوبی 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.

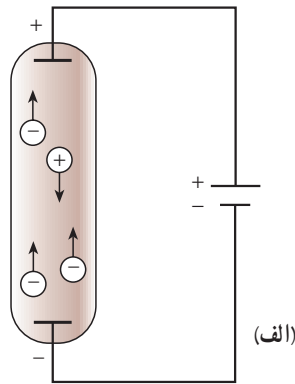
در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه با پاشیدگی نور در منشور آشنا شدید و دیدید که نیوتون برای نخستین بار با گذراندن نور خورشید از منشور «طیف نور سفید» را تشکیل داد. نیوتون نشان داد که نور سفید آمیزه‌ای از رنگ‌های مختلف است. اکنون می‌دانیم نور سفید از طول موج‌های مختلفی، از نور بنفش با طول موج حدود 400 nm تا نور قرمز با طول موج حدود 700 nm ، تشکیل شده است. طیف نور سفید که یک طیف پیوسته است در شکل ۶-۷ نشان داده شده است.



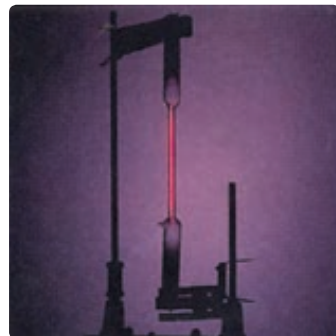
شکل ۶-۷

به همین ترتیب می توان طیف هر نوری را که از رنگ های مختلف تشکیل شده باشد، توسط پاشیدگی در منشور شناسایی کرد. پیش از این با تابش گرمایی که از سطح جسم های جامد گسیل می شود، آشنا شدیم و دیدیم که این تابش دارای طیف پیوسته است.

اکنون به بررسی نوع دیگری از تابش می پردازیم. این تابش توسط لامپ های حاوی بخار بسیار رقیق عنصرها گسیل می شود. این لامپ ها مطابق شکل ۷-۷ الف به صورت لوله های باریک شیشه ای هستند که درون آنها یک گاز رقیق در فشار کم وجود دارد. دو الکترود به نام های کاتد و آند در دو انتهای لوله قرار دارند. اگر بین این دو الکترود ولتاژ بالایی برقرار شود، اتم های گاز درون لامپ مطابق شکل ۷-۷ ب و پ شروع به گسیل نور می کنند. نوری که از لامپ های حاوی بخار عنصرهای متفاوت گسیل می شود، با یکدیگر تفاوت دارد. برای مثال نوری که اتم های بخار جیوه گسیل می کنند، همان گونه که در شکل ۷-۷ نشان داده شده است به رنگ نیلی - آبی است. اگر این نور را مطابق شکل ۷-۷ از منشور بگذرانیم و طیف آن را تشکیل دهیم، می بینیم که این طیف پیوسته نیست، بلکه تنها از چند خط رنگی جدا از هم با طول موج های معین تشکیل شده است.



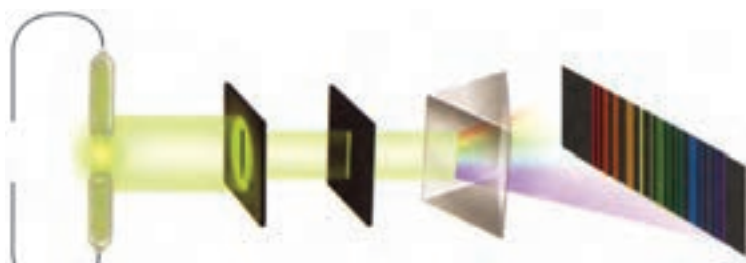
(ب)



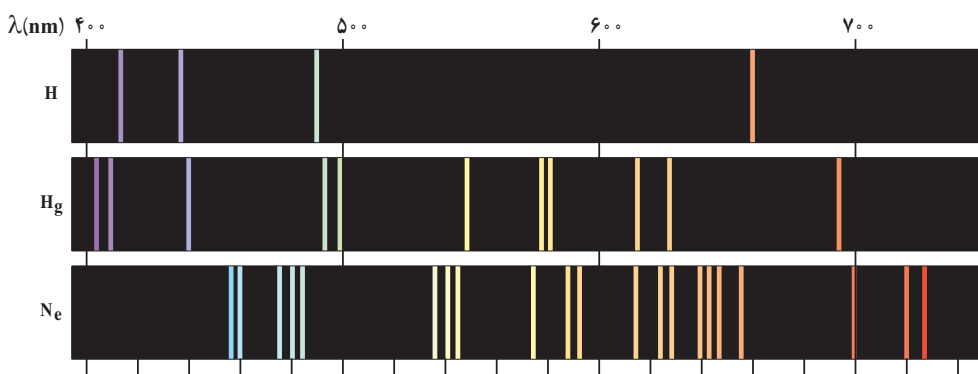
(ب)

شکل ۷-۷

اگر درون لامپ به جای بخار جیوه، بخار عنصر دیگری باشد، باز هم 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 ۸-۷ نشان داده شده است. طیف اتمی حاصل از نور گسیل شده از بخار عنصرها را طیف گسیلی (یا نشری) آن اتم‌ها می‌نامند.



شکل ۸-۷



شکل ۹-۷

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، اما 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 جیوه بدون پوشش فلورسان به عنوان لامپ روشنایی استفاده نمی‌شود.

طیف جذبی: در سال ۱۸۱۴ میلادی فرانیهوفر، فیزیک‌دان آلمانی، کشف کرد که اگر به دقت به طیف خورشید بنگریم، خط‌های تاریکی در طیف پیوستهٔ آن مشاهده خواهیم کرد (شکل ۷-۱). این مطلب نشان می‌دهد که بعضی از طول موج‌ها در نوری که از خورشید به زمین می‌رسد، وجود ندارد و به جای آنها، در طیف پیوستهٔ خورشید خط‌های تاریک (یا سیاه) دیده می‌شود.

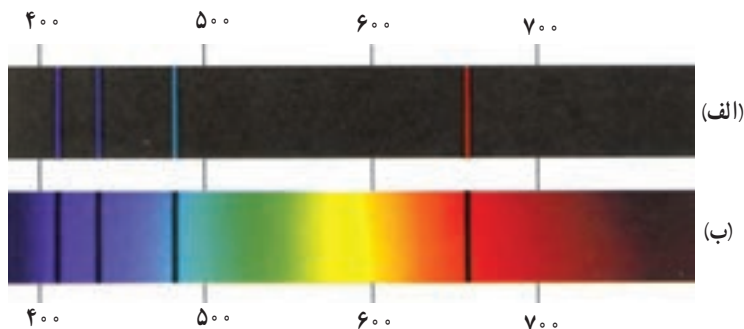
اکنون می‌دانیم که گازهای عنصرهای موجود در جو خورشید، بعضی از طول موج‌های گسیل‌شده از خورشید را جذب می‌کنند و نبود آنها در طیف پیوستهٔ خورشید به صورت خط‌های تاریک ظاهر می‌شود. طیف نور سفیدی را که بعضی از خط‌ها با طول موج‌های آن جذب شده باشد، **طیف جذبی** می‌نامیم. در اواسط سدهٔ نوزدهم، معلوم شد که اگر 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:

۱- 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.

۲- 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 ۷-۱- خط‌های تاریکی که در طیف خورشید دیده می‌شود، خط‌های فرانیهوفر نام دارد. طول موج‌های مربوط توسط جو خورشید از نور تابشی خورشید حذف شده است.

طیف‌های گسیلی (نثری) و جذبی اتم هیدروژن در شکل ۷-۱۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۷-۱۱

(الف) طیف گسیلی، خط‌های روشن معرف طول موج‌های گسیلی هستند.
(ب) طیف جذبی، خط‌های تاریک در زمینه روشن معرف طول موج‌های جذب شده هستند.

از آنچه گفته شد، نتیجه می‌گیریم که طیف اتمی هر عنصر خط‌ها یا طول موج‌های ویژه خود را دارد، و طیف‌های گسیلی و جذبی هر عنصر مانند اثر انگشت افراد می‌تواند برای شناسایی اتم‌ها از یکدیگر به کار رود.

فعالیت ۷-۳

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 **طیف‌نمایی** می‌نامند. طیف‌نمایی ابزار توانمندی برای شناسایی عنصرهاست. در سال‌های پایانی سده نوزدهم میلادی چند عنصر ناشناخته، تنها به کمک طیف‌نمایی کشف شد، ولی علی‌رغم این کاربردهای موفق تجربی، در قرن نوزدهم نظریه قابل قبولی برای تفسیر طیف اتمی وجود نداشت. به عبارت دیگر، این که چرا هر عنصر طیف مخصوص به خود را دارد، سوالی 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 بنا بر نظریه‌های کلاسیکی یک اتم در صورتی نور گسیل می‌کند که به طریقی — مانند برخورد با سایر اتم‌ها یا توسط میدان‌های الکتریکی — به الکترون‌های آن انرژی داده شود؛ در نتیجه الکترون‌ها با به دست آوردن انرژی ارتعاش می‌کنند و موج‌های الکترومغناطیسی به وجود می‌آورند؛ یعنی، نور گسیل می‌کنند. اما این که چرا اتم‌های همهٔ عناصرها 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.

در مورد 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 ریذبرگ — بالمر**: اتم هیدروژن ساده‌ترین اتم‌هاست و طیف آن اولین طیفی بود که به طور 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 ۷-۱۱ نشان داده شده‌اند. بالمر که یک معلم سوئسی بود، این اندازه‌گیری‌ها را مطالعه کرد و نشان داد که طول موج‌های این طیف را می‌توان با دقت بسیار زیاد از رابطهٔ زیر به دست آورد:

$$\lambda = 364 / 56 \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad (8-7)$$

که در آن λ طول موج خط‌های طیف برحسب نانومتر (nm) و n یکی از عددهای صحیح زیر است:

$$n = 3, 4, 5, 6$$

گفتنی است که بالمر این رابطه را صرفاً با بررسی رابطه‌های ریاضی مختلف و بدون هیچ‌گونه تجربهٔ فیزیکی به دست آورد.

طول موج خط‌های طیفی شکل ۷-۱۱ را به کمک رابطه‌ی بالمر به دست آورید.

پاسخ

$$\lambda = 364 / 56 \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad \text{داریم:}$$

برای $n = 3$ به دست می‌آوریم.

$$\lambda_1 = 364 / 56 \frac{9}{9 - 4} = 656 / 2 \text{ nm}$$

برای $n = 4$ داریم:

$$\lambda_2 = 364 / 56 \frac{16}{16 - 4} = 486 / 0 \text{ nm}$$

و به همین ترتیب

$$n = 5 \Rightarrow \lambda_3 = 434 / 0 \text{ nm}$$

$$n = 6 \Rightarrow \lambda_4 = 410 / 13 \text{ nm}$$

کار عمده در زمینه‌ی جست‌وجو برای طیف کامل اتم هیدروژن توسط ری‌دبرگ در حدود سال ۱۸۹۰ میلادی انجام شد. ری‌دبرگ کار کردن با عکس طول موج را مناسب‌تر تشخیص داد؛ لذا رابطه‌ی بالمر (معادله‌ی ۷-۸) را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (7-9)$$

که در آن R_H ثابت ری‌دبرگ برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود و مقدار آن برابر است با:

$$R_H = 109678 \text{ (nm)}^{-1}$$

طول موج تمامی خط‌های طیف اتم هیدروژن را می‌توان از رابطه‌ی زیر که به رابطه‌ی ری‌دبرگ معروف است به دست آورد.

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n > n' \quad (7-10)$$

با قرار دادن $n' = 2$ رابطه‌ی بالمر (۷-۹) به دست می‌آید. خط‌های طیف مربوط به $n' = 2$ را «رشته‌ی بالمر» می‌نامند.

خط‌های دیگر طیف اتم هیدروژن، با قرار دادن عددهای صحیح دیگر به جای n' به شرح زیر به دست می‌آیند.

به ازای $n'=1$ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

این رشته را «رشته لیمان» می‌نامند.
همچنین به ازای $n'=3$ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 4, 5, 6, \dots$$

این رشته را نیز «رشته پاشن» می‌نامند. در جدول ۱-۷ رشته‌های طیف اتم هیدروژن داده شده‌اند.

جدول ۱-۷

نام رشته	مقدار n'	رابطه ریذبرگ مربوط	مقدارهای n	گستره طول موج
لیمان	۱	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 2, 3, 4, \dots$	فرابنفش
بالمر	۲	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 3, 4, 5, \dots$	فرابنفش و مرئی
پاشن	۳	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 4, 5, 6, \dots$	فروسرخ
براکت	۴	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 5, 6, 7, \dots$	فروسرخ
پفوند	۵	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 6, 7, 8, \dots$	فروسرخ

طول موج اولین خط طیفی اتم هیدروژن در رشته لیمان را که برای آن $n' = 1$ و $n = 2$ است به دست آورید و تعیین کنید که این خط در کدام گستره موج‌های الکترومغناطیسی واقع است.

پاسخ

برای $n' = 1$ و $n = 2$ طبق رابطه ریذبرگ 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:

$$\lambda = \frac{4}{3R_H} = \frac{4}{3 \times 0.0109 \text{ (nm)}^{-1}} = 121 \text{ nm}$$

با مراجعه به طیف موج‌های الکترومغناطیسی در فصل ۲ مشاهده می‌کنیم که این خط طیفی در ناحیه فرابنفش واقع است.

وجود خط‌های طیفی متفاوت برای اتم‌ها و رابطه ساده و دقیقی مثل رابطه ریذبرگ برای طیف اتم هیدروژن، لزوم داشتن الگویی برای اتم را نشان می‌داد. الگویی که بتوان به کمک آن این نتیجه‌های تجربی را توجیه کرد.

۷-۴- 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 بر اساس 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 ۱۹۱۲ میلادی الگوی دیگری برای ساختار اتم ارائه کرد.

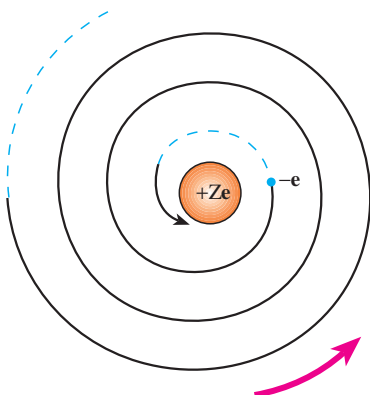
الگوی اتمی رادرفورد: در الگوی اتمی رادرفورد همه بار مثبت اتم در یک ناحیه مرکزی با حجم بسیار کوچکی به نام هسته متمرکز شده است و اطراف آن را الکترون‌ها با بار منفی، در فاصله‌ای زیاد احاطه کرده‌اند، به گونه‌ای که می‌توان گفت فضای بین هسته و الکترون‌ها خالی است. رادرفورد در الگویی که برای اتم ارائه کرد به 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 در هم فرو ریزد که این موضوع کاملاً خلاف چیزی است که در عمل وجود دارد.

اگر هم فرض کنیم که الکترون‌ها - مانند سیاره‌های منظومه خورشیدی که به دور خورشید در حرکت‌اند - 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 این رو، بنابر نظریه 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 (شکل ۷-۱۲).

بدین ترتیب 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 گسسته اتمی نیست.



شکل ۷-۱۲

الگوی اتمی بور: نیلس بور، فیزیکدان دانمارکی، در سال ۱۹۱۳ میلادی برای حل مشکل ناپایداری الگوی اتمی رادرفورد و با توجه به طیف گسسته تابش گسیل شده از اتم‌ها و رابطه تجربی ریبرگ – المبر 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:

۱- 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 هسته با بار $+e$ در شکل ۷-۱۳ نشان داده شده است. نیروی مرکزگرا این حرکت از ربایش الکتریکی بین الکترون و هسته است و برابر است با $\frac{ke^2}{r^2}$ ($k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$). 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:

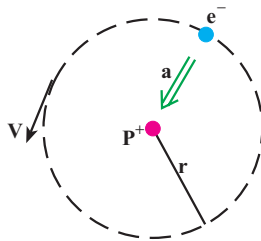
$$\frac{ke^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (7-11)$$

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:

$$E = K + U = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{ke^2}{r} \quad (7-12)$$

با استفاده از رابطه ۷-۱۱ به دست می‌آوریم:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = +\frac{ke^2}{2r} \quad (7-13)$$



شکل ۷-۱۳

در نتیجه انرژی کل الکترون روی یک مدار مانا با شعاع r برابر است با:

$$E = -\frac{ke^2}{2r} \quad (14-7)$$

۲- الکترون در حین حرکت روی یک مدار مانا، برخلاف نظریه الکترومغناطیسی کلاسیک، تابشی گسیل نمی‌کند. در این وضعیت می‌گوییم الکترون در یک «حالت مانا» است.

۳- شعاع مدارهای مانا مقدارهای مشخص گسسته‌ای می‌توانند داشته باشند؛ اگر شعاع اولین مدار را برابر a_0 بگیریم شعاع‌های مجاز از رابطه زیر به دست می‌آیند.

$$r_n = a_0 n^2 \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (15-7)$$

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 به دست آورد:

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2} \quad (16-7)$$

که در آن h ثابت پلانک، k ثابت کولن، e بار الکترون و m جرم الکترون است.

مثال ۷-۷

شعاع اتم بور را محاسبه کنید.

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2}$$

پاسخ

$$\begin{aligned} &= \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})^2}{4(3/14)^2 (9 \times 10^{-31} \text{ kg})(9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1/6 \times 10^{-19} \text{ C})^2} \\ &= 0.529 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.529 \text{ nm} \end{aligned}$$

اکنون اگر به کمک رابطه ۱۴-۷ مقدار انرژی الکترون در مدار مجاز n ام را محاسبه کنیم، به دست می‌آوریم:

$$E_n = -\frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{h^2} \times \frac{1}{n^2} \quad n = 1, 2, \dots \quad (17-7)$$

بدین ترتیب الکترون تنها مجاز است انرژی‌ای برابر با یکی از مقدارهایی که از رابطه ۱۷-۷ به دست می‌آید داشته باشد. هر یک از این مقدارهای مجاز را یک *تراز انرژی* می‌نامند.

۴- 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:

$$hf = E_{n_1} - E_{n_2} \quad (18-7)$$

رابطه ۱۷-۷ را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم:

$$E_n = -\frac{E_R}{n^2} \quad (19-7)$$

که در آن با استفاده از مقدار کمیت‌های ثابت h و e ، m ، k داریم:

$$E_R = \frac{2\pi^2 k^2 m e^4}{h^2} = 2/17 \times 10^{-18} \text{ J} = 13/6 \text{ eV}$$

این مقدار انرژی را یک *ریدبرگ* می‌نامند. یک ریدبرگ برابر $13/6$ الکترون ولت یا $2/17 \times 10^{-18}$ ژول است.

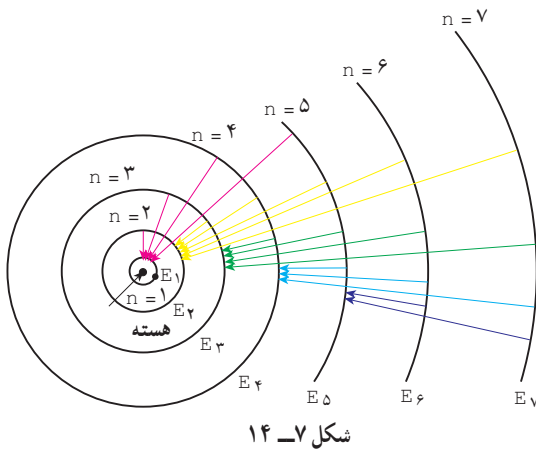
اگر الکترون اتم هیدروژن، در مدار اول ($n = 1$) باشد، می‌گوییم در حالت پایه قرار دارد. مدارهای با انرژی بالاتر از E_1 را حالت‌های *برانگیخته* می‌خوانند. انرژی این حالت‌ها از رابطه (۱۹-۷) به‌آزای $n = 2, 3, \dots$ به دست می‌آید:

$$n = 2 \Rightarrow E_2 = -\frac{E_R}{4} = -3/4 \text{ eV} = -\frac{1}{4} \text{ ریدبرگ}$$

و

$$n = 3 \Rightarrow E_3 = -\frac{E_R}{9} = -1/5 \text{ eV} = -\frac{1}{9} \text{ ریدبرگ}$$

و به همین ترتیب برای بقیه مقدارهای n . این مقدارها، مقدارهای مجاز انرژی الکترون در اتم هیدروژن اند. هر مقدار مجاز انرژی را یک تراز انرژی الکترون در اتم هیدروژن می‌نامیم.



مدارهای الکترون در الگوی بور

برای اتم هیدروژن در شکل ۷-۱۴ نشان داده شده است.

الگوی بور برای اتم هیدروژن نه تنها مشکل ناپایداری الگوی اتمی را در فرورد را نداشت، بلکه به کمک این الگو طیف گسلی اتم هیدروژن و رابطه تجربی ریدبرگ - بالمر نیز به درستی توضیح داده شد.

مثال ۷-۷

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 به دست آورید. ب) طول موج این فوتون را محاسبه و نتیجه را با رابطه ریدبرگ مقایسه کنید.

پاسخ

الف) با استفاده از رابطه‌های ۷-۱۸ و ۷-۱۹ 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:

$$\frac{E_R}{hc} = \frac{2/17 \times 10^{-18}}{6/63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 1/0.9 \times 10^7 \text{ m}^{-1} = 0/0.109 (\text{nm})^{-1}$$

که همان ثابت ریدبرگ است.

در نتیجه با فرضیه‌های بور می‌توانیم رابطه تجربی ریدبرگ را به دست 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 رشته بالمر را گسیل می‌کند.

تمرین ۷-۷

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 آن که 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_2 با n_1 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 به دست می‌آورد.

فعالیت ۷-۱۴

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 رابطه ۷-۱۷ نیز به همین معناست.

انرژی الکترون در مدار اول بور برابر $E_1 = -13.6\text{eV}$ است؛ و این بدان معناست که برای آنکه الکترونی را که در حالت پایه اتم هیدروژن است کاملاً از قید هسته رها کنیم، باید به آن 13.6eV انرژی

بدهیم. این مقدار انرژی را انرژی بستگی الکترون در تراز اول اتم هیدروژن می‌نامیم. این مقدار با تجربه به خوبی سازگار است.

تمرین ۷-۸

انرژی بستگی الکترون را در هر یک از حالت‌های برانگیخته E_2 و E_3 اتم هیدروژن به دست آورید.

نظریه 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 درباره 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.

۷-۵- آشنایی با لیزر

پیش از نیم قرن از ساخت نخستین لیزر^۱ یا قوتی توسط مایمن^۲ و نخستین لیزر گازی هلیم – 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

۱- کلمه لیزر از سر حرف واژه‌های انگلیسی در عبارت زیر گرفته شده و به معنای «تقویت نور به روش گسیل القایی تابش» است.

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)

۲- T. H. Maiman

و فناوری امکان ساخت اولین لیزر را فراهم کند. از آن پس کاربرد لیزر در زمینه‌های مختلف به سرعت افزایش یافت به طوری که هم‌اکنون در بسیاری از وسیله‌های مورد استفاده ما در زندگی و صنعت، از قبیل دستگاه‌های بازخوانی اطلاعات از روی لوح‌های فشرده، چاپگرها، شبکه‌های مخابرات کابل نوری، دستگاه‌های یرش فلزات (شکل ۷-۱۵-الف) و ... کاربرد زیادی پیدا کرده است. در حرفه پزشکی نیز جهت انجام پاره‌ای امور هم چون جراحی، بخیه بافت‌های بدن، اصلاح دید چشم (شکل ۷-۱۵-ب) و ... کاربرد زیادی دارد.



(ب)



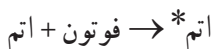
(الف)

شکل ۷-۱۵

فعالیت ۷-۵

به اتفاق دیگر اعضای گروه خود، فهرستی دیگر از کاربردهای لیزر در زندگی، صنعت و فناوری 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:



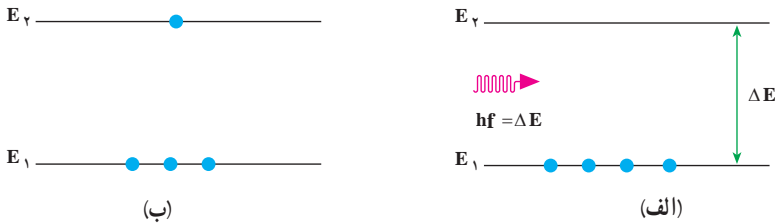
علامت ستاره حاکی از حالت برانگیخته است. برهم کنش فوتون با اتم را جذب می‌نامیم که در نمودارهای شکل ۷-۱۶ نشان داده شده است. شکل ۷-۱۶-الف اتم را قبل از دریافت تابش و شکل

۱۶-۷- ب اتم را پس از دریافت تابش نشان می دهد. همان طور که می بینید یکی از الکترون هایی که در تراز E_1 قرار دارد با جذب انرژی hf به تراز E_2 می رود؛ به عبارت دیگر:

$$E_1 + hf = E_2$$

یا

$$\Delta E = E_2 - E_1 = hf$$

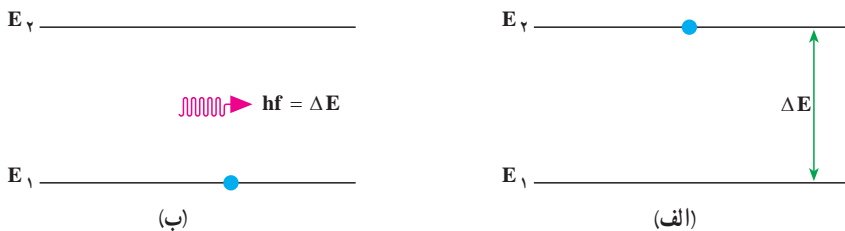


لازم به ذکر است که اتم تنها فوتون هایی را جذب می کند که انرژی آنها، hf ، با اختلاف انرژی بین ترازهای اتمی، ΔE ، برابر باشد. همچنین دیدیم که هرگاه اتم در حالت برانگیخته باشد با گسیل فوتون به حالت پایین تر می رود. این برهم کنش خودبه خود نامیده می شود و آن را به صورت زیر نمایش می دهیم:

$$\text{فوتون} + \text{اتم} \rightarrow \text{اتم}^*$$

این برهم کنش در نمودارهای شکل ۱۷-۷ نشان داده شده است. شکل ۱۷-۷- الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۱۷-۷- ب اتم را در حالت پایه نشان می دهد. توجه کنید الکترون با گسیل تابش از حالت برانگیخته به حالت پایه می رود. در این مورد نیز انرژی فوتون گسیل شده برابر اختلاف انرژی بین دو تراز اتمی است؛ یعنی:

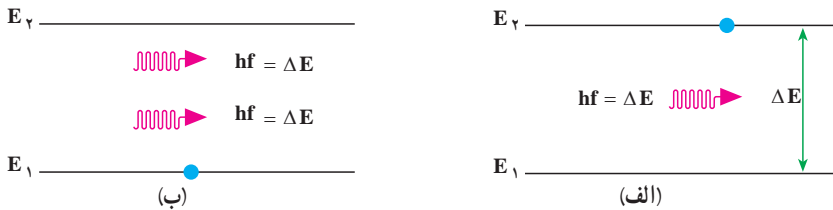
$$hf = E_2 - E_1 = \Delta E$$



نوع دیگری از برهم کنش فوتون با اتم، که اساس کار لیزر به شمار می‌آید، گسیل القایی (یا تحریک شده) است. در این برهم کنش، اتم ابتدا در حالت برانگیخته است. آنگاه یک فوتون با انرژی hf که برابر اختلاف انرژی دو تراز اتم است، اتم برانگیخته را وادار می‌دارد تا با گسیل یک فوتون دیگر با همین بسامد، به حالت پایین‌تر یا حالت پایه برود. این برهم کنش را به صورت زیر نمایش می‌دهیم:

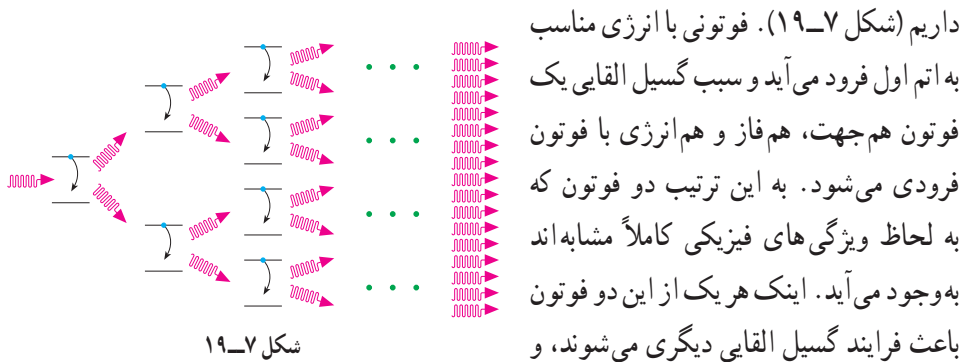


این برهم کنش در نمودارهای شکل ۷-۱۸ نشان داده شده است. شکل ۷-۱۸ الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۷-۱۸ ب اتم را در حالت پایه نشان می‌دهد. توجه به این نکته ضروری است که اگر اتم در حالتی که در شکل ۷-۱۸ الف نشان داده شده است به حال خود هم گذاشته می‌شد، سرانجام الکترون با تابش یک فوتون به حالت پایین‌تر یا پایه می‌رفت، در حالی که با تابش یک فوتون به آن، نه تنها این فرایند سریع‌تر انجام می‌شود، بلکه همان‌طور که در شکل ۷-۱۸ ب نیز دیده می‌شود، فوتون گسیل شده از اتم، با فوتون فرودی هم جهت، هم فاز و هم انرژی است.



شکل ۷-۱۸

اکنون فرض کنید مجموعه‌ای از اتم‌های یکسان که همگی در یک حالت برانگیخته‌اند، در اختیار



شکل ۷-۱۹

داریم (شکل ۷-۱۹). فوتونی با انرژی مناسب به اتم اول فرود می‌آید و سبب گسیل القایی یک فوتون هم جهت، هم فاز و هم انرژی با فوتون فرودی می‌شود. به این ترتیب دو فوتون که به لحاظ ویژگی‌های فیزیکی کاملاً مشابه‌اند به وجود می‌آید. اینک هر یک از این دو فوتون باعث فرایند گسیل القایی دیگری می‌شوند، و

به این ترتیب چهار فوتون هم جهت، هم فاز و هم انرژی تولید می‌شود. این فرایند، یعنی دو برابر شدن تعداد فوتون‌ها در هر مرحله ادامه می‌یابد تا باریکهٔ شدیدی از فوتون‌ها که همگی هم جهت، هم فاز و هم انرژی‌اند، 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 ۷-۱۹ صرفاً طرح واره‌ای از فرایند گسیل القایی را نشان می‌دهد.

تمرین‌های فصل هفتم

- ۱- چند پدیده را نام ببرید که فیزیک کلاسیک قادر به توجیه آن نیست.
- ۲- دمای یک تکه زغال فروخته $T = 900 \text{ K}$ است. طول موجی را که با بیشترین تابندگی گسیل می‌شود، حساب کنید.
- ۳- یکی از سازوکارهای تعیین وضعیت یک ماهواره، مبتنی بر آشکارسازی امواج گسیل شده از سطح زمین است. اگر دمای سطح زمین را 27°C فرض کنیم، طول موج دریافتی توسط این آشکارساز چه مقدار و در چه محدوده‌ای از طیف موج الکترومغناطیسی خواهد بود؟
- ۴- حداقل انرژی لازم برای جدا کردن یک الکترون از سطح فلز سدیم برابر با $2/28 \text{ eV}$ است. الف) آیا فوتون‌هایی با طول موج 680 nm قادر به جدا کردن الکترون از سطح این فلز هستند؟ ب) طول موج قطع برای گسیل فوتوالکترون از سطح فلز سدیم چه قدر است و این طول موج مربوط به چه رنگی است؟
- ۵- در چه مواردی یک جسم، طیف پیوسته یا ناپیوسته گسیل می‌کند؟
- ۶- 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؟
- ۷- آیا ممکن است به کمک طیف خورشید، عناصر موجود در خورشید را شناسایی کرد؟ توضیح دهید.
- ۸- ضعف مدل اتمی رادرفورد را در مورد پایداری اتم توضیح دهید. بور چگونه پایداری اتم هیدروژن را توضیح داد؟
- ۹- ناپیوسته بودن طیف گسیلی اتم هیدروژن را براساس مدل اتمی بور توضیح دهید.
- ۱۰- در پدیدهٔ شفق قطبی مولکول‌های اکسیژن و نیتروژن جو در اثر برخورد با زبانه‌های خورشیدی یونیده یا برانگیخته می‌شوند. اتم‌های برانگیخته در بازگشت به حالت پایهٔ خود، فوتون‌هایی

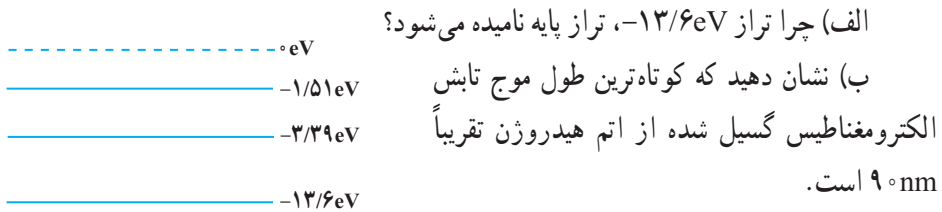
گسیل می کنند که برخی از رنگ های شفق قطبی ناشی از چنین گسیل هایی است. در گسیل فوتون از اتم نیتروژن، طول موج فوتون ها 63°nm است. رنگ و انرژی این فوتون ها را تعیین کنید.

۱۱- طول موج رشته لیمان مربوط به اتم هیدروژن را با استفاده از رابطه ریدبرگ حساب کنید. مکان این خطوط را در طیف موج های الکترومغناطیسی مشخص کنید.

۱۲- چه جنبه هایی از مدل بور در مورد اتم هیدروژن (الف) کلاسیکی، و (ب) غیر کلاسیکی است؟

۱۳- اگر الکترون در اتم هیدروژن در تراز $n = 4$ باشد، چه طول موج هایی را می تواند تابش کند؟

۱۴- شکل ۷-۲ تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می دهد.



شکل ۷-۲

ب) کدام گذار (بین دو تراز) می تواند به گسیل

فوتونی با طول موج 660nm منجر شود؟

۱۵- یک لامپ بخار سدیم، فوتون هایی با طول موج 589nm گسیل می کند؛ اگر توان تابشی

لامپ 6W باشد، در هر ثانیه چند فوتون از این لامپ گسیل می شود؟

۱۶- طول موج فوتون های گسیلی از یک لامپ نارنجی رنگ برابر 600nm است. بسامد و

انرژی فوتون های گسیلی را حساب کنید. انرژی را بر حسب ژول و همچنین الکترون-ولت بیان کنید.

۱۷- انرژی یونش، انرژی لازم برای خارج کردن یک الکترون از اتم است. انرژی یونش را

در موارد زیر حساب کنید.

الف) حالت پایه اتم هیدروژن ($n = 1$)

ب) تراز $n = 3$ اتم هیدروژن

۱۸- با استفاده از رابطه بور اختلاف انرژی $E_{n_1} - E_{n_2} = \Delta E(n_1 \rightarrow n_2)$ را حساب کنید و

نشان دهید که :

$$\Delta E(4 \rightarrow 2) = \Delta E(4 \rightarrow 3) + \Delta E(3 \rightarrow 2) \quad \text{الف)}$$

$$\Delta E(4 \rightarrow 1) = \Delta E(4 \rightarrow 2) + \Delta E(2 \rightarrow 1) \quad \text{ب)}$$

۱۹- یک اتم هیدروژن در حالت $n = 6$ 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 این صورت چند نوع فوتون با انرژی مختلف گسیل خواهد شد؟

۲۰- یکی از مشکلاتی که نازک شدن لایه 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؟

۲۱- توان باریکه نور خروجی از یک لیزر گازی هلیم نئون برابر $5/0$ میلی وات است. اگر توان ورودی این لیزر 50 W باشد،

الف) بازده این لیزر را حساب کنید.

ب) اگر طول موج باریکه نور خروجی 633 nm باشد، در هر ثانیه چند فوتون از این لیزر گسیل می‌شود؟

۲۲- پایین ترین بسامد رایج موج‌های الکترومغناطیسی، بسامد خطوط انتقال نیروست و مقدار آن برابر 60 Hz است. بالاترین بسامدها مربوط به پرتوهای گاما است و مقدار تقریبی آنها $10^{21} \times 10^0\text{ Hz}$ است. بسامدهای پایین تر و بالاتر نیز وجود دارند. اما نسبتاً کمیاب اند.

الف) انرژی یک فوتون را در هر یک از این بسامدها برحسب الکترون ولت حساب کنید.

ب) برای آسیب رساندن به یک مولکول DNA چه تعداد از فوتون‌های کم بسامد لازم است؟ (برای آسیب رساندن به مولکول DNA تقریباً 1 eV انرژی لازم است.)

پ) چند مولکول DNA توسط یکی از فوتون‌های پرتو گاما منهدم می‌شوند؟

آشنایی با ساختار هسته



فصل



آشنایی با ساختار هسته

در فصل قبل با برخی از مفهومی‌های فیزیک جدید آشنا شدیم. نظریه‌های نسبیت و کوانتومی در سده بیستم میلادی، فیزیک را به طور کامل متحول ساخت. امروزه دانشمندان به کمک مفهومی‌ها 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 هسته اتم و برخی از ویژگی‌ها و واکنش‌های مربوط به آن را بررسی می‌کنیم.

۸-۱ - ساختار هسته اتم

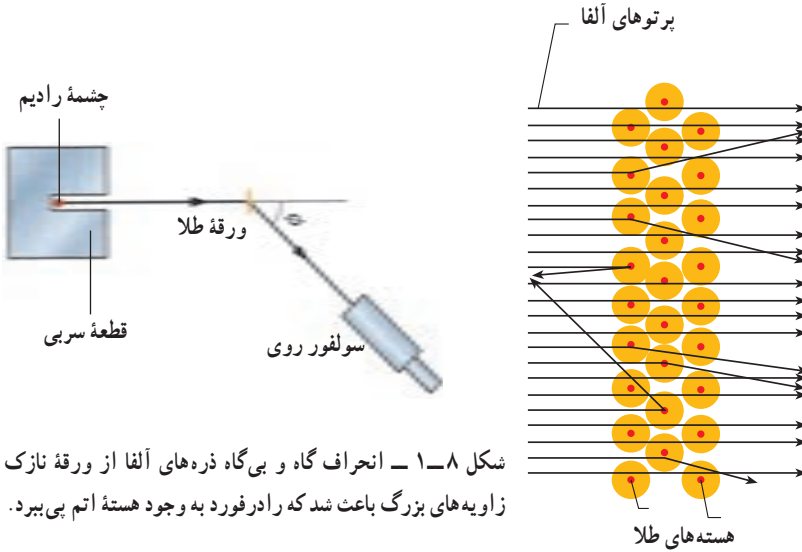
کشف پرتوزایی در سال ۱۸۹۶ میلادی (۱۲۷۵ ه.ش) آغازی برای پی‌بردن به وجود هسته اتم بود. این کشف به شناخت کنونی ما از اتم انجامید و اطلاعاتی را در اختیار ما قرار داد که پیامدهای آن تأثیری ژرف بر جامعه بشری داشت.

کشف هسته 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 ورقه طلا بگذرند. در عمل نیز اغلب این ذره‌ها بدون انحراف یا با انحراف مختصر از ورقه می‌گذشتند و در برخورد با صفحه فلورسانس، 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 بود که گلوله توپی را به ورقه نازکی از کاغذ شلیک کنید و با شگفتی مشاهده کنید که پس از برخورد، گلوله توپ بازگردد.»

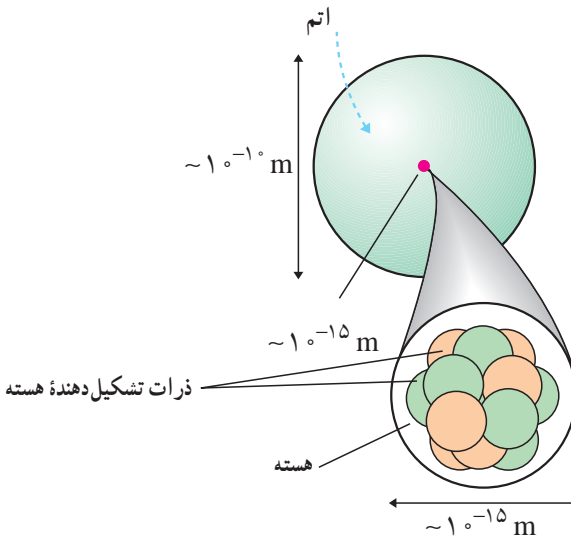
این ذره‌ها باید با چیز بزرگی برخورد کرده باشند؛ اما با چه چیزی؟ رادرفورد استدلال کرد که ذره‌های بدون انحراف باید از قسمت‌هایی از ورقه گذشته باشند که تهی بوده باشند، در حالی که ذره‌های

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 ۸-۱ - انحراف گاه و بی‌گاه ذره‌های آلفا از ورقه نازک طلا در زاویه‌های بزرگ باعث شد که رادرفورد به وجود هسته اتم پی ببرد.

بررسی‌های رادرفورد نشان داد که ابعاد هسته اتم در حدود 10^{-15} m (۱ فرمی یا ۱ فمتومتر) و ابعاد اتم 10^{-1} m (۱ آنگستروم) است.



شکل ۸-۲ - مقایسه اتم با هسته آن

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 هسته اتم فقط ذره‌های شناخته شده زیر اتمی الکترون و هسته هیدروژن معمولی (پروتون) بودند. بعدها با کشف نوترون معلوم شد که هسته از پروتون و نوترون ساخته شده است. جدول ۱-۸، 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.

$$A = Z + N \quad (1-8)$$

در فیزیک هسته‌ای هر هسته را با نماد شیمیایی مربوط به آن و A و Z را به صورت زیر مشخص می‌کنند.

$$X = {}^A_Z X$$

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:

$${}^1_1\text{H} \text{ یا } {}^1_0\text{H} = \text{هسته اتم هیدروژن}$$

$${}^{16}_8\text{O} \text{ یا } {}^{16}_6\text{O} = \text{هسته اتم اکسیژن}$$

$${}^{56}_{26}\text{Fe} \text{ یا } {}^{56}_{30}\text{Fe} = \text{هسته اتم آهن}$$

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 - ۲۳۵ و اورانیم - 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 رادیاب 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 ۸-۱

نام ذره	بار (کولن)	جرم (kg)	شعاع (fm)
الکترون	$-1/6 \times 10^{-19} = -e$	$9/1 \times 10^{-31} = m_e$	غیرقابل اندازه‌گیری با وسایل موجود
پروتون	$+1/6 \times 10^{-19} = +e$	$1/67 \times 10^{-27} = m_p$	۱/۲
نوترون	صفر	$1/68 \times 10^{-27} = m_n$	۱/۲

۱- 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 محاسبه آن به مقدار تقریباً 10^{14}g/cm^3 می‌رسیم که به صورتی باورنکردنی بزرگ است (چگالی آب 1g/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 شده 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 نکه 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 هسته دارای بار مثبت و الکترون دارای بار منفی بررسی می‌شود.

فعالیت ۲-۸

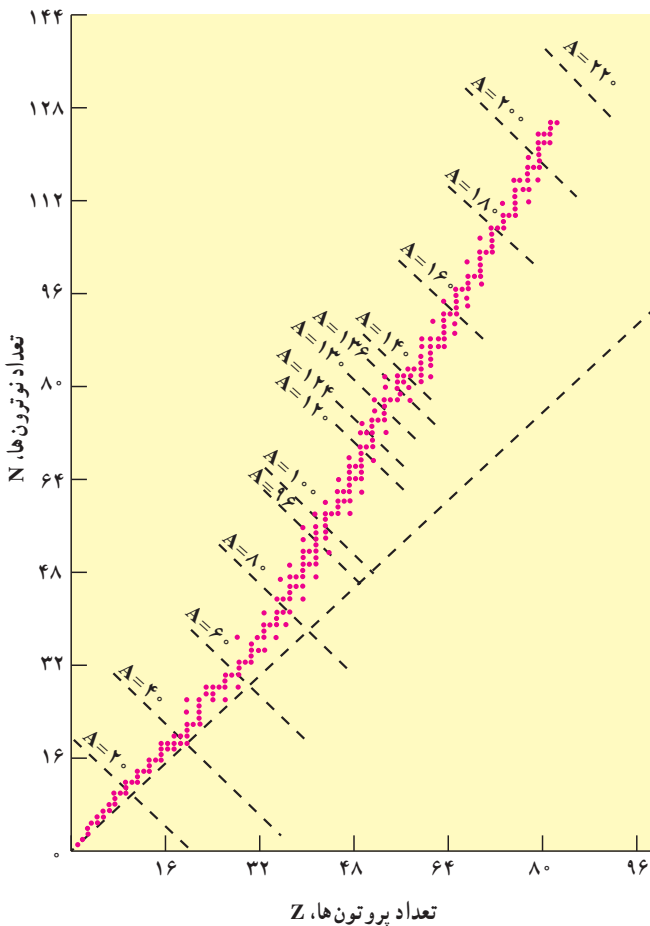
با مراجعه به کتاب‌های فیزیک ۲ و ۳ و با استفاده از جدول ۸-۱ نیروهای گرانشی و الکتریکی بین دو پروتون را که به فاصله r از یکدیگر قرار دارند، محاسبه کنید.

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 به قدری کند 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 به طور 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 ۸-۳ نشان داده شده است.



شکل ۸-۳

همان‌طور که مشاهده می‌شود، خط پایداری ایزوتوپ‌ها ابتدا بر خط $N = Z$ منطبق است اما با زیاد شدن Z به تدریج از آن منحرف می‌شود و ایزوتوپ‌های پایدار سنگین‌تر دارای تعداد نوترون بیش از پروتون‌اند. دلیل آن نیز روشن است؛ زیرا نوترون به هسته رابیش هسته‌ای اضافه می‌کند بدون اینکه رانش کولنی داشته باشد.

فعالیت ۸-۳

با توجه به شکل ۸-۳ و با بحث در گروه خود به پرسش‌های زیر پاسخ دهید؛
 الف) خط راست خط چین به چه مقدارهای Z ، N ، 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 هسته X را با M_x و جرم پروتون را با M_p و جرم نوترون را با M_n نشان دهیم، خواهیم داشت:

$$M_x < ZM_p + NM_n \quad (2-8)$$

اگر اختلاف جرم دو طرف رابطه بالا را با ΔM نشان دهیم، خواهیم داشت:

$$\Delta M = ZM_p + NM_n - M_x \quad (3-8)$$

این اختلاف جرم طبق رابطه معروف اینشتین:

$$E = mc^2 \quad (4-8)$$

به انرژی تبدیل می‌شود. این انرژی را «انرژی بستگی» می‌نامند و آن را با B نشان می‌دهند. پس داریم:

$$B = \Delta mc^2 = [ZM_p + NM_n - M_x]c^2 \quad (5-8)$$

در موقع تشکیل هسته 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 رابطه ۸-۵ 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 بکاهای 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 $\frac{1}{12}$ جرم اتم کربن ۱۲ که آن را طبق تعریف $12/000000000000$ u در نظر می‌گیرند. برحسب این یکا، جرم پروتون $1/007276$ u، جرم الکترون $0/000549$ u و جرم نوترون $1/008665$ u است.

الف) یکای جرم اتمی را برحسب کیلوگرم محاسبه کنید.
 ب) اگر $1u$ 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 $N_A = 6.022137 \times 10^{23}$

پس یک مول کربن یعنی 12 kg نیز حاوی همین تعداد اتم کربن است؛ پس:

$$1u = \frac{1}{12} (0.012 \text{ kg}) \frac{1}{6.022137 \times 10^{23}} = 1.6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

حال انرژی معادل این جرم برابر است با:

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$E = 1u \times c^2$$

$$= (1.6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}) (2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 1.49 \times 10^{-10} \text{ J}$$

می‌دانیم که

$$1 \text{ J} = 6.24151 \times 10^{18} \text{ eV} = 6.24151 \times 10^{12} \text{ MeV}$$

پس، انرژی معادل جرم $1u$ برابر است با:

$$E = 931.5 \text{ MeV}$$

برای به دست آوردن انرژی آزاد شده در فرایندهای هسته‌ای کافی است اختلاف جرم دو طرف واکنش برحسب u را در 931.5 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.

هسته دوتریم را که از یک پروتون و نوترون تشکیل شده است، «دوترن» می‌نامند. جرم اتمی ${}^2\text{H}$ برابر 2.014102u است. انرژی بستگی آن را محاسبه کنید.
پاسخ: ابتدا جرم هسته دوتریوم را حساب می‌کنیم.

جرم یک الکترون - جرم اتم دوتریوم = جرم هسته دوتریوم

$$\begin{aligned} m({}^2\text{H}) &= M({}^2\text{H}) - M(e) \\ &= 2.014102\text{u} - 0.000549\text{u} \\ &= 2.013553\text{u} \end{aligned}$$

به این ترتیب انرژی بستگی هسته دوتریم برابر است با

$$\begin{aligned} B &= [m_n + m_p - m({}^2\text{H})]c^2 \\ &= [1.008665\text{u} + 1.007276\text{u} - 2.013553\text{u}] \times 931.5 = 2.22\text{ MeV} \end{aligned}$$

تمرین ۱-۸

انرژی بستگی ${}^4\text{He}$ را به دست آورید. جرم اتمی ${}^4\text{He}$ برابر 4.002603u 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 اتم هاست. در فصل قبل دیدیم که اختلاف انرژی ترازهای الکترون‌ها در اتم حدود چند الکترون‌ولت است. در حالی که اختلاف انرژی ترازهای نوکلئون‌ها در هسته‌های سبک حدود میلیون الکترون‌ولت (MeV) و در هسته‌های سنگین حدود کیلو الکترون‌ولت (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

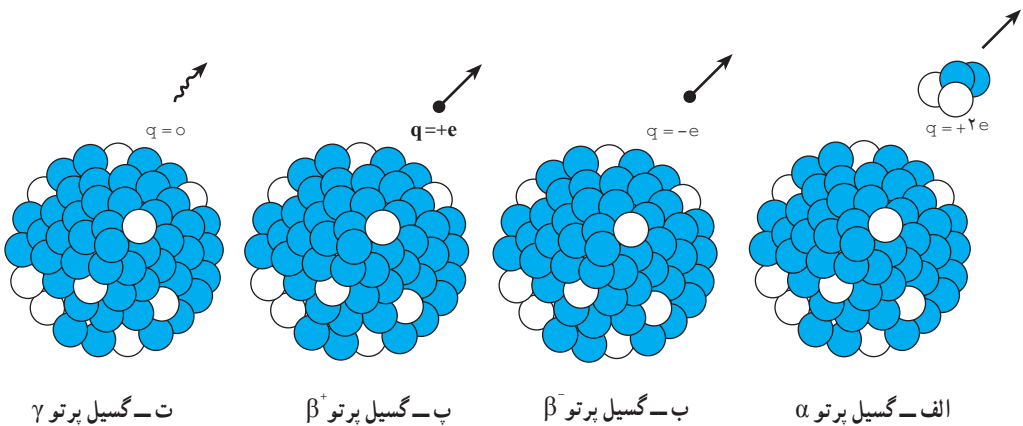
برگردند. انرژی فوتون گسیل شده نیز برابر اختلاف انرژی بین حالت برانگیخته و حالت پایه یا بین دو حالت برانگیخته است. هسته برانگیخته را با گذاشتن ستاره روی نماد ${}^A_Z X$ به صورت ${}^A_Z X^*$ مشخص می کنند.

همان گونه که دیدیم، انرژی واکنش شیمیایی در حدود چند الکترون ولت و انرژی لازم برای برانگیختگی هسته ها معمولاً در محدوده کیلو الکترون ولت تا میلیون الکترون ولت است؛ از این رو، هسته ها در واکنش های شیمیایی برانگیخته نمی شوند.

۸-۲- پرتوزایی

همان طور که قبلاً گفتیم، تحول هایی در فیزیک که به پیدایش فیزیک جدید و گسترش فیزیک هسته ای انجامید با کشف پدیده 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 می دارد. هسته های پرتوزا ناپایدارند و با گذشت زمان خود به خود و بدون تأثیر پذیری از شرایط خارجی، پرتوهایی را گسیل می دارند و به تدریج به هسته های پایدار تبدیل می شوند. همان گونه که در شکل ۸-۴ نشان داده شده است، هسته های پرتوزا با گسیل یکی از پرتوهای زیر واپاشیده می شوند.

۱- واپاشی آلفا: در این نوع واپاشی که در هسته های سنگین صورت می گیرد، هسته ${}^A_Z X$ با گسیل ذره α (${}^4_2\text{He}$) متشکل از دو پروتون و دو نوترون و می باشد (شکل ۸-۴ الف).



شکل ۸ - ۴

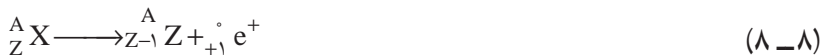
هسته X را «هسته مادر» و هسته Y را «هسته دختر» می نامند؛ هسته Y محصول واپاشی دارای عددجرمی $A - 4$ و عدد اتمی $Z - 2$ است. این واپاشی با آزاد شدن انرژی همراه است که این انرژی بین محصولات واپاشی تقسیم می شود و بخش عمده آن را ذره α به همراه می برد. ذره های آلفا سنگین و دارای دو بار مثبت اند. بُرد این ذره ها بسیار کوتاه است و به سرعت جذب می شوند ولی اگر این ذره ها از راه تنفس یا دستگاه گوارش وارد بدن شوند، باعث آسیب شدید به بافت های بدن می شوند، بنابراین، باید مواظب بود که مواد آلفا گسیل هرگز وارد بدن نشوند.

۲- واپاشی بتا: این متداول ترین نوع واپاشی در هسته هاست. در این واپاشی هسته ناپایدار با گسیل الکترون یا پوزیترون (ذره ای دارای جرم برابر جرم الکترون و بار مخالف آن) به هسته جدیدی تبدیل می شود (شکل ۸-۴ ب).

این نوع واپاشی بسیار شگفت انگیز است؛ زیرا الکترون قبلاً در هسته وجود ندارد و در حین واپاشی به وجود می آید. در فرایند واپاشی همراه با گسیل الکترون یک نوترون در هسته تبدیل به پروتون و الکترون می شود. فرایند را می توان به صورت زیر نوشت*:



در فرایند گسیل پوزیترون یک پروتون به نوترون و پوزیترون تبدیل می شود (شکل ۸-۴ پ) که می توان آن را به صورت زیر نوشت:



محصول این نوع واپاشی هسته جدیدی است که عدد اتمی آن برخلاف مورد گسیل الکترون که عدد اتمی هسته دختر یک واحد بیشتر از هسته مادر است، یک واحد از هسته مادر کمتر است.

۳- واپاشی گاما: در این نوع واپاشی، هیچ یک از عددهای جرمی و اتمی هسته تغییر نمی کند بلکه هسته ای که در حالت برانگیخته است، با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می رسد (شکل ۸-۴ ت). این فرایند را می توان به صورت زیر نشان داد:



اغلب هسته ها پس از گسیل ذره های آلفا و بتا در حالت برانگیخته هستند و با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می رسند؛ بنابراین، گسیل پرتو گاما اغلب با گسیل آلفا و بتا همراه است. پرتو گاما همان

* در واپاشی بتا ذره دیگری (که نوترینو یا پادنوترینو نام دارد) نیز باید در نظر گرفت که برای سادگی از آنها صرف نظر شده است.

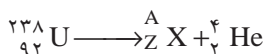
- ویژگی‌های پرتو X را دارد ولی از آن پر انرژی‌تر است و می‌تواند در ماده بیشتر نفوذ کند.
- در تمام فرایندهای واپاشی اصول پایستگی زیر برقرار است:
- ۱- مجموع بار الکتریکی در دو طرف رابطه‌های (۸-۷ تا ۸-۹) یکسان است.
 - ۲- مجموع عددهای جرمی در دو طرف رابطه‌های بالا یکسان است.

مثال ۳-۸

در واپاشی هسته اورانیم - ۲۳۸ $[{}_{92}^{238}\text{U}]$ یک ذره آلفا گسیل می‌شود. معادله این واپاشی را بنویسید و تعیین کنید که براثر این واپاشی چه عنصری تولید می‌شود.

پاسخ

معادله واپاشی به صورت زیر است:



با استفاده از پایستگی عدد جرمی داریم:

$$238 = A + 4$$

$$A = 234$$

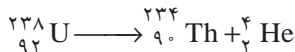
و با بهره‌گیری از عدد اتمی دو طرف داریم:

$$92 = 2 + Z$$

$$Z = 90$$

با مراجعه به جدول تناوبی معلوم می‌شود که عنصر با $Z = 90$ توریم است؛ پس

داریم:



تمرین ۲-۸

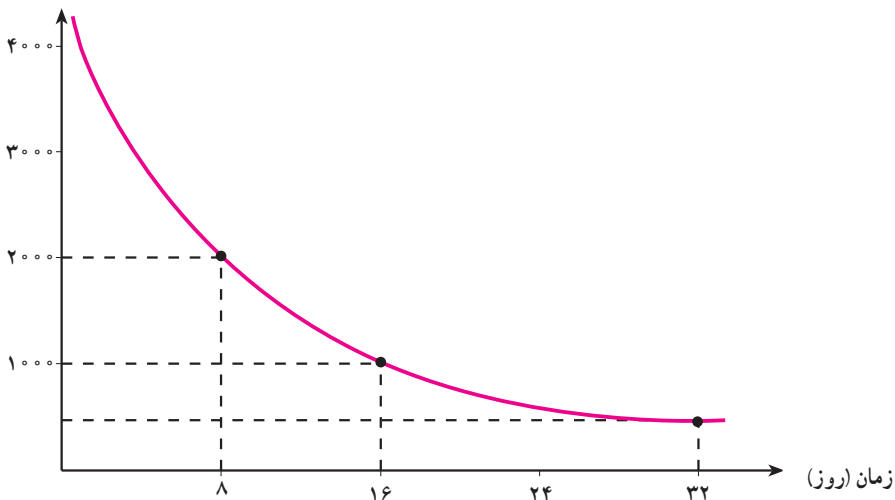
فسفر - ۳۲ $[{}_{15}^{32}\text{P}]$ با گسیل الکترون و امی باشد. معادله این واپاشی را بنویسید و تعیین کنید که در آن چه عنصری تولید می‌شود.

آلومینیم $^{25}_{13}\text{Al}$ با گسیل پوزیترون و امی باشد. معادله واپاشی را بنویسید و عنصر محصول آن را مشخص کنید.

نیمه عمر ماده 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 ۸-۵ 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 ($10^9 \times 4/5$ 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 زمینه پرتوزایی طبیعی را تشکیل می‌دهند که ما را احاطه کرده است.

تعداد هسته‌های ^{131}I



شکل ۸-۵ - نمودار واپاشی ایزوتوپ ^{131}I

در حادثه چرنوبیل یکی از ایزوتوپ‌هایی که مشکل آلودگی مواد غذایی را به وجود آورد ^{131}I بود. این ایزوتوپ، فزار است و همراه با جریان‌های جوی تا نقطه‌های دور دست 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 $8/0$ روز است؛ پس از گذشت 40 روز از حادثه، چه کسری از هسته‌های ^{131}I باقی مانده بود؟

پاسخ

40 روز برابر 5 نیمه عمر ^{131}I است. اگر N_0 تعداد هسته‌های اولیه باشد، می‌توان جدول زیر را تنظیم کرد.

۵	۴	۳	۲	۱	۰	تعداد نیمه‌عمرهای سپری شده
$\frac{1}{216} N_0 = \frac{N_0}{32}$	$\frac{1}{28} N_0 = \frac{N_0}{16}$	$\frac{1}{24} N_0 = \frac{N_0}{8}$	$\frac{1}{22} N_0 = \frac{N_0}{4}$	$\frac{N_0}{2}$	N_0	هسته‌های باقیمانده

بنابراین، پس از گذشت 40 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 رابطه $\frac{N_0}{2^n}$ به دست آوریم که در آن n از رابطه $n = \frac{t}{T_{1/2}}$ به دست می‌آید. t زمان مورد نظر برای واپاشی و $T_{1/2}$ نیمه عمر ایزوتوپ است.

نکته های ایمنی

حفاظت در برابر پرتوها: یکی از ویژگی های مهم ذرات و پرتوهایی که از مواد پرتوزا گسیل می شود این است که حواس معمولی ما به آنها حساس نیستند؛ مثلاً، وقتی دستمان را به آتش نزدیک می کنیم سوزش ناشی از آن باعث می شود که آن را عقب بکشیم ولی این موضوع در مورد پرتوهای کیهانی و آنچه از مواد پرتوزا خارج می شود، صادق نیست؛ بنابراین باید به کمک دستگاه هایی آنها را آشکار ساخت و به وجود آنها پی برد.

ذره های دارای بار الکتریکی مانند ذره های آلفا و بتا هنگام عبور از ماده به واسطه بار الکتریکی خود باعث برانگیختگی و یونش اتم های محیط می شوند و می توان از این موضوع برای آشکار سازی آنها استفاده کرد. البته، این برانگیختگی و یونش تغییرهای شیمیایی را در بدن به وجود می آورد که باعث آسیب رساندن به بافت های زنده می شود. البته هر چه این ذره ها انرژی خود را در مسافت کوتاه تری از بافت از دست بدهند، آسیب وارده شدید تر و ترمیم آن دشوار تر خواهد بود؛ بدین سبب، آسیب ذره های آلفا بسیار شدید تر از ذره های بتا خواهد بود.

پرتوهای بدون باری چون پرتوهای X و γ نیز بر اثر برهم کنش با ماده، ذره های باردار ثانویه به وجود می آورند و این ذره های ثانویه به بافت های زنده آسیب می رسانند. از این ویژگی پرتوها برای از بین بردن غده های سرطانی بهره می گیرند؛ بدین ترتیب که با تمرکز این پرتوها بر روی غده ها آنها را نابود می سازند. این کار را «پرتودرمانی» می نامند. نوترون ها نیز گرچه بدون بارند ولی در هنگام ورود به بدن بر اثر برخورد با هیدروژن های آب - که بخش اعظم بدن را تشکیل می دهد - انرژی خود را به آن منتقل می کنند و باعث به حرکت در آمدن یک پروتون پراانرژی در بدن می شوند که اثر زیان بار آن بسیار شدید است؛ بنابراین، نوترون ها مخصوصاً وقتی سریع باشند، بسیار خطرناک اند. 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 ژن های آن شود. **یاخته هایی که از این یاخته های جهش یافته به وجود می آیند، با آن تفاوت خواهند داشت.** این جهش ها می تواند به تولید بافت های سرطانی یا نوزادان ناقص الخلقه بینجامد. البته در مواردی نیز از این جهش ها برای تولید گیاهانی استفاده می شود که از گیاهان معمولی مقاوم ترند یا ویژگی بهتری دارند.

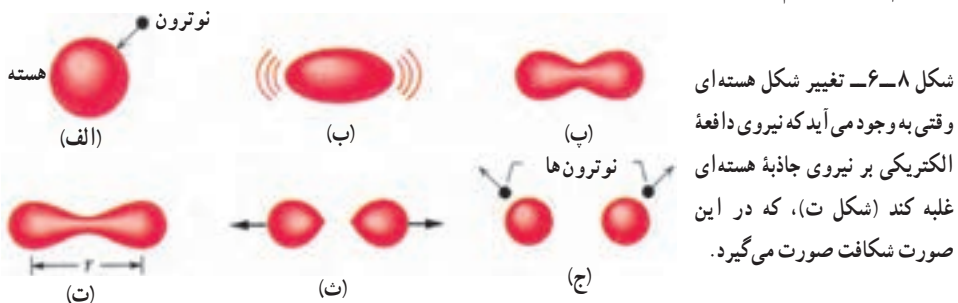
به این ترتیب، در برخورد با مواد پرتوزا بایستی همواره احتیاط کرد تا پرتوگیری از این مواد به کمترین مقدار ممکن برسد. چشمه های پرتوزا باید حفاظ داشته باشند و در هنگام کار باید آنها را به کمک وسیله هایی در فاصله دور از بدن نگه داشت.

فضانوردان در معرض انواع گوناگونی از تابش‌ها، از جمله تابش‌های کیهانی و پادهای خورشیدی قرار دارند. تحقیق کنید فضانوردان چگونه خود را در برابر بخشی از این تابش‌ها مصون می‌دارند؟

۸-۳- 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 باریوم شدند که جرمش در حدود نصف اورانیم بود. این دو تمایلی به باور نتیجه 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، هسته 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 جاذبه هسته‌ای بر دافعه کولنی غلبه می‌کنند. در هسته اورانیم غلبه 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 هسته اورانیم اندکی کشیده شود (شکل ۸-۶)، نیروهای الکتریکی می‌توانند آن را کشیده‌تر کنند. اگر این کشیدگی از مرحله بحرانی بگذرد، نیروهای هسته‌ای تسلیم نیروهای الکتریکی می‌شوند و هسته به دو بخش تقسیم می‌شود. جذب نوترون در هسته اورانیم انرژی لازم جهت این کشیده شدن را تأمین می‌کند و هسته شکافته می‌شود.



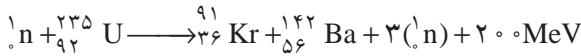
۱- Otto Hahn

۲- Fritz Strassman

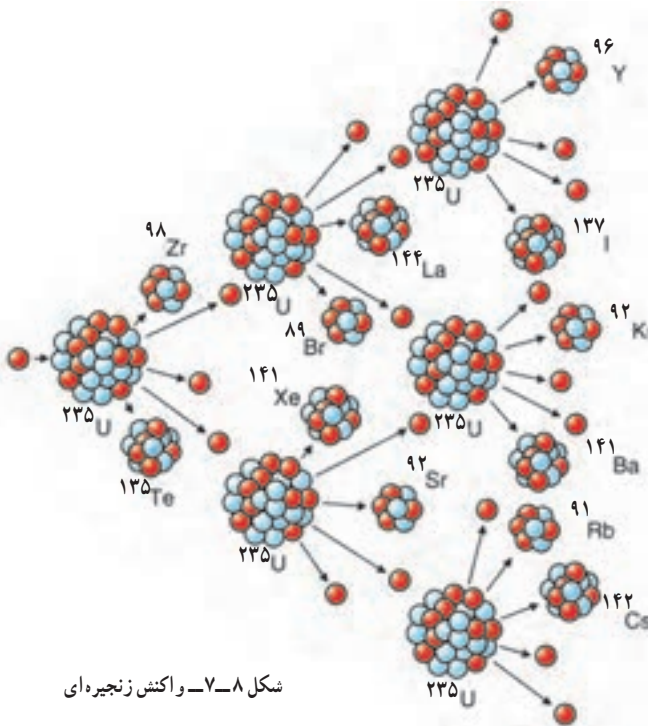
۳- Lise Meitner

۴- Otto Frisch

در فرایند شکافت، ترکیب‌های مختلفی از هسته‌های کوچک‌تر به وجود می‌آیند که یک نمونه آن را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت :



توجه کنید که در این واکنش، یک نوترون، شکافت اورانیم را آغاز می‌کند و بر اثر شکافت، سه نوترون به وجود می‌آید. چون نوترون‌ها بار الکتریکی 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 هسته 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 (شکل ۸-۷). در هر واکنش شکافت $200/000/000$ الکترون‌ولت انرژی (200MeV) انرژی آزاد می‌شود (برای مقایسه، در هر انفجار مولکول TNT فقط 30 الکترون‌ولت 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 رابطه $E = mc^2$ اینشتین به انرژی تبدیل می‌شود. بد نیست بدانید که بیشترین انرژی به صورت انرژی جنبشی محصولات شکافت در می‌آید که همراه نوترون‌ها از محل واکنش خارج می‌شوند. بخش اندکی از این انرژی نیز به صورت پرتوهای مختلف در می‌آید. شاید این پرسش مطرح شود که چرا واکنش زنجیره‌ای هم‌اکنون به‌طور طبیعی در معدن‌های اورانیم رخ نمی‌دهد؟



شکل ۸-۷- واکنش زنجیره‌ای

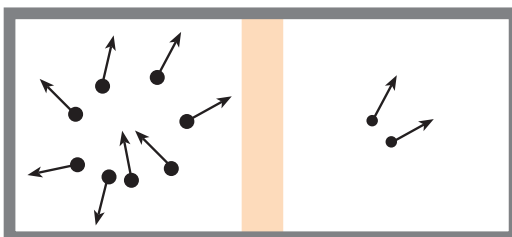
پاسخ آن است که شکافت معمولاً فقط در ایزوتوپ کمیاب ^{235}U که فقط ۰/۷۲ درصد اورانیم طبیعی را تشکیل می‌دهد، رخ می‌دهد. ایزوتوپ فراوان تر ^{238}U نوترون‌ها را جذب می‌کند ولی معمولاً شکافته نمی‌شود و در نتیجه، واکنش زنجیره‌ای را ناممکن می‌سازد.

اگر واکنش زنجیره‌ای در قطعه‌ای از اورانیم به اندازه 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 هسته اورانیم باید مسافتی را طی کنند. اگر اندازه قطعه اورانیمی که در آن شکافت صورت می‌گیرد کوچک باشد، نوترون‌ها پیش از برخورد با هسته 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.

غنی سازی 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 «غنی سازی» می‌نامند. جداساختن ایزوتوپ کمیاب ^{235}U از ایزوتوپ فراوان بسیار دشوار است؛ زیرا هر دو ایزوتوپ به لحاظ شیمیایی یکسان اند 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 فلورئور به صورت گاز هگزا فلورید اورانیم (UF_6) در می‌آید. چون ایزوتوپ سبک تر ^{235}U در دمای مساوی، سرعت متوسط آن کمی بیش از ایزوتوپ ^{238}U است و با آهنگ بیشتری از غشایی نازک می‌گذرد. بخش از هزاران مرحله، سرانجام باعث تولید نمونه اورانیم با غنای مناسب می‌شود. این مقدار برای نیروگاه‌های تولید برق در حدود ۳ درصد است.



شکل ۸-۸ — 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 سانتیفوژ گازی راحت تر صورت می گیرد. گاز هگزافلورید اورانیم در یک استوانه با سرعت های فوق العاده زیاد از مرتبه 1500 کیلومتر در ساعت چرخانده می شود. مولکول های گاز حاوی ^{238}U سنگین، مانند شیر در جدا کننده های لبنیات، به خارج رانده می شوند و مولکول های گاز حاوی ^{235}U سبک تر، از مرکز استخراج می شوند. مشکلات مهندسی این روش در سال های اخیر برطرف شده است.

راکتورهای شکافت هسته ای: دیدیم که واکنش شکافت زنجیره ای معمولاً در اورانیم طبیعی خالص صورت نمی گیرد، زیرا بخش اعظم آن ^{238}U است، و نوترون های آزاد شده در شکافت ^{235}U که نوترون های سریع هستند را اتم های ^{238}U جذب می کنند بدون اینکه باعث شکافت شوند. این واقعیت تجربی مهم که نوترون های کُند را ^{235}U با احتمال بیشتر از ^{238}U جذب می کند اهمیت بسیار دارد. اگر نوترون ها را بتوان کُند ساخت، احتمال جذب نوترون ناشی از شکافت در یک اتم ^{235}U دیگر، حتی در حضور ^{238}U ، افزایش می یابد. این افزایش احتمال می تواند برای به وجود آوردن واکنش زنجیره ای کافی باشد.

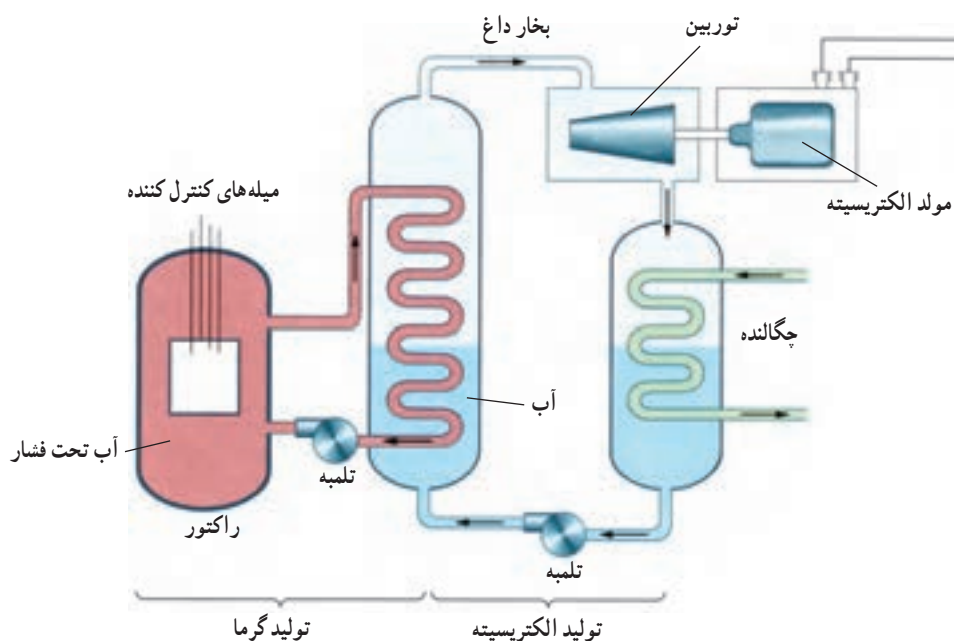
در کمتر از یک سال پس از کشف شکافت هسته ای، دانشمندان متوجه شدند که اگر اورانیم به قطعه های کوچک تر تقسیم شود و در بین این قطعه ها ماده ای قرار گیرد که نوترون های حاصل از شکافت* را کند و احتمال جذب آنها در اورانیم را زیاد سازد، می توان با استفاده از اورانیم طبیعی واکنش زنجیره ای به وجود آورد.

این روش را اولین بار انریکو فرمی در سال ۱۹۴۲ میلادی (۱۳۲۱ ه.ش) در دانشگاه شیکاگو انجام داد. در اولین واکنش زنجیره ای کنترل شده، از گرافیت برای کُند کردن نوترون ها استفاده شده بود. دلیل استفاده از گرافیت این بود که نوترون در برخورد با آن، بخش قابل ملاحظه ای از انرژی خود را از دست می داد. اگر نوترون از هسته ای سنگین پس زده شود، سرعت و انرژی آن تغییر چندانی نخواهد کرد اما در برگشت از هسته سبک کربن، سرعتش به طور قابل ملاحظه ای کم می شود. می گویند گرافیت «کُند کننده» نوترون است. کل این دستگاه را «راکتور» می نامند.

راکتورهای هسته ای کنونی علاوه بر سوخت هسته ای دارای کُند کننده، میله های کنترل، و شاره ای (معمولاً آب) برای خارج ساختن گرما از راکتورند. سوخت هسته ای در درجه اول ^{238}U به علاوه ۳ درصد ^{235}U است. چون ^{235}U با ^{238}U بسیار رقیق شده است، امکان انفجار هسته ای مانند بمب در آن وجود ندارد. با وارد کردن میله های کنترل به داخل راکتور، آهنگ واکنش یعنی تعداد نوترون های موجود برای به وجود آوردن شکافت، تنظیم می شود. میله های کنترل معمولاً از مواد

* انرژی جنبشی متوسط این نوترون ها 2MeV 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 این رو، از دو دستگاه آب، به طور جداگانه، استفاده می‌شود تا مواد پرتوزا وارد توربین نشوند.



شکل ۸-۹- نمودار یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

استفاده از شکافت در تولید انرژی: انرژی حاصل از شکافت هسته‌ای با انفجار بمب‌های هیروشیما و ناگازاکی به جهانیان معرفی شد. این تصویر هولناک هنوز از تفکری که در مورد انرژی هسته‌ای وجود دارد، رخت برنسته است. فاجعه انفجار چرنوبیل در سال ۱۹۸۶ میلادی (۱۳۶۵ ه.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 زغال سنگ انرژی تولید می‌کند.



شکل ۸-۱۰- نمونه‌ای از یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

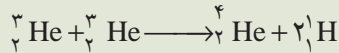
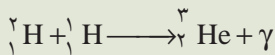
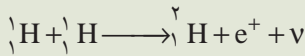
نقطه ضعف اصلی استفاده از شکافت هسته‌ای تولید پسماندهای پرتوزاست. همان طور که قبلاً گفتیم، برای پایدار ماندن هسته باید با زیاد شدن عدد اتمی، نسبت نوترون به پروتون افزایش یابد. این نسبت برای هسته‌های سبک برابر ۱، در هسته‌های متوسط $1/2$ و در هسته سنگینی چون سرب $1/5$ است. وقتی هسته سنگینی چون اورانیم دو 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 به وجود آوردن مسئله گرم شدن گلخانه‌ای تهدیدی عظیم برای محیط زیست انسان است.

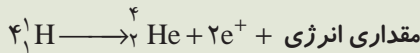
همجوشی هسته‌ای

در واکنش شکافت هسته‌ای، دیدیم که هسته سنگین با جذب یک نوترون به دو هسته 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 هسته سبک با یکدیگر ترکیب می‌شوند و هسته سنگین‌تری تولید می‌کنند. در این واکنش نیز جرم هسته تولید شده کمتر از جرم هسته‌های اولیه است و در نتیجه مقداری انرژی آزاد می‌شود.



کل فرایند را می‌توان به صورت زیر نوشت:



در این واکنش چهار هسته اتم هیدروژن (یعنی چهار پروتون) با هم ترکیب می‌شوند و یک هسته هلیوم ۴ (یعنی یک ذره آلفا) به اضافه یک پوزیترون (e^+) تولید می‌کنند و مقداری انرژی نیز آزاد می‌نمایند. پوزیترون پاد ذره 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 (به هم 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 اندازه کافی به هم نزدیک کنیم باید آنها را با انرژی حدود 0.1 MeV 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

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 10^7 × ۲ است، در نتیجه واکنش همجوشی هسته‌ای در خورشید و ستارگان به طور عادی صورت می‌گیرد.

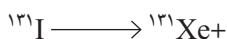
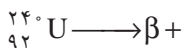
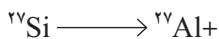
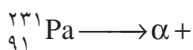
بخش عمده انرژی خورشیدی از طریق واکنش همجوشی تأمین می‌شود. این انرژی به اندازه‌ای است که هم خورشید را داغ نگه می‌دارد و هم انرژی لازم را برای منظومه خورشیدی و از آن جمله سیاره زمین فراهم می‌کند.

تمرین‌های فصل هشتم

- ۱- استرانسیوم $^{90}_{38}\text{Sr}$ در اثر انفجارهای هسته‌ای تولید می‌شود و نیم عمر 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 هسته $^{90}_{38}\text{Sr}$ چقدر است؟
- ۲- آیا ایزوتوپ $^{61}_{25}\text{X}$ را می‌توان با روش شیمیایی از ایزوتوپ $^{59}_{25}\text{Y}$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ $^{61}_{26}\text{Z}$ چگونه؟
- ۳- هنگامی که از ایزوتوبی یک ذره آلفا گسیل می‌شود، چه تغییری در هسته رخ می‌دهد؟ هنگام گسیل یک ذره بتا چگونه؟ هنگام گسیل پرتو گاما چگونه؟
- ۴- گاهی گفته می‌شود که «جرم را نمی‌توان تولید و نابود کرد» این گفته را تحلیل کنید.
- ۵- گاهی گفته می‌شود که تمام منابع انرژی از انرژی هسته‌ای حاصل شده‌اند. آیا سوخت‌هایی مانند زغال سنگ و نفت هم از انرژی هسته‌ای به دست آمده‌اند؟ توضیح دهید.
- ۶- هر یک از اتم‌های زیر چند الکترون، چند پروتون و چند نوترون دارند؟

الف) برلیوم ۹	ب) کلسیم ۴۰	پ) نقره ۱۰۷
ت) طلا ۱۹۷	ث) سرب ۲۰۸	ج) اورانیوم ۲۳۸

۷- واکنش‌های زیر را کامل کنید برای تعیین نماد ایزوتوپ‌ها از جدول تناوبی استفاده کنید.



۸- نیم عمر بیسموت ۲۱۲ در حدود ۶۰ دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری

از ماده اولیه باقی مانده است؟

۹- آلومینیوم تنها یک ایزوتوپ پایدار ${}_{13}^{27}\text{Al}$ به جرم اتمی $26/981541\text{u}$ دارد. جرم اتمی

ایزوتوپ ناپایدار ${}_{13}^{26}\text{Al}$ آن برابر $25/986982\text{u}$ است. انرژی بستگی هر یک از دو ایزوتوپ را بر حسب MeV حساب کنید.

۱۰- انرژی بستگی کل، B، و انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون B/A، را برای ${}_{26}^{56}\text{Fe}$ و ${}_{92}^{238}\text{U}$

حساب کنید. (جرم ${}_{26}^{56}\text{Fe}$ برابر $9/29 \times 10^{-26}\text{kg}$ و جرم ${}_{92}^{238}\text{U}$ برابر $3/95 \times 10^{-25}\text{kg}$ است.)

۱۱- در جریان یک حفاری باستان‌شناسی یک اجاق مخصوص پخت و پز کشف می‌شود. کربن

موجود در زغال اجاق، $1/56$ درصد (معادل $\frac{1}{4}$) مقدار عادی کربن ۱۴ است. سن تقریبی زغال چه

مقدار است؟ (نیمه عمر کربن ۱۴ برابر 5730 سال است).

H
هیدروژن
۱



He
هلیوم
۲

Li
لیتیم
۳

B
بور
۵

C
کربن
۶

N
نیتروژن
۷

O
اکسیژن
۸

F
فلورین
۹

Ne
نئون
۱۰

Na
سدیم
۱۱

Al
آلمینیوم
۱۳

Si
سیلیسیم
۱۴

P
فسفر
۱۵

S
گوگرد
۱۶

Cl
کلر
۱۷

Ar
آرگن
۱۸

K
پتاسیم
۱۹

Ga
گالیم
۳۱

Ge
ژرمانیم
۳۲

As
آرسنیک
۳۳

Se
سلنیم
۳۴

Br
برم
۳۵

Kr
کریپتون
۳۶

Rb
روبیوم
۳۷

In
اندیم
۴۹

Sn
فلج
۵۰

Sb
آنتیمون
۵۱

Te
تلوریم
۵۲

I
ید
۵۳

Xe
زنون
۵۴

Cs
سزیم
۵۵

Tl
تالیوم
۸۱

Pb
سرب
۸۲

Bi
بیسموت
۸۳

Po
پولونیم
۸۴

At
استاتین
۸۵

Rn
رادون
۸۶

Fr
فرانسیم
۸۷

Pb
سرب
۸۲

Bi
بیسموت
۸۳

Po
پولونیم
۸۴

At
استاتین
۸۵

Rn
رادون
۸۶

Ca
کلسیم
۲۰

Sc
اسکاندیم
۲۱

Ti
تیتانیوم
۲۲

V
وانادیوم
۲۳

Cr
کروم
۲۴

Mn
منگنز
۲۵

Fe
آهن
۲۶

Co
کوبالت
۲۷

Ni
نیکل
۲۸

Cu
مس
۲۹

Zn
روی
۳۰

Ga
گالیم
۳۱

Ge
ژرمانیم
۳۲

As
آرسنیک
۳۳

Se
سلنیم
۳۴

Br
برم
۳۵

Kr
کریپتون
۳۶

Sr
استرانسیم
۳۸

Y
ایترویم
۳۹

Zr
زیرکونیم
۴۰

Nb
نیوبیم
۴۱

Mo
مولیبدن
۴۲

Tc
تکنسیم
۴۳

Ru
روتنیم
۴۴

Rh
رودیم
۴۵

Pd
پالادیم
۴۶

Ag
نقره
۴۷

Cd
کادمیم
۴۸

In
اندیم
۴۹

Sn
فلج
۵۰

Sb
آنتیمون
۵۱

Te
تلوریم
۵۲

I
ید
۵۳

Xe
زنون
۵۴

Ba
باریم
۵۶

La
لانتان
۵۷

Hf
هافنیم
۷۲

Ta
تانتال
۷۳

W
تنگستن
۷۴

Re
رنتیم
۷۵

Os
اوسمیم
۷۶

Ir
ایریدیم
۷۷

Pt
پلاتین
۷۸

Au
طلا
۷۹

Hg
جیوه
۸۰

Tl
تالیوم
۸۱

Pb
سرب
۸۲

Bi
بیسموت
۸۳

Po
پولونیم
۸۴

At
استاتین
۸۵

Rn
رادون
۸۶

Ra
رادیم
۸۸

Ac
اکتیویم
۸۹

Rf
رادرفوردیم
۱۰۴

Db
دایتیم
۱۰۵

Sg
سیبورگیم
۱۰۶

Bh
بورهم
۱۰۷

Hs
هاسیم
۱۰۸

Mt
ماتیویم
۱۰۹

Pt
پلاتین
۷۸

Au
طلا
۷۹

Hg
جیوه
۸۰

Tl
تالیوم
۸۱

Pb
سرب
۸۲

Bi
بیسموت
۸۳

Po
پولونیم
۸۴

At
استاتین
۸۵

Rn
رادون
۸۶

Ce
سزیم
۵۸

Pr
پرازئودیوم
۵۹

Nd
نئودیوم
۶۰

Pm
پرومتیم
۶۱

Sm
سماریوم
۶۲

Eu
یوربوم
۶۳

Gd
گادولینیم
۶۴

Tb
ترتیم
۶۵

Dy
دیسمیورم
۶۶

Ho
هولم
۶۷

Er
اریتم
۶۸

Tm
تولیم
۶۹

Yb
ایتربیم
۷۰

Lu
لوئیسیم
۷۱

Th
توریم
۹۰

Pa
پروکتینیوم
۹۱

U
اورانیوم
۹۲

Np
نپتونیوم
۹۳

Pu
پلوتونیوم
۹۴

Am
امرسیوم
۹۵

Cm
کوریوم
۹۶

Bk
برکلیم
۹۷

Cf
کالیفرنیم
۹۸

Es
اِنسِتیویم
۹۹

Fm
فرمیوم
۱۰۰

Md
مِندلیویم
۱۰۱

No
نوبلیوم
۱۰۲

Lr
لورنسیم
۱۰۳

فلز

شبه فلز

نافلز

جدول تناوبی عناصرها

واژه‌نامه فارسی - انگلیسی

Kinetic energy	انرژی جنبشی
Ionization energy	انرژی یونس
Isotope	ایزوتوپ

ب

Charge	بار
Resultant	برآیند
Vector	بردار
Position vector	بردار مکان
Unit vector	بردارهای یکه
Interaction	برهم کشش
Frequency	بسامد (فرکانس)
Angular frequency	بسامد زاویه‌ای
Cut - off frequency	بسامد قطع
Excited	برانگیخته
Dimension	بعد
Loud speaker	بلندگو
Loudness	بلندی (صوت)
Ellipse	بیضی

پ

Stable	پایدار (مانا)
Atom stability	پایداری اتم
Energy conservation	پایستگی انرژی
	پایستگی انرژی مکانیکی
Conservation of mechanical energy	

آ - ا

Threshold of pain	آستانه دردناکی
Threshold of hearing	آستانه شنوایی
Disturbance	آشفتگی
Doping	آلایش
Pendulum	آونگ
Simple pendulum	آونگ ساده
Detection	آشکارسازی
Superconductor	ابر رسانا
Doppler effect	اثر دوپلر
Photoelectric effect	اثر فوتوالکتریک
Maximum height	ارتفاع اوج
Bohr's model	الگوی بور
Thomson's model	الگوی تامسون
Rutherford's model	الگوی رادرفورد
Eelctromagnetic waves	امواج الکترومغناطیس
Propagation	انتشار
Free end	انتهای آزاد
Fixed end	انتهای بسته
Magnitude	اندازه
Binding energy	انرژی بستگی
Potential energy	انرژی پتانسیل
Elastic potential energy	انرژی پتانسیل کشسانی
Gravitational potential	انرژی پتانسیل گرانشی

Nuclear fusion (جوش هسته‌ای) (همجوشی هسته‌ای)

Direction جهت

چ

Source چشمه، منبع

ح

Volume حجم

حرکت با شتاب ثابت

Motion with constant acceleration

Projectile حرکت پرتابی

Accelerating motion حرکت تند شونده

Circular motion حرکت دایره‌ای

حرکت دایره‌ای یکنواخت

Uniform circular motion

Rectilinear motion حرکت روی خط راست

Motion of plane حرکت روی یک صفحه

Decelerating motion حرکت کند شونده

Simple harmonic motion حرکت نوسانی ساده

Uniform motion حرکت یکنواخت

Cavity حفره (کاواک)

د

Amplitude دامنه

Wave trough دره موج

Period دوره

Tuning fork دیاپازون

Dynamics دینامیک

Diode دیود

Gamma ray پرتو گاما

ت

Black body radiation تابش جسم سیاه

Thermal radiation تابش گرمایی

Periodic function تابع دوره‌ای

Sinusoidal function تابع سینوسی

Wave function تابع موج

Radiance تابندگی

Mass – energy conversion تبدیل جرم - انرژی

Pulse تپ

Resolution of a vector تجزیه یک بردار

Interference تداخل

Constructive interference تداخل سازنده

Destructive interference تداخل ویرانگر

Energy level تراز انرژی

Intensity level تراز شدت (صوت)

Resonance تشدید

Monochromatic تکفام

Subtraction of vectors تفریق بردارها

ث

Planck's constant ثابت پلانک

Rydberg constant ثابت ریذبرگ

Constant of spring ثابت فنر

ج

Displacement جابه‌جایی (تغییر مکان)

Wave front جبهه موج

Addition of vectors جمع بردارها

Nuclear fission شکافت هسته

Antinode شکم (موج)

Slope شیب خط

ص

Sound صوت

ض

ضرب اصطکاک حالت سکون

Static coefficient of friction

ضرب اصطکاک لغزشی

Kinematic coefficient of friction

Absorption coefficient ضریب جذب

ط

Wave length طول موج

Spectrum طیف

Atomic spectrum طیف اتمی

Emission spectrum طیف نشری (گسیلی)

Absorption spectrum طیف جذبی

Spectroscope طیف نما

Spectroscopy طیف نمایی

ع

Wave number عدد موج

غ

Sonic boom غرش صوتی

Enrichment غنی سازی

ف

Ultraviolet فرابنفش

Ultrasound فراصوت

ذ

Beta particle ذره بتا

ر

Radioactive رادیواکتیو

Radioactivity رادیواکتیویته

Conductor رسانا

Series of lines رشته خطوط

س

Structure ساختار

Velocity سرعت

Speed of propagation سرعت انتشار

Initial velocity سرعت اولیه

Angular velocity سرعت زاویه ای

Instantaneous velocity سرعت لحظه ای

Average velocity سرعت متوسط

Inclined plane سطح شیب دار

Free falling سقوط آزاد

Sense سو

Planets سیارات

ش

Acceleration شتاب

Radial acceleration شتاب شعاعی

Gravity acceleration شتاب گرانش

Instantaneous acceleration شتاب لحظه ای

Average acceleration شتاب متوسط

Intensity شدت (صوت)

Wave Intensity شدت موج

Bohr's model	مدل بوهر	Disintegration	فروپاشی
Path	مسیر	Infrared	فروسرخ
Maxwell equations	معادله‌های ماکسول	Subsonic	فروصوت
Wave	موج	Spring	فنر
Standing wave	موج ایستاده	Atomic physics	فیزیک اتمی
Plane wave	موج تخت	Nuclear physics	فیزیک هسته‌ای
Sinusoidal wave	موج سینوسی		
Longitudinal wave	موج طولی	Wien's displacement law	قانون جابه جایی وین
Sound wave	موج صوتی	Wave train	قطار موج
Transverse wave	موج عرضی	Reactor core	قلب راکتور
Spherical wave	موج کروی	Wave's crest	قله موج
Mechanical wave	موج مکانیکی	Kepler's laws	قوانین کپلر
Components of a vector	مؤلفه‌های یک بردار	Newton's laws	قوانین نیوتون

ن

Discrete	نایبوسته
Observer	ناظر
Relativity	نسبیت
Heliocentric theory	نظریه خورشید مرکزی
Geocentric theory	نظریه زمین مرکزی
Dark fringe	نوار تاریک
Light fringe	نوار روشن
Interference	نوارهای تداخلی
Natural light	نور طبیعی
Visible light	نور مرئی
Oscillator	نوسانگر
Damped oscillation	نوسان میرا
Force	نیرو

ق

Wien's displacement law	قانون جابه جایی وین
Wave train	قطار موج
Reactor core	قلب راکتور
Wave's crest	قله موج
Kepler's laws	قوانین کپلر
Newton's laws	قوانین نیوتون

ک

Quantity	کمیت اصلی
Vectorial quantity	کمیت برداری
Discrete quantity	کمیت نایبوسته
Scalar quantity	کمیت نرده‌ای

گ

Transition	گذار
Emission	گسیل

ل

Lyman	لیمان
-------	-------

م

Satellite	ماهواره
Horizontal axis	محور افقی
Vertical axis	محور قائم

Equilibrium state	وضع تعادل	Dynamometer	نیروسنج
Stopping potential	ولتاژ متوقف کننده	Restoring force	نیروی بازگرداننده
ه			
Fusion	همجوشی	Gravitational force	نیروی گرانشی
Nucleus	هسته (اتم)	Centripetal force	نیروی مرکزگرا
Stable nucleus	هسته پایدار	Nuclear force	نیروی هسته ای
Unstable nucleus	هسته ناپایدار	Half life	نیمه عمر
Homogeneous	همگن	و	
ی			
Unit	یکا	Decay	واپاشی
		Reaction	واکنش
		Chain reaction	واکنش زنجیره ای

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, Saunders 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.

- ۱۳- پرسش‌ها و مسئله‌های تکمیلی فیزیک ۱ و ۲ پیش‌دانشگاهی، انتشارات فاطمی، ۱۳۸۷.
- ۱۴- دانشنامه جهان اسلام، بنیاد دایرة المعارف اسلامی، گروه نویسندگان.
- ۱۵- 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 ۱۳۹۴

کتاب فیزیک پیش‌دانشگاهی، رشته علوم تجربی

ردیف	عنوان	نشر	سال انتشار
۱	فیزیک برای علوم و مهندسی، جلد اول (مکانیک) ویرایش هفتم	مبتکران/ پیشروان	۹۰
۲	فیزیک و مباحث علمی روز	اندیشه‌سرا	۹۰
۳	مبانی فیزیک، مکانیک و گرما - جلد اول	نیاز دانش	ویرایش دهم ۹۳
۴	فیزیک دانشگاهی سبزر و زیمانسکی (جلد اول - مکانیک)	دانش‌نگار	۹۳

کتاب فیزیک پیش‌دانشگاهی، رشته علوم ریاضی

ردیف	عنوان	نشر	سال انتشار
بهدیدآورنده			
۱	فیزیک برای علوم و مهندسی، جلد اول (مکانیک) ویرایش هفتم	مبتکران/ پیشروان	۹۰
۲	فیزیک و مباحث علمی روز	اندیشه‌سرا	۹۰
۳	مبانی فیزیک، مکانیک و گرما - جلد اول	نیاز دانش	ویرایش دهم ۹۳
۴	فیزیک دانشگاهی سبزر و زیمانسکی (جلد اول - مکانیک)	دانش‌نگار	۹۳

خرید اینترنتی کتاب درسی

والدین گرامی و دانش آموز عزیز

در راستای توسعه دولت الکترونیک و با هدف اطلاع رسانی و سهولت دسترسی دانش آموزان به کتاب های درسی، در سال تحصیلی جدید در سراسر کشور، فروش و توزیع کتاب های درسی به صورت اینترنتی و از طریق سامانه فروش و توزیع مواد آموزشی به نشانی www.irtextbook.ir یا www.irtextbook.com انجام می شود.

نحوه خرید کتاب درسی :

۱- دانش آموزانی که به اینترنت دسترسی ندارند (سفارش گروهی) :

- مراجعه به مدرسه محل تحصیل
- پرداخت وجه کتاب به مدرسه محل تحصیل
- اعلام شماره تلفن همراه (فعال) اولیای دانش آموز برای دریافت پیام کوتاه از سامانه
- ثبت سفارش گروهی دانش آموزان در سامانه فروش و توزیع مواد آموزشی توسط مدرسه

۲- دانش آموزانی که به اینترنت دسترسی دارند (سفارش انفرادی) :

- ورود به سامانه فروش و توزیع مواد آموزشی
- کلیک روی دکمه «ورود به بخش سفارش دانش آموز»
- ثبت کد ملی دانش آموز به عنوان شناسه کاربری و شش رقم سمت راست سریال شناسنامه وی به عنوان رمز ورود
- ثبت و پرداخت اینترنتی سفارش براساس راهنمای سامانه

نکته :

- برای پرداخت اینترنتی نیاز به کارت بانکی، رمز دوم، کد اعتبارسنجی دوم روی کارت (CVV2) و تاریخ انقضای کارت بانکی می باشد.

- پیشنهاد می شود قبل از فرا رسیدن زمان خرید، یک بار 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 دانش آموز را به مدرسه محل تحصیل وی تحویل دهید، تا مدرسه، اطلاعات شناسنامه دانش آموز (سریال شناسنامه) را در سامانه ثبت نام دانش آموزان (سناد)، اصلاح نماید.

ارائه نظرات، پیشنهادات و انتقادات ارزشمند شما در هر بخش از فعالیت های سامانه فروش و توزیع مواد آموزشی به نشانی info@irtextbook.com و دورنگار ۰۹۲۶۶۰۸۸۳، ما را در شناسایی نقاط قوت و ضعف خدمات و محصولات یاری خواهد رساند.

معلمان محترم، صاحب نظران، دانش آموزان عزیز و اولیای آنان می توانند نظر اصلاحی خود را در باره مطالب

این کتاب از طریق نامه به نشانی تهران - صندوق پستی ۴۸۷۴/۱۵۸۷۵ - گروه درسی مربوط و یا پیام نگار (Email)

ارسال نمایند. talif@talif.sch.ir

دفترتالیف کتاب های درسی ابتدایی و متوسطه نظری