

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

فیزیک (۱) و (۲)

دورهٔ پیش‌دانشگاهی

رشتهٔ علوم تجربی

وزارت آموزش و پرورش سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

برنامه‌ریزی محتوا و نظارت بر تألیف: دفتر برنامه‌ریزی و تألیف کتاب‌های درسی

نام کتاب: فیزیک (۱) و (۲) - ۲۸۸/۱

شورای برنامه‌ریزی و مؤلفان: احمد احمدی، اعظم پورقاضی، روح‌الله خلیلی‌بروجنی، ابوالقاسم زال‌پور، سیدمهدی شیوایی، شیرین فراهانی، حسن عزیزی و غلامعلی محمودزاده

ویراستار: محمدکاظم بهنیا

آماده‌سازی و نظارت بر چاپ و توزیع: اداره کل چاپ و توزیع کتاب‌های درسی

تهران: خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)
تلفن: ۹-۸۸۸۳۱۱۶۱، دورنگار: ۰۹۲۶۶۰۸۸۳، کدپستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹

وبسایت: www.chap.sch.ir

رسام: فاطمه رئیسیان فیروزآباد

صفحه‌آرا: فائزه محسن شیرازی

طراح جلد: طاهره حسن‌زاده

ناشر: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران - تهران - کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش)

تلفن: ۵-۴۴۹۸۵۱۶۱، دورنگار: ۰۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۱۳۴۴۵/۶۸۴

چاپخانه: شرکت افست «سهامی عام»

سال انتشار و نوبت چاپ: چاپ دهم ۱۳۹۰

حق چاپ محفوظ است.



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

امام خمینی

فهرست

فیزیک ۱

۲-۳- معادله‌ی حرکت هماهنگ ساده	۶۱	فصل ۱: حرکت‌شناسی در دو بُعد	۲
۳-۳- معادله‌های سرعت و شتاب	۶۸	۱-۱- حرکت در یک بُعد	۳
۳-۴- انرژی مکانیکی نوسانگر (دستگاه جرم - فنر)	۷۰	۲-۱- حرکت در دو بُعد یا حرکت در صفحه	۱۶
۳-۵- نوسان وزنه - فنر در راستای قائم	۷۲	تمرین‌های فصل اول	۲۵
۳-۶- آونگ ساده	۷۳	فصل ۲: دینامیک	۲۷
۳-۷- تشدید	۷۶	۱-۲- قانون‌های نیوتون	۲۸
تمرین‌های فصل سوم	۷۹	۲-۲- چگونگی استفاده از قانون‌های نیوتون در حرکت یک جسم	۳۲
فصل ۴: موج‌های مکانیکی (۱)	۸۲	۲-۳- تکانه (اندازه حرکت)	۳۵
۴-۱- موج	۸۳	۲-۴- حرکت دایره‌ای	۴۰
۴-۲- موج‌های عرضی - موج‌های طولی	۹۲	۲-۵- حرکت دایره‌ای یکنواخت	۴۲
۴-۳- تابع موج	۹۳	۲-۶- دینامیک حرکت دایره‌ای یکنواخت	۴۸
تمرین‌های فصل چهارم	۱۰۱	تمرین‌های فصل دوم	۵۳
		فصل ۳: حرکت نوسانی	۵۶
		۱-۳- حرکت هماهنگ ساده	۵۷

فیزیک ۲

۱۵۷	تمرین‌های فصل دوم	۱۰۳	فصل ۱: موج‌های مکانیکی (۲)
			۱-۱- انتشار موج در دو و سه بُعد
۱۶۰	فصل ۳: آشنایی با فیزیک اتمی	۱۰۴	
۱۶۲	۳-۱- نظریه‌ی کوانتومی	۱۰۹	۱-۲- اصل برهم نهی موج‌ها
	۳-۲- فوتون و پدیده‌ی فوتوالکتریک		۱-۳- برهم نهی موج‌ها در دو بُعد - تداخل موج‌ها در سطح آب
۱۶۹		۱۱۸	
۱۷۷	۳-۳- طیف اتمی	۱۲۰	۱-۴- موج صوتی
۱۸۵	۳-۴- الگوهای اتمی	۱۲۳	۱-۵- سرعت صوت
۱۹۳	۳-۵- آشنایی با لیزر	۱۲۷	۱-۶- لوله‌های صوتی
۱۹۶	تمرین‌های فصل سوم	۱۳۴	۱-۷- شدت صوت
		۱۴۰	تمرین‌های فصل اول
۱۹۹	فصل ۴: آشنایی با ساختار هسته	۱۴۲	فصل ۲: موج‌های الکترومغناطیسی
۲۰۱	۴-۱- ساختار هسته‌ی اتم		۲-۱- چگونگی تشکیل موج‌های الکترومغناطیس
۲۱۰	۴-۲- پرتوزایی		۲-۲- سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی
۲۱۶	۴-۳- انرژی هسته‌ای		۲-۳- طیف موج‌های الکترومغناطیسی
۲۲۴	تمرین‌های فصل چهارم		۲-۴- تداخل موج‌های نوری
۲۲۷	واژه‌نامه‌ی فارسی - انگلیسی		
۲۳۴	فهرست منابع		

پیش‌گفتار

با توجه به تحولات بسیار سریع در عرصه‌های مختلف علم و فناوری، اهمیت آموزش‌های متوسطه و پیش‌دانشگاهی روز به روز در حال افزایش است؛ به گونه‌ای که در نشست‌های بین‌المللی از کشورهای جهان خواسته شده است تا این آموزش‌ها را به‌عنوان امری حیاتی در زندگی شهروندان خود به حساب آورند. در واقع، در این مرحله باید دانش‌آموزان بتوانند با توجه به علایق و نگرش‌های خود، درباره‌ی آینده تصمیم بگیرند و نیز، توانایی‌هایی را که لازمه‌ی یک زندگی موفق در بزرگسالی است به‌دست آورند.

با توجه به نکات بالا این کتاب براساس روش فعال تألیف شده است؛ یعنی، دانش‌آموز در تولید مفاهیم نقش دارد و نقش دبیران محترم، بیش‌تر طرح مسئله و سپس راهنمایی دانش‌آموزان برای رسیدن به حل مسئله است. در این کتاب هم‌چنین سعی شده سه هدف نگرشی، دانشی و مهارتی مورد توجه قرار گیرد، علاوه بر این که حجم مطالب و تعداد مفاهیم، با توجه به اختصاصی بودن درس فیزیک برای دانش‌آموزان رشته‌ی علوم تجربی انتخاب شده است. انتظار می‌رود همکاران گرامی، با تکیه بر تجربه‌ها و توانایی‌های خود، فعالیت‌هایی را که می‌تواند به یادگیری بهتر کمک کند، طراحی و دانش‌آموزان را به‌طور گروهی به انجام دادن آن‌ها ترغیب کنند و از آنان بخواهند نتایج فعالیت‌های خود را به کلاس ارائه دهند. نتیجه‌ی کارهای گروهی دانش‌آموزان می‌تواند به‌عنوان یکی از ملاک‌های ارزشیابی مورد توجه قرار گیرد. لازم به ذکر است که عناوین و مباحث این کتاب براساس سن دانش‌آموزان و زمان، تخصیص داده شده به این درس تدارک شده است؛ لذا از همکاران محترم استدعا داریم که از پیرایه‌های اضافی به این مباحث، بپرهیزند.

گروه فیزیک دفتر برنامه‌ریزی و تألیف کتب درسی از شورای دبیران این گروه خانم‌ها: احترام اسماعیلی، مهرناز طلوع شمس و آقایان: محمدعلی پزشپور، اسماعیل حیدری فرد، غلامرضا شمسایی زفرقندی، حسن قلمی باویل علیایی، شاهرخ لقایی و اسفندیار معتمدی که تمام متن کتاب را به دقت از نظر گذرانده و پیشنهادهای سازنده‌ای جهت بهبود آن ارائه کرده‌اند تشکر می‌نماید.

گروه فیزیک، هم‌چنین از دریافت نظرهای ارزشمند دبیران محترم، صاحب‌نظران و دانش‌آموزان، جهت رفع نارسایی‌ها و لغزش‌های احتمالی به گرمی استقبال می‌کند. لطفاً نظرهای اصلاحی خود را به نشانی تهران – صندوق پستی ۱۵۸۵۵/۳۶۳ گروه درسی فیزیک یا پیام‌نگار (ایمیل) physics-dept@talif.sch.ir، ارسال نمایید.

گروه فیزیک دفتر برنامه‌ریزی و تألیف کتب درسی

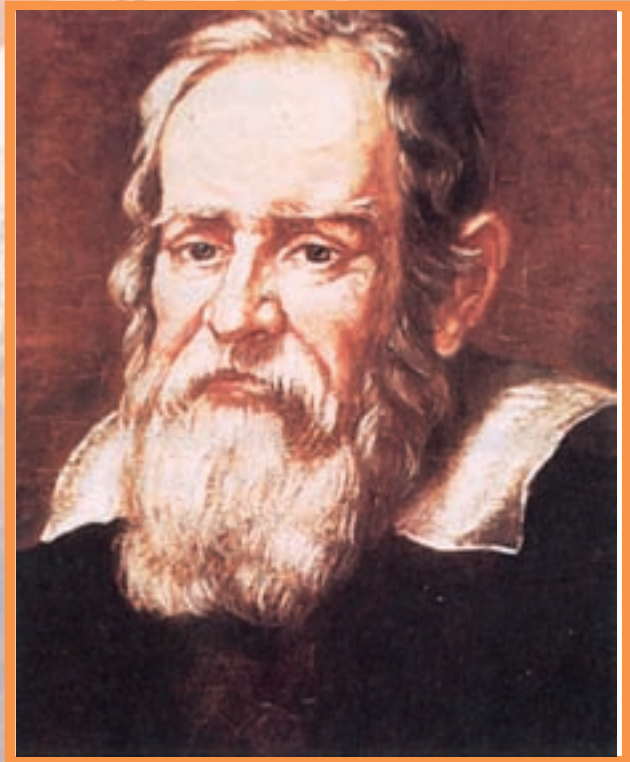
<http://physics-dept@talif.sch.ir>

این کتاب برای سال تحصیلی ۸۷ – ۱۳۸۶ توسط گروه فیزیک دفتر برنامه‌ریزی و تألیف کتب درسی و با همکاری شورای برنامه‌ریزی درسی این گروه مورد بازنگری قرار گرفت. از خانم دکتر منیژه رهبر که باز نویسی بخش هسته‌ای فصل ۴ کتاب فیزیک ۲ را به عهده داشتند صمیمانه تشکر می‌شود.

فیزیک ۱



حرکت شناسی در دو بعد



گالیلئو گالیله
(۱۶۴۲-۱۵۶۴ م)

حرکت شناسی در دو بعد

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

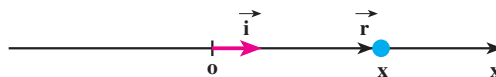
در فیزیک (۲) و آزمایشگاه تا اندازه‌ای حرکت شناسی در یک بُعد را مورد بررسی قرار دادیم، با کمیت‌های مکان، جابه‌جایی، سرعت متوسط و ... آشنا شدیم، و حرکت یکنواخت و حرکت با شتاب ثابت بر روی یک خط راست را نیز بررسی کردیم. ما در زندگی روزمره بیش‌تر با حرکت‌هایی که در دو بعد و سه بعد انجام می‌شوند، سروکار داریم 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 لحظه‌ی t کافی است که x را به صورت تابعی از زمان داشته باشیم:

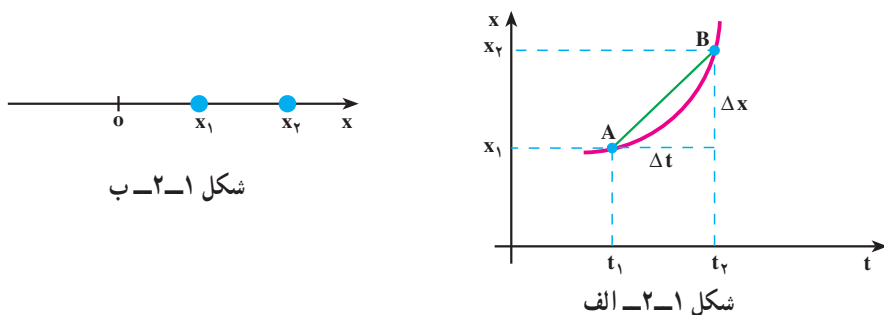
$$x = f(t) \quad (2-1)$$

این رابطه، معادله‌ی 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

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

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 لحظه‌ی t_1 در مکان x_1 (نقطه‌ی A) روی نمودار مکان-زمان و در لحظه‌ی t_2 در مکان x_2 (نقطه‌ی B) قرار دارد.



شکل ۲-۱ ب

شکل ۲-۱ الف

در این شکل، مقدار جابه‌جایی متحرک در بازه‌ی 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.

مثال ۱-۱

معادله‌ی حرکت جسمی در SI با رابطه‌ی $x = 2t^2 + 1$ 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.

پاسخ

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

الف:

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

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

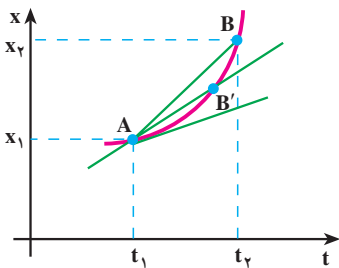
ب:

$$\bar{v}_x = \frac{3/0.402 - 3}{1/0.1 - 1} = 4/0.2 \text{ m/s}$$

پ:

$$\bar{v}_x = \frac{3/0.04002 - 3}{1/0.01 - 1} = 4/0.02 \text{ m/s}$$

ت:



شکل ۳-۱

سرعت لحظه‌ای: در فیزیک (۲) و آزمایشگاه دیدیم

که اگر بازه‌ی زمانی Δt کوچک و کوچک تر شود، نقطه‌ی B به نقطه‌ی A نزدیک و نزدیک تر می‌شود و سرانجام خط AB در نقطه‌ی A بر نمودار مماس می‌گردد (شکل ۳-۱). شیب خط مماس را در این حالت، سرعت لحظه‌ای جسم در لحظه‌ی t_1 می‌نامیم.

به عبارت دیگر، هنگامی که t_2 به t_1 نزدیک می‌شود،

یعنی وقتی Δt به سمت صفر میل می‌کند، نسبت $\bar{v}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ سرعت لحظه‌ای جسم را در لحظه‌ی t_1

به دست می‌دهد. پس، سرعت لحظه‌ای حد سرعت متوسط است هنگامی که Δt به سمت صفر میل می‌کند. سرعت لحظه‌ای را با v_x نمایش می‌دهیم؛ در نتیجه داریم:

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

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 رابطه‌ی ۵-۱ می‌توان v_x را به صورت تابعی از زمان به دست آورد، این تابع، معادله‌ی سرعت نامیده می‌شود. در حالت حدی وقتی که Δt به سمت صفر میل می‌کند، وتر AB در نقطه‌ی A بر نمودار مکان-زمان مماس می‌شود. این، همان تعبیر هندسی مشتق است که در درس ریاضی خوانده‌اید. از این به بعد، سرعت لحظه‌ای را برای اختصار سرعت می‌نامیم.

مثال ۲-۱

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

الف: معادله‌ی سرعت آن را به دست آورید.

ب: نمودار سرعت-زمان را برای آن رسم کنید.

پ: سرعت متحرک را در لحظه‌ی $t = 1s$ به دست آورید.

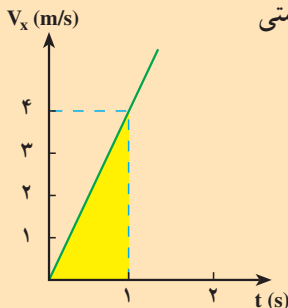
پاسخ

الف: با استفاده از رابطه‌ی ۵-۱ داریم:

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

ب: نمودار سرعت-زمان به صورت خط راستی

است که از مبدأ دستگاه $v-t$ می‌گذرد.



شکل ۴-۱

$$v_x = 4t$$

پ :

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

این نتیجه را می توانستیم از مثال ۱-۱ حدس بزنیم؛ زیرا در آن مثال، با نزدیک شدن t_2 به t_1 ، سرعت متوسط جسم نیز به مقدار $4m/s$ (سرعت جسم در لحظه $t = 1s$) نزدیک می شود.

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

$$\vec{v} = v_x \vec{i} \quad (۶-۱)$$

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

مثال ۳-۱

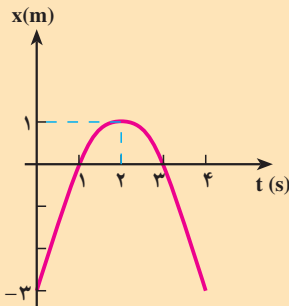
معادله ی حرکت جسمی در SI با رابطه ی $x = -t^2 + 4t - 3$ بیان شده است.
الف: معادله ی سرعت آن را به دست آورید. ب: نمودارهای مکان - زمان و سرعت - زمان متحرک را در ۴ ثانیه ی اول رسم کنید. پ: نمودار مسیر حرکت جسم را رسم و چگونگی حرکت را توصیف کنید.

پاسخ

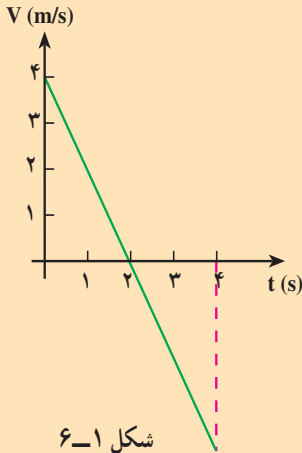
الف: با استفاده از رابطه ی ۵-۱ داریم:

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

ب: نمودار مکان - زمان متحرک به صورت یک سهمی (شکل ۵-۱) است که بیشینه ی آن در لحظه ی $t = 2s$ است (چرا؟) هم چنین جسم در لحظه های $t = 1s$ و $t = 3s$ در مبدأ و در لحظه ی $t = 0$ ، در نقطه ی $x = -3m$ قرار دارد.



شکل ۵-۱



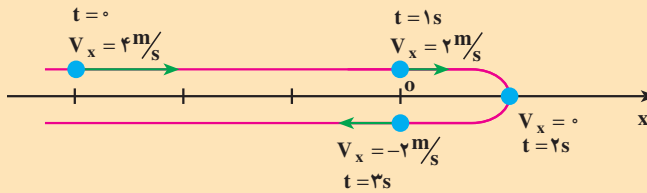
شکل ۶-۱

نمودار سرعت - زمان متحرک به صورت یک خط راست است (شکل ۶-۱) که در بند (الف) معادله‌ی آن را به دست آوردیم.

پ: با توجه به این نمودارها ملاحظه می‌شود که متحرک در لحظه‌ی $t = 0$ در مکان $x = -3$ m قرار دارد و با سرعت 4 m/s در جهت محور x حرکت می‌کند؛ سپس سرعت آن به تدریج، کاهش می‌یابد (شیب مماس بر نمودار مکان - زمان در شکل ۵-۱ به تدریج، کم می‌شود) تا در لحظه‌ی $t = 2$ s که سرعت آن صفر می‌شود.

می‌توان گفت شیب مماس بر نمودار مکان - زمان در این لحظه صفر می‌شود.

از لحظه‌ی $t = 2$ s به بعد متحرک برمی‌گردد و در خلاف جهت محور x شروع به حرکت می‌کند و v_x منفی می‌شود. در برگشت، اندازه‌ی سرعت افزایش می‌یابد و در لحظه‌ی $t = 3$ s دوباره از مبدأ می‌گذرد. در این لحظه سرعت آن -2 m/s است. مسیر حرکت جسم در شکل ۷-۱ رسم شده و بردار سرعت آن نیز روی شکل نمایش داده شده است.



شکل ۷-۱

در شکل ۷-۱ باید مسیر روی محور x رسم شود، ولی ما برای این که مسیر را بهتر مشخص کنیم، آن را در بالا و پایین این محور رسم کرده‌ایم. ملاحظه می‌شود که در تمام مسیر رفت و برگشت، معادله‌ی مکان و معادله‌ی سرعت جسم، به ترتیب به صورت زیر بیان می‌شود:

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

$$v_x = -2t + 4$$

مثال ۱-۴

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

پاسخ

الف: در فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که معادله‌ی حرکت یکنواخت یک جسم روی خط راست با رابطه‌ی

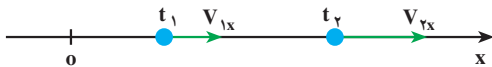
$$x = v_x t + x_0 \quad (V-1)$$

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

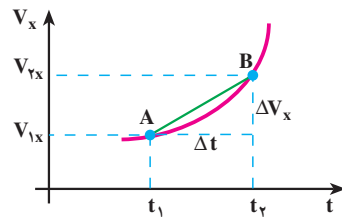
$$x = -5t + 10 \quad \text{ب:}$$

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

شتاب متوسط و شتاب لحظه‌ای: می‌دانید هنگامی که سرعت جسم تغییر می‌کند، حرکت را شتاب‌دار می‌نامند. در شکل ۱-۸ الف نمودار سرعت - زمان یک حرکت شتاب‌دار و در شکل ۱-۸ ب بردار سرعت متحرک، در زمان‌های t_1 و t_2 ، نشان داده شده است.



شکل ۱-۸ ب



شکل ۱-۸ الف

هم چنین می‌دانید که $\Delta v_x = v_{2x} - v_{1x}$ را تغییر سرعت متحرک در بازه‌ی 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 بازه‌ی

زمانی می‌نامند. این کمیت را با نماد \bar{a} نشان می‌دهیم؛ در نتیجه داریم:

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

در این جا هم هنگامی که Δt بسیار کوچک و کوچک‌تر می‌شود، نقطه‌ی B، در شکل 8-1 الف، به نقطه‌ی A نزدیک و نزدیک‌تر می‌شود و سرانجام خط AB در نقطه‌ی A بر نمودار سرعت - زمان مماس می‌گردد. شیب خط مماس بر نمودار در نقطه‌ی A را شتاب لحظه‌ای جسم در لحظه‌ی t_1 می‌نامیم. اکنون می‌توان شتاب لحظه‌ای را، مانند سرعت لحظه‌ای، به طور دقیق تعریف کرد که: هنگامی

که Δt به سمت صفر میل می‌کند، نسبت $\bar{a}_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}$ شتاب لحظه‌ای جسم را در لحظه‌ی t_1 به دست می‌دهد. به عبارت دیگر، شتاب لحظه‌ای حد شتاب متوسط است هنگامی که Δt به سمت صفر میل می‌کند. شتاب لحظه‌ای را با a_x نمایش می‌دهیم. در نتیجه داریم:

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

به بیان ریاضی، شتاب لحظه‌ای مشتق سرعت نسبت به زمان است. از این به بعد برای اختصار شتاب لحظه‌ای را شتاب می‌نامیم. اکنون با استفاده از رابطه‌های 5-1 و 9-1 شتاب را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2}$$

مثال 5-1

معادله‌ی حرکت جسمی در SI به صورت $x = t^3 - 6t^2 + 9t$ بیان شده است. الف: شتاب متوسط آن را در بازه‌ی زمانی 1 تا 2 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 بازه‌ی زمانی لازم است سرعت متحرک را در لحظه‌های $t=1s$ و $t=2s$ داشته باشیم. ابتدا معادله‌ی 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 v_x (صفر) و

-3 m/s برای سرعت به دست می‌آید.

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

ب: ابتدا معادله‌ی شتاب متحرک را می‌نویسیم:

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

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

به دست می‌آید:

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

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

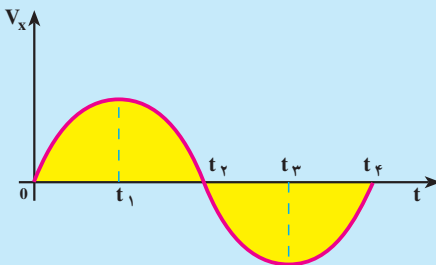
بردار شتاب را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

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

در رابطه‌ی بالا 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

نمودار سرعت-زمان متحرکی در شکل ۹-۱ نشان داده شده است. تعیین کنید



در چه بازه‌ی زمانی بردار شتاب در جهت محور x و در کدام بازه‌ی زمانی در خلاف جهت محور x است.

شکل ۹-۱

هنگامی که اندازه‌ی سرعت متحرکی زیاد می‌شود حرکت را تندشونده و هنگامی که اندازه‌ی سرعت متحرکی کاهش می‌یابد، حرکت را کند شونده می‌نامند.

فعالیت ۱-۱

در تمرین ۱-۲، سرعت متحرک در بازه‌ی زمانی 0 تا t_1 مثبت است. a_x نیز مثبت است؛ زیرا شیب مماس بر نمودار در این بازه‌ی زمانی مثبت است و حرکت تندشونده است. حاصل ضرب $a_x v_x$ نیز مثبت است. اکنون جاهای خالی را در گزاره‌های زیر پر کنید.

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

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

پ: در زمان‌های بزرگ‌تر از t_3 ، سرعت متحرک است. a_x است. حرکت است. حاصل ضرب $a_x v_x$ است.

در فعالیت بالا ملاحظه می‌کنید که وقتی $a_x v_x > 0$ باشد حرکت تندشونده و وقتی $a_x v_x < 0$ باشد، حرکت کندشونده است.

مثال ۱-۶

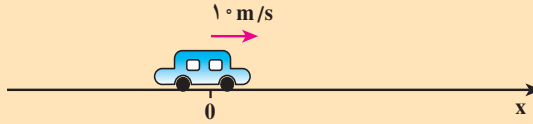
خودرویی با سرعت 10 m/s در حال حرکت است. راننده ترمز می‌کند و سرعت خودرو با شتاب 2 m/s^2 کاهش می‌یابد. الف: چه زمانی طول می‌کشد تا خودرو متوقف شود؟ ب: در این بازه‌ی زمانی خودرو چه مسافتی را می‌پیماید؟

پاسخ

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

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

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



شکل ۱-۱۰

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 معادله‌ی 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 معادله‌ی 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 رابطه‌ی مستقل از زمان زیر نیز به دست آوریم:

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

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

حرکت سقوط آزاد: در فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که سقوط آزاد اجسام در نزدیکی سطح زمین یکی از نمونه‌های مهم حرکت با شتاب ثابت بر روی مسیر مستقیم است. شتاب این حرکت در خلأ برابر شتاب گرانش (g) و جهت آن، رو به پایین است.

مثال ۱-۷

سنگی را از بالای ساختمان بلندی به ارتفاع ۴۵m رها می‌کنیم، الف: سنگ پس از چه زمانی به زمین می‌رسد؟ ب: سرعت آن، هنگام رسیدن به زمین چند متر بر ثانیه و چند کیلومتر بر ساعت است؟ ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

پاسخ

الف: با توجه به آن چه در فیزیک ۲ و آزمایشگاه خوانده‌اید، برای بررسی حرکت سقوط آزاد اجسام، محور y را در راستای قائم و رو به پایین و مبدأ آن را نقطه‌ی رها کردن جسم در نظر می‌گیریم. در این صورت، معادله‌ی حرکت با شتاب ثابت ۱۲-۱ به صورت زیر به دست می‌آید:

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

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

ب: با استفاده از معادله‌ی سرعت ۱۱-۱ داریم:

$$v = gt$$

$$v = 10 \times 3 = 30 \text{ m/s} = 108 \text{ km/h}$$

فعالیت ۱-۲



شکل ۱-۱۱

از دوست خود بخواهید، مطابق شکل ۱-۱۱، خط‌کش مدرج بلندی را بین انگشتان شما نگه دارد و در یک لحظه آن را رها کند. چگونه می‌توانید زمان واکنش خود را (یعنی زمانی که طول می‌کشد تا پس از مشاهده‌ی رها شدن خط‌کش، آن را بگیرید) اندازه‌گیری کنید.

اکنون، مسئله‌ی پرتاب جسمی را در راستای قائم به طرف بالا بررسی می‌کنیم. جهت محور y را به طرف بالا در نظر می‌گیریم. معادله‌های حرکت و سرعت با رابطه‌های زیر بیان می‌شود:

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_{0,y}t + y_0 \quad (14-1)$$

$$v_y = -gt + v_{0,y} \quad (15-1)$$

و معادله‌ی مستقل از زمان آن به صورت زیر است:

$$v_y^2 - v_{0,y}^2 = -2g(y - y_0) \quad (16-1)$$

مثال ۸-۱

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 نقطه‌ی پرتاب برگردد؟ ت: سرعت سنگ در این نقطه چه قدر است؟ ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

پاسخ

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

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

$$v_y = -10t + 20$$

در بالاترین نقطه، $v_y = 0$ ، در نتیجه:

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

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

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

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

پ: در بازگشت سنگ به نقطه‌ی پرتاب، داریم $y = 0$ ، در نتیجه:

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

$$t(-5t + 20) = 0$$

و یا

جواب‌های این معادله $t=0$ و $t=4s$ است. $t=0$ مربوط به لحظه‌ی پرتاب است و $t=4s$ زمانی است که طول می‌کشد تا سنگ به نقطه‌ی پرتاب برگردد.

ت: سرعت متحرک در این لحظه از معادله‌ی سرعت به دست می‌آید:

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

علامت منفی نشان می‌دهد که در هنگام بازگشت سنگ به نقطه‌ی 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 ۹-۱

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، معادله‌ی حرکت سنگ به صورت زیر است:

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

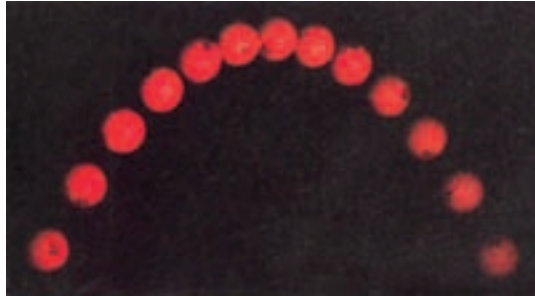
در پایین ساختمان $y = -50 \text{ m}$ ، در نتیجه:

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

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

۱-۲- حرکت در دو بُعد یا حرکت در صفحه

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



شکل ۱-۱۲- مسیر توپ گلف

در فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که مکان جسم در یک صفحه، با بردار \vec{r} نمایش داده می‌شود. این بردار را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\vec{r} = x \vec{i} + y \vec{j} \quad (۱۷-۱)$$

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

$$x = f(t) \text{ و } y = g(t) \quad (۱۸-۱)$$

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

$$\vec{r} = f(t) \vec{i} + g(t) \vec{j} \quad (۱۹-۱)$$

جابه‌جایی و سرعت متوسط: برای بررسی حرکت جسم روی مسیری مطابق شکل ۱-۱۳،

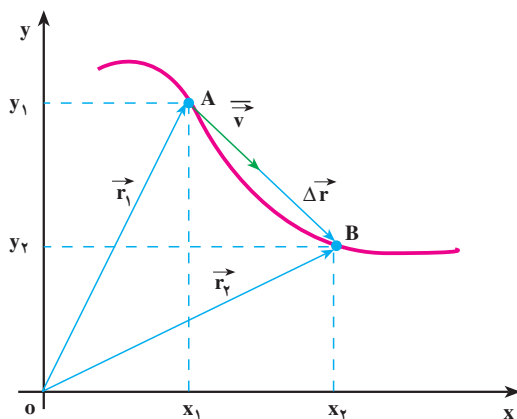
فرض کنید متحرکی در لحظه t_1 در نقطه‌ی A (مکان \vec{r}_1) و در لحظه‌ی t_2 در نقطه‌ی B (مکان \vec{r}_2) باشد. برداری که از A به B رسم می‌شود جابه‌جایی (تغییر مکان) جسم را در بازه‌ی زمانی $\Delta t = t_2 - t_1$ نمایش می‌دهد. این بردار که در شکل ۱-۱۳ رسم شده است از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 \quad (۲۰-۱)$$

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

$$\Delta \vec{r} = (\Delta x) \vec{i} + (\Delta y) \vec{j} \quad (۲۱-۱)$$

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



شکل ۱-۱۳- بردار سرعت متوسط و بردار تغییر مکان هم جهت اند.

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

تعریف می‌شود:

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

با استفاده از رابطه‌ی ۱-۲۱ 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

رابطه‌ی ۱-۲۲ نشان می‌دهد که سرعت متوسط، کمیتی برداری است و \vec{v} با

$\Delta \vec{r}$ هم جهت است؛ چرا؟

مثال ۱-۱۰

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

$$x = 2t \quad \text{و} \quad y = -t^2 + 4t$$

الف: بردار مکان جسم را در لحظه‌های $t_1 = 1s$ و $t_2 = 2s$ به دست آورید.

ب: سرعت متوسط آن را در بازه‌ی زمانی ۱ تا ۲ ثانیه تعیین و بزرگی آن را

حساب کنید.

پاسخ

الف: در $t_1 = 1s$:

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

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

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

به همین ترتیب در $t_2 = 2s$:

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

ب: در بازه‌ی زمانی ۱ تا ۲ ثانیه:

$$\Delta x = x_2 - x_1 = 4 - 2 = 2m$$

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

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

$$\bar{v}_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{1}{1} = 1 \text{ m/s} \quad \vec{\bar{v}} = 2\vec{i} + \vec{j}$$

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

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

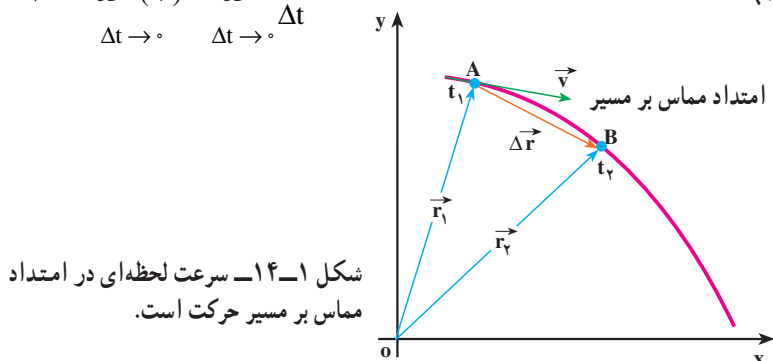
سرعت لحظه‌ای: در شکل ۱-۱۴ نمودار حرکت جسمی روی یک مسیر خمیده در صفحه‌ی

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

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

همچنین می‌دانید هنگامی که بازه‌ی زمانی Δt ، کوچک و کوچک‌تر شود، سرعت متوسط به سرعت لحظه‌ای نزدیک و نزدیک‌تر می‌شود؛ یعنی، بردار سرعت لحظه‌ای حد بردار سرعت متوسط است وقتی Δt به سمت صفر، میل می‌کند:

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



به عبارت دیگر می‌توان 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 رابطه‌ی ۱-۲۱ می‌توان 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 ۱-۱۴ می‌بینید که وقتی t_2 به سمت t_1 میل کند، راستای بردار جابه‌جایی $\Delta \vec{r}$ ، به سمت راستای مماس بر منحنی مسیر، در نقطه‌ی A میل خواهد کرد. بنابراین، چون بردار سرعت متوسط همواره هم‌جهت با جابه‌جایی است، در حدی که Δt به سمت صفر میل می‌کند، بردار سرعت لحظه‌ای بر مسیر حرکت در نقطه‌ی A مماس خواهد شد. بدین ترتیب می‌توان گفت هنگامی که جسم روی یک مسیر خمیده حرکت می‌کند، جهت بردار سرعت آن که همواره بر مسیر حرکت مماس است، در هر لحظه تغییر می‌کند. از این پس، برای اختصار، بردار سرعت لحظه‌ای را سرعت می‌نامیم.

مثال ۱-۱۱

خودروی در یک صفحه‌ی افقی که آن را در این جا صفحه‌ی xOy می‌نامیم، حرکت می‌کند. معادله‌های حرکت آن در SI به صورت زیر است:

$$x = 6t + 5 \quad \text{و} \quad y = 4t^2$$

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

پاسخ

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

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

ملاحظه می‌شود که مؤلفه‌ی افقی سرعت مقدار ثابتی دارد و تابع زمان نیست. به همین ترتیب برای مؤلفه‌ی 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.

فعالیت ۱-۳

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

در شکل ۱۵-۱ الف بردارهای سرعت در دو لحظه‌ی t_1 و t_2 روی مسیر نشان داده شده است. برای محاسبه‌ی تغییر سرعت در بازه‌ی زمانی $\Delta t = t_2 - t_1$ از نقطه‌ی O' بردارهای مساوی با \vec{v}_1 و \vec{v}_2 رسم می‌کنیم و $\Delta \vec{v}$ را به‌دست می‌آوریم (شکل ۱۷-۱ ب). در این جا نیز، مشابه حرکت یک بعدی، بردار شتاب متوسط را در بازه‌ی زمانی Δt به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

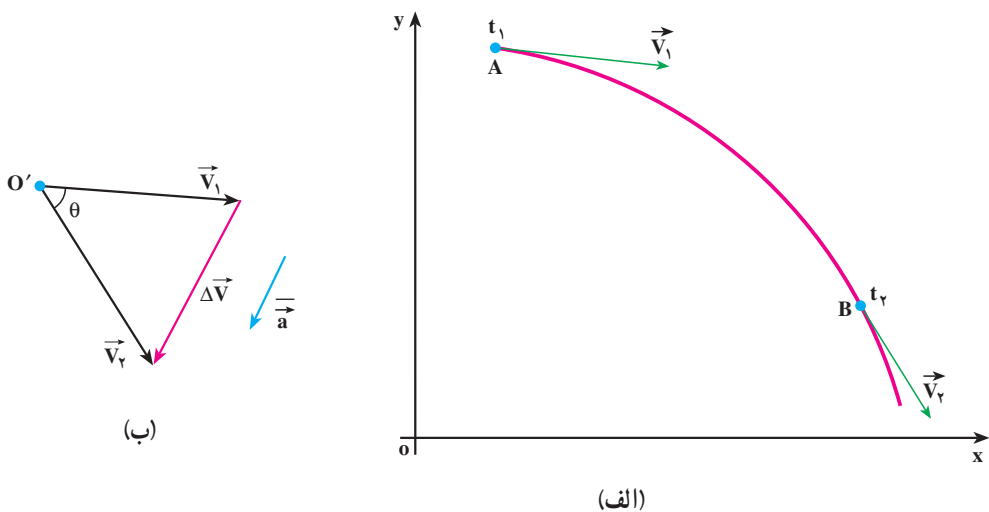
$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (28-1)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۲۷-۱ 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 می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

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



شکل ۱۵-۱- بردار شتاب متوسط با $\Delta \vec{v}$ هم‌جهت است.

شتاب لحظه‌ای در لحظه‌ی t_1 را نیز می‌توان به‌صورت حد شتاب متوسط، هنگامی که Δt

به سمت صفر میل می‌کند، تعریف کرد؛ یعنی:

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

با توجه به مفهوم مشتق، رابطه‌ی ۱-۳ به صورت زیر نوشته می‌شود:

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

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

به کمک رابطه‌ی ۱-۲۹ می‌توانیم 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 $\frac{dv_x}{dt} = a_x$ مؤلفه‌های شتاب لحظه‌ای هستند.

در نتیجه می‌توان نوشت:

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

رابطه‌ی ۱-۲۸ نشان می‌دهد که \vec{a} و $\Delta \vec{v}$ هم جهت‌اند، ولی همان‌طور که در شکل ۱-۱۵-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؛ درحالی‌هم که Δt به سمت صفر میل می‌کند و بردار \vec{v}_2 به بردار \vec{v}_1 بسیار نزدیک می‌شود، شتاب لحظه‌ای با سرعت لحظه‌ای نیز معمولاً هم جهت نخواهد بود، ولی به کمک رابطه‌ی ۱-۳۳ و با داشتن معادله‌ی سرعت، جهت بردار شتاب لحظه‌ای را که از این پس آن را به اختصار شتاب خواهیم نامید، می‌توان به‌دست آورد.

مثال ۱-۱۲

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

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

بردارهای سرعت و شتاب این جسم را در لحظه‌ی $t = 1s$ به‌دست آورید. آیا این

دو بردار هم جهت‌اند؟

پاسخ

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

می‌آوریم:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = 4 \cdot t \stackrel{t=1\text{s}}{\Rightarrow} v_x = 4 \cdot \text{m/s}$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = -15t^2 \stackrel{t=1\text{s}}{\Rightarrow} v_y = -15 \text{m/s}$$

بنابراین بردار سرعت لحظه‌ای در $t = 1\text{s}$ 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. مؤلفه‌ی افقی شتاب، ثابت است:

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

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = -3 \cdot t$$

a_y تابع زمان است و در $t = 1\text{s}$ برابر است با:

$$a_y = -3 \cdot \text{m/s}^2$$

با توجه به مقدارهای a_x و a_y در لحظه‌ی فوق، بردار شتاب در $t = 1\text{s}$ نیز

نوشته می‌شود:

$$\vec{a} = 4 \cdot \vec{i} - 3 \cdot \vec{j}$$

زاویه‌ای که بردارهای سرعت و شتاب در لحظه‌ی $t = 1\text{s}$ با محور افقی می‌سازند

به ترتیب برابرند با:

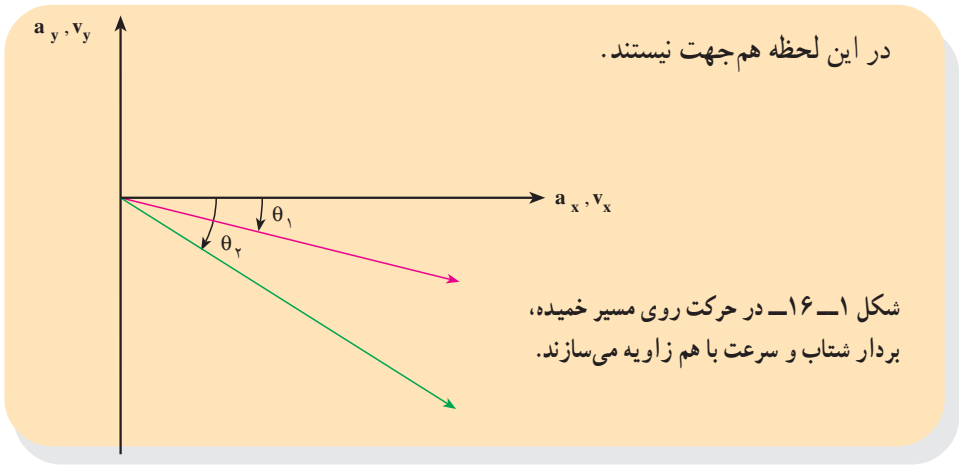
$$\tan \theta_1 = \frac{v_y}{v_x} = \frac{-15}{4}$$

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

$$\tan \theta_2 = \frac{a_y}{a_x} = -\frac{3}{4}$$

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

با مقایسه‌ی زاویه‌های θ_1 و θ_2 می‌توان نتیجه گرفت که بردارهای سرعت و شتاب



تمرین‌های فصل اول

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

الف: بزرگی سرعت متوسط جسم در بازه‌ی زمانی ۱ تا ۲ ثانیه.

ب: بزرگی سرعت متحرک در لحظه‌ی $t = 4s$.

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

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

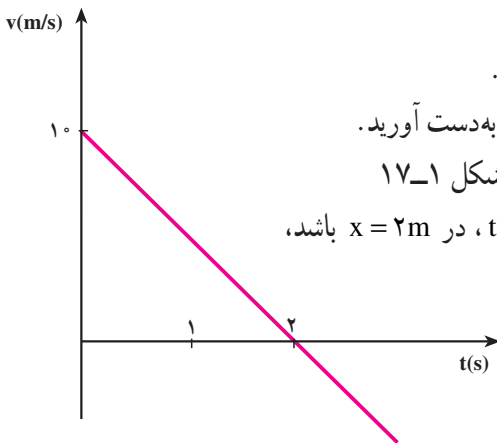
الف: معادله‌ی حرکت جسم را بنویسید.

ب: مکان جسم را در لحظه‌ی $t = 3s$ به دست آورید.

۳- نمودار سرعت - زمان متحرکی در شکل ۱-۱۷

داده شده است. اگر متحرک در لحظه‌ی $t = 0s$ در $x = 2m$ باشد،

معادله‌ی حرکت آن را به دست آورید.



شکل ۱-۱۷

۴- معادله‌ی حرکت متحرکی که بر روی خط راست حرکت می‌کند، در SI به صورت:

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

الف: شتاب متوسط متحرک در بازه‌ی زمانی ۱ تا ۲ ثانیه

ب: شتاب متحرک در لحظه‌ی $t = 3s$ را به دست آورید.

۵- بیشینه‌ی شتاب خودرویی در حین ترمز کردن، در جاده‌ی خشک $5 m/s^2$ و در جاده‌ی

خیس، 2 m/s^2 است. اگر این خودرو با سرعت 72 km/h در حرکت باشد و راننده ناگهان مانعی را در فاصله‌ی 45 متری خود ببیند، آیا می‌تواند خودرو را به‌موقع متوقف کند؟ در صورتی که:

الف: جاده خشک باشد. ب: جاده خیس باشد. (زمان تأخیر واکنش راننده را ناچیز فرض کنید).

۶- خودرویی در پشت چراغ قرمز ایستاده است. با سبز شدن چراغ، خودرو با شتاب 2 m/s^2 شروع به حرکت می‌کند. در همین لحظه کامیونی با سرعت ثابت 36 km/h از کنار آن می‌گذرد.

الف: نمودارهای مکان - زمان و سرعت - زمان را برای خودرو و کامیون رسم کنید.

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

۷- در شکل ۱-۱۸ تویی در راستای قائم به طرف بالا پرتاب می‌شود.

توپ پس از 4 ثانیه به محل پرتاب برمی‌گردد. توپ:

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

پ: با چه سرعتی به زمین می‌رسد؟ ت: بعد از چند ثانیه به زمین

می‌رسد؟ ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

۸- مثالی ذکر کنید که در آن سرعت یک جسم در یک لحظه، صفر ولی

جسم در آن لحظه دارای شتاب باشد.

۹- کانگورو می‌تواند 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 ذره‌ی متحرکی در لحظه‌های $t_1 = 5 \text{ s}$ و

$t_2 = 25 \text{ s}$ 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 لحظه‌ی t_1 و t_2 به دست آورید. با رسم یک نمودار

جهت \vec{v} را نشان دهید.

۱۱- معادله‌ی حرکت جسمی با دو رابطه‌ی زیر، در SI داده شده است:

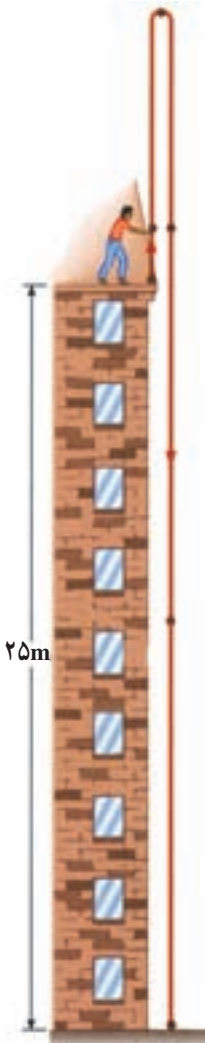
$$y = 2t^2 + 1, \quad x = 6t$$

الف: معادله‌ی سرعت جسم را بنویسید و بزرگی سرعت را در $t = 2 \text{ s}$

محاسبه کنید.

ب: بردار سرعت متوسط جسم را بین لحظه‌های $t = 1$ و $t = 2$ ثانیه

برحسب بردارهای یکه‌ی \vec{i} و \vec{j} بنویسید.



شکل ۱-۱۸

٦

دینامیک



اسحاق نیوتون
(۱۶۴۲-۱۷۲۷م)

دینامیک

نگاهی به فصل: قانون‌های نیوتون از جمله‌ی 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، فضاوردی 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.

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: «اگر به یک جسم نیروهایی وارد شود، شتابی می‌گیرد که با برآیند نیروهای وارد بر جسم نسبت مستقیم دارد و با آن هم جهت است و با جرم جسم نسبت وارون دارد؛ یعنی:

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

و یا:

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

(۲-۱)

توجه کنید در رابطه‌ی 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، هم‌راستا و در سوی مخالف یک‌دیگرند و هر یک بر دیگری وارد می‌شود.

تمرین ۱-۲

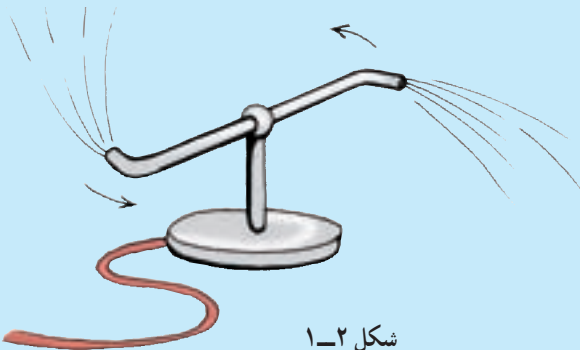
با مراجعه به آنچه در فیزیک ۲ و آزمایشگاه خوانده‌اید، جمله‌های زیر را کامل کنید:

- ۱- تغییر بردار سرعت در اثر است.
- ۲- اگر در اثر اعمال نیرو، جسم ساکنی به حرکت درآید، در شروع حرکت بردارهای سرعت و هم‌جهت‌اند.
- 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

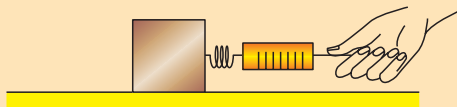
در شکل ۲-۲ تصویر یک موشک ایرانی را در حال پرتاب، مشاهده می‌کنید. براساس قانون سوم نیوتون چگونگی حرکت آن را شرح دهید.



شکل ۲-۲

مثال ۱-۲

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:



شکل ۲-۳ الف

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.

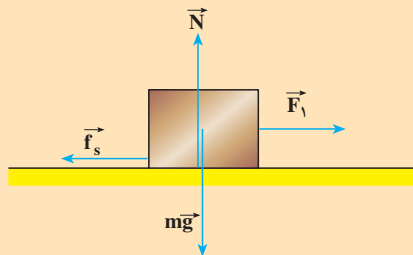
پاسخ

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

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

$$f_{s,\max} = \mu_s N$$

$$f_{s,\max} = 0.4 \times 100 = 40\text{ N}$$



شکل ۲-۳-ب

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

$$\sum F_x = ma \Rightarrow F_1 - f_s = ma = 0$$

$$f_s = 20\text{ N}$$

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

$$f_k = 0.2 \times 100 = 20 \text{ N}$$

برای محاسبه‌ی شتاب حرکت، قانون دوم نیوتون را می‌نویسیم:

$$F - f_k = ma$$

$$60 - 20 = 10a$$

$$a = 4 \text{ m/s}^2$$

۲-۲- چگونگی استفاده از قانون‌های نیوتون در حرکت یک جسم

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

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

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

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

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

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

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

نحوه‌ی استفاده از قانون‌های نیوتون در مثال‌های صفحه‌های ۳۳ تا ۳۵ نشان داده شده است.

مثال ۲-۲

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

پاسخ

نیروهای وارد بر جسم عبارت‌اند از:

نیروی وزن، که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود و نیرویی که از طرف طناب به جسم وارد می‌شود. چون جسم ساکن است، باید برابری نیروهای وارد بر آن صفر باشد. در نتیجه باید از طرف طناب، نیرویی در امتداد قائم و رو به بالا بر جسم اعمال شود. این نیرو را نیروی کشش طناب (تخ) می‌نامند که آن را با \vec{T} نمایش می‌دهیم.

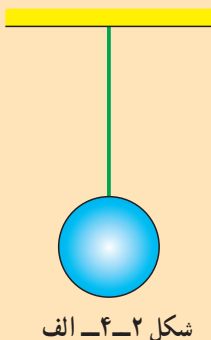
نیروهای وارد بر جسم، در راستای محور y هستند و در شکل ۲-۴ ب نشان داده شده‌اند. بنابر قانون دوم نیوتون داریم:

$$T - mg = ma$$

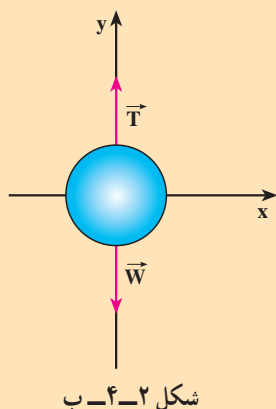
چون $a = 0$ ، داریم:

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

در هر نقطه از طناب کشیده شده، نیرویی از طرف یک‌بخش 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.



شکل ۲-۴ الف



شکل ۲-۴ ب

مثال ۲-۳

جسمی به جرم m را روی سطح شیب‌داری که با افق زاویه‌ی α می‌سازد قرار

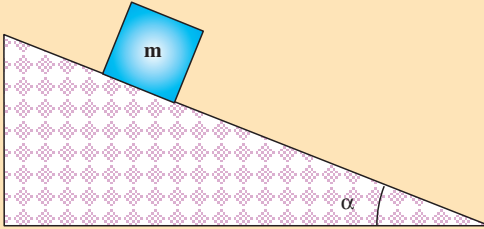
می‌دهیم:

الف: شتاب حرکت

جسم و نیروی عمودی تکیه‌گاه

را محاسبه کنید (در این قسمت

اصطکاک را نادیده بگیرید).



شکل ۲-۵-الف

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

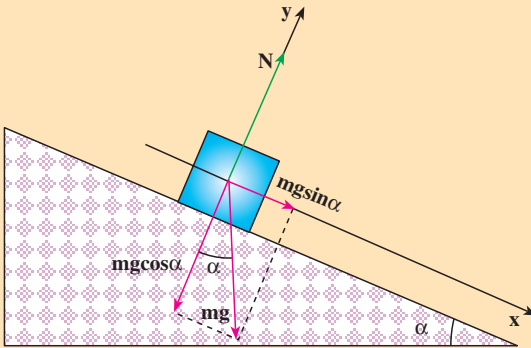
امتداد سطح شیب‌دار

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:

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

$$a = g \sin \alpha$$

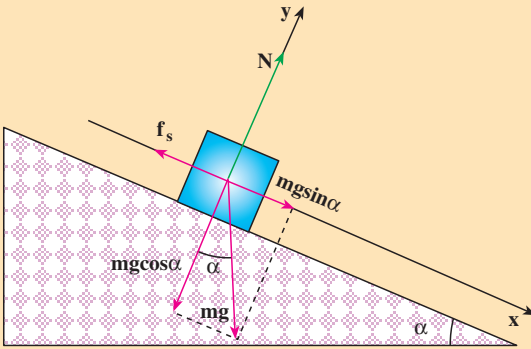
چون جسم در راستای محور y حرکت ندارد:

$$F_y = 0$$

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

و در نتیجه:

$$N = mg \cos \alpha$$



شکل ۶-۲

ب: نمودار نیروهای

وارد بر جسم در شکل ۶-۲

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 آن جا داریم:

$$f_s = mg \sin \alpha$$

۲-۳- تکانه (اندازه حرکت)

در شکل ۷-۲ 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 5 m متوقف شوند. به نظر شما

نیروی لازم برای متوقف کردن کدام یک از آن‌ها با شتاب ثابت بیشتر است؟ برای بررسی دقیق‌تر،



شکل ۷-۲

فرض کنید جرم کامیون 10^4 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 جابه‌جایی برابر است با:

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

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 می‌گیریم 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. نتیجه‌های این فعالیت و مثال قبل را در گروه خود، تجزیه و تحلیل و به کلاس گزارش کنید.

در مثال‌های بالا دیدیم که نیروی لازم برای متوقف کردن خودروها به جرم و سرعت آن‌ها بستگی دارد. در فیزیک کمیته به نام تکانه (اندازه حرکت) تعریف می‌شود که به هر دو کمیته جرم و سرعت بستگی دارد. «تکانه‌ی یک جسم، حاصل ضرب جرم جسم در سرعت آن است.»

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

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

تکانه، کمیته برداری است؛ چرا؟

رابطه‌ی بین نیرو و تکانه: با به‌کارگیری قانون دوم نیوتون، به سادگی رابطه‌ی نیرو و تکانه به‌دست می‌آید؛ با استفاده از رابطه‌ی ۱-۲ داریم:

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

چون جرم جسم، مقداری ثابت است، می‌توان نوشت:

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

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

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} \quad (2-3)$$

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

اگر در بازه‌ی زمانی Δt تغییر تکانه‌ی یک جسم $\Delta \vec{P}$ باشد، نیروی متوسط وارد بر آن از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} \quad (2-4)$$

مثال ۲-۴

چکشی به جرم $1/5 \text{ kg}$ را با سرعت 10 m/s به سر میخی می‌کوبیم (شکل ۲-۸). اگر زمان برخورد چکش با سر میخ 0.005 s باشد، بزرگی نیروی متوسطی که به چکش وارد می‌شود، چه مقدار است؟

پاسخ

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

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



شکل ۲-۸

تمرین ۲-۳

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 $12/1 \text{ s}$ ، همین مقدار افزایش پیدا می‌کند. حداکثر برابند نیروهای وارد بر هر کدام از خودروهای A و B را حساب کنید.

مطالعه‌ی آزاد

نقش کیسه‌ی هوا در تصادف‌های رانندگی



شکل ۲-۹

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 کیسه‌ی 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 کیسه‌ی پلاستیکی تولید می‌شود و کیسه‌ی پر از گاز در مقابل راننده و سرنشین قرار می‌گیرد. برخورد آن‌ها به کیسه‌ی هوا، مدت زمان تغییر سرعت یا زمان توقف آن‌ها را بسیار طولانی‌تر

می‌کند؛ در نتیجه بر طبق رابطه‌ی $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t}$ ، 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 کیسه‌ی هوا، این زمان را تا چند ثانیه افزایش می‌دهد از این‌رو، نیروی وارد بر سرنشین تا حدود یک هزارم، کاهش می‌یابد.

فعالیت ۲-۳

در یک مسابقه‌ی 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

۲-۴- حرکت دایره‌ای

حرکت یک جسم در مسیر دایره‌ای، نمونه‌ی 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، آب‌میوه‌گیری 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 ماهواره‌ی امید به دور زمین



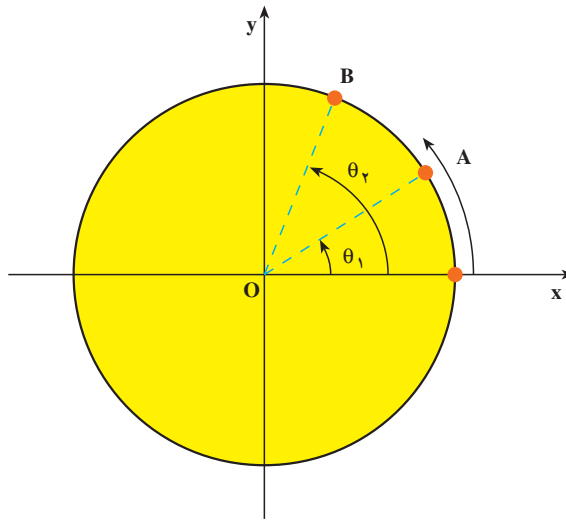
شکل ۲-۱۱- الف- تصویری از یک قطار هوایی در پارک تفریحی



شکل ۲-۱۱- ب- 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 زاویه‌ی θ نسبت به محور Ox نمایش داد. به θ ، مکان زاویه‌ای می‌گوییم. بنابراین هنگامی که ذره در نقطه‌ی A قرار دارد مکان آن را با زاویه‌ی θ_1 و هنگامی که در نقطه‌ی B قرار دارد، مکان آن را با زاویه‌ی θ_2



شکل ۲-۱۲

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:

$$\textcircled{\ominus} \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$$

و یا:

$$\textcircled{\ominus} \quad \frac{d\theta}{dt} \quad (6-2)$$

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 رابطه‌ی

$$\theta = 2t^2 + 6t \quad \text{ بیان شده است. (t برحسب ثانیه و } \theta \text{ برحسب رادیان)}$$

الف: سرعت زاویه‌ای متوسط ذره را بین لحظه‌های $t_1 = 1 \text{ s}$ و $t_2 = 2 \text{ s}$ و

ب: سرعت زاویه‌ای آن را در لحظه‌ی $t_3 = 3 \text{ s}$ حساب کنید.

۲-۵- حرکت دایره‌ای یکنواخت

هرگاه اندازه‌ی سرعت زاویه‌ای ذره‌ای که بر روی مسیر دایره‌ای در حرکت است ثابت بماند،

می‌گوییم ذره، حرکت دایره‌ای یکنواخت دارد. در چنین حرکتی، سرعت زاویه‌ای متوسط در هر

بازه‌ی زمانی با سرعت زاویه‌ای لحظه‌ای ذره برابر است.

$$\textcircled{\ominus} \quad \frac{\theta - \theta_0}{t - t_0}$$

و یا:

$$\textcircled{\ominus} \quad \omega = \frac{\theta - \theta_0}{t - t_0} \quad (7-2)$$

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 $\frac{1}{\text{s}}$ یا هرتز (Hz) است.

روشن است که :

$$T = \frac{\lambda}{f} \quad (۸-۲)$$

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

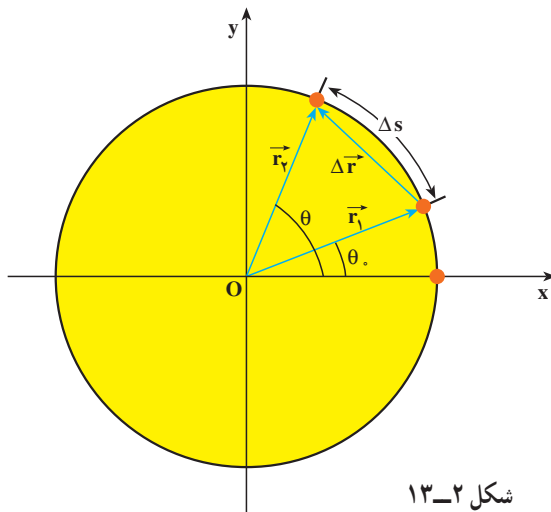
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (۹-۲)$$

تمرین ۵-۲

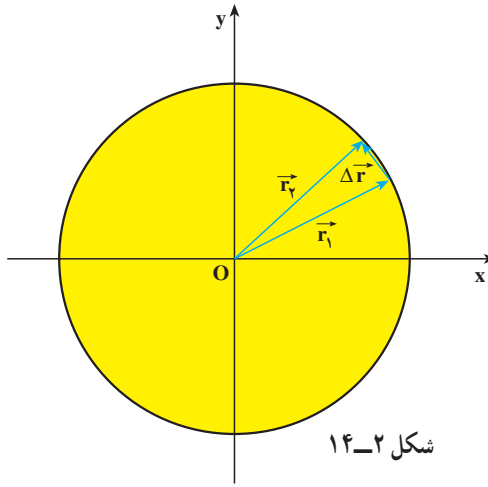
سرعت زاویه ای گردش ماه به دور زمین را محاسبه کنید (دوره ی گردش ماه به دور زمین را ۲۹ روز و حرکت آن را دایره ای یکنواخت فرض کنید).

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 ی t_1 و \vec{r}_1 در لحظه ی t_2 باشد، جابه جایی ذره در بازه ی زمانی $\Delta t = t_2 - t_1$ برابر $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ خواهد بود. ذره در این بازه ی زمانی کمان Δs را می پیماید. اگر بازه ی 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



شکل ۱۴-۲

در فصل قبل دیدیم که سرعت متوسط متحرک را می توان از رابطه ی ۱-۲۲ به دست آورد و بزرگی سرعت لحظه ای نیز با رابطه ی زیر تعریف می شود :

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

از آن جایی که در حالت حد، $|\Delta \vec{r}| \approx \Delta s$ داریم :

$$|\vec{v}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (۱۰-۲)$$

در درس ریاضی خوانده اید که زاویه ی $\Delta\theta$ 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 ی ۲-۱۰ را می توان 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 می نامند.

مثال ۲-۶

در یک شهربازی، گردونه‌ای افراد را در یک سطح افقی و در مسیر دایره‌ای می‌گرداند (شکل ۲-۱۵). 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.



شکل ۲-۱۵

پاسخ

دوره‌ی چرخش $T = 10\text{ s}$ است.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{10} = \frac{\pi}{5} \text{ rad/s} \quad \text{پس سرعت زاویه‌ای برابر است با:}$$

و سرعت خطی آن نیز برابر خواهد بود با:

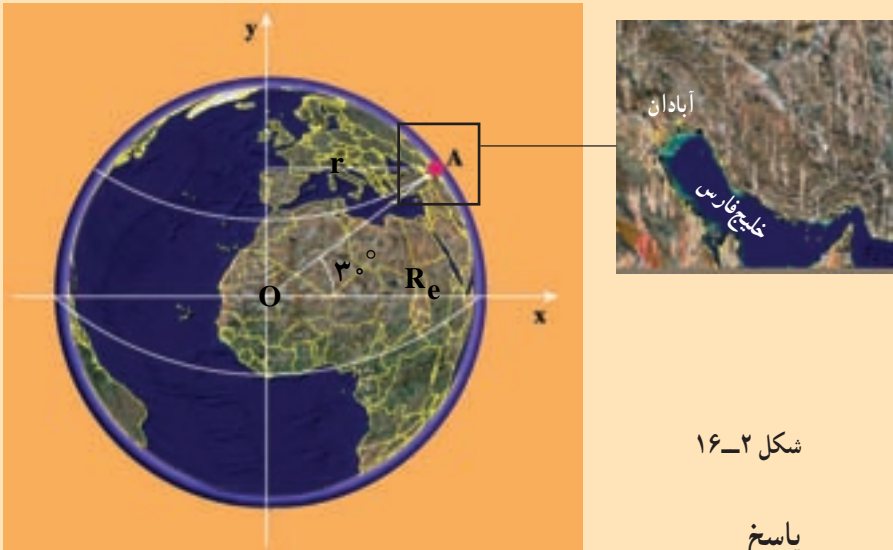
$$v = r\omega = 5 \times \frac{\pi}{5} = \pi \text{ m/s}$$

تمرین ۲-۶

طول عقربه‌های ساعت‌شمار، دقیقه‌شمار و ثانیه‌شمار 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.

مثال ۲-۷

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 ۲-۱۶

پاسخ

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

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

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

$$\omega = \frac{2\pi}{86400} = 7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

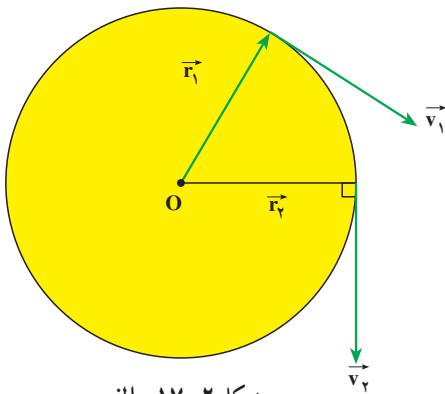
فاصله‌ی آبادان از محور چرخش زمین، با توجه به شکل ۲-۱۶ برابر است با :

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

و سرعت خطی شخص در آبادان برابر است با :

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

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



شکل ۲-۱۷-الف

یکنواخت است (شکل ۲-۱۷-الف). در فصل

قبل دیدیم که بردار سرعت در هر لحظه مماس بر

مسیر است. اگر مکان ذره در لحظه‌ی t_1 و \vec{r}_1 و

در لحظه‌ی t_2 ، \vec{r}_2 باشد، بردارهای سرعت

متحرک در این نقاط به ترتیب بر \vec{r}_1 و \vec{r}_2 عمودند.

بردار $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$ در شکل ۲-۱۷-ب رسم

شده است. ملاحظه می‌شود با این که بزرگی بردار

سرعت ثابت است، به علت تغییر راستای بردار

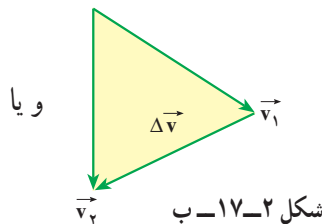
سرعت $\Delta \vec{v} \neq 0$ است. اندازه‌ی شتاب متوسط

حرکت در این حالت را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی $|\vec{a}| = \frac{|\Delta \vec{v}|}{\Delta t}$ به دست آورد. می‌توان نشان داد،

هنگامی که Δt به سمت صفر میل می‌کند، شتاب حرکت از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید :

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

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



شکل ۲-۱۷-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.
فاصله‌ی ماه از زمین $3/8 \times 10^8 \text{ m}$ و دوره‌ی ماه را ۲۹ روز بگیرید.

مثال ۲-۸

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

پاسخ

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{400}{20} = 20 \text{ m/s}^2$$

۲-۶- دینامیک حرکت دایره‌ای یکنواخت

در بخش ۲-۵ 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 هم‌جهت‌اند، در نتیجه در حرکت دایره‌ای یکنواخت، برابری نیروهای وارد بر جسم در راستای شعاع و به سوی مرکز است. از این رو برابری نیروهای وارد بر جسم را که منجر به حرکت دایره‌ای می‌شوند نیروی مرکزگرا می‌نامند. با توجه به رابطه‌های ۲-۱۳ قانون دوم نیوتون در حرکت دایره‌ای یکنواخت به صورت زیر درمی‌آید:

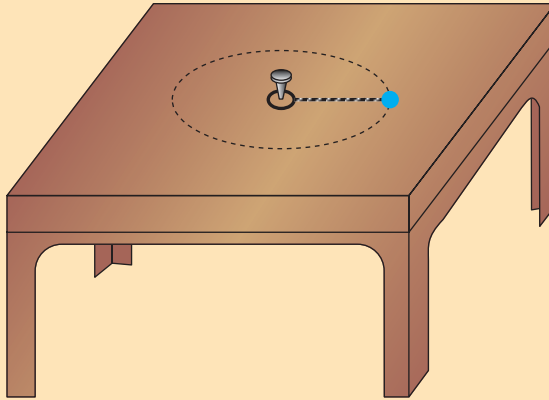
$$F = \frac{mv^2}{r} \quad (2-14 \text{ الف})$$

$$F = mr\omega^2 \quad (2-14 \text{ ب})$$

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

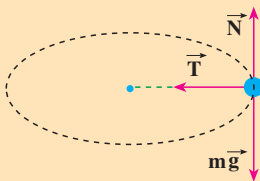
مثال ۲-۹

مهره‌ای به جرم 20g را به نخ می‌بندیم و به انتهای دیگر نخ، حلقه‌ی کوچکی وصل می‌کنیم، سپس حلقه را مطابق شکل ۲-۱۸-الف با میخ کوتاهی در وسط یک میز ثابت می‌کنیم. نیروی اصطکاک مهره با میز ناچیز است.



شکل ۲-۱۸-الف

فاصله‌ی 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.



شکل ۲-۱۸-ب

پاسخ

نیروهای وارد بر مهره در شکل ۲-۱۸-ب نشان داده شده است. در راستای قائم، نیروی وزن و نیروی عمودی تکیه‌گاه بر جسم اثر می‌کنند. براین‌د این دو نیرو صفر است:

$$N - mg = 0$$

$$N = mg$$

تنها نیروی کشش نخ می ماند که در این جا همان نیروی مرکزگرا، یعنی:

$$T = m \frac{v^2}{r} \text{ است. سرعت زاویه ای برابر است با:}$$

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

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:

$$T = m \frac{v^2}{r} = 20 \times 10^{-3} \times \frac{\pi^2}{4} \times \frac{1}{0.25} \approx 0.2 \text{ N}$$

تمرین ۲-۸

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

- ۱- در حرکت لباس هایی که در ماشین لباسشویی می چرخند.
- ۲- در چرخش الکترون به دور هسته.
- ۳- در گردش سیاره ها به دور خورشید.



ابوریحان بیرونی

ابوریحان محمد بن احمد بیرونی، دانشمند برجسته‌ی ایرانی، در نیمه‌ی دوم قرن چهارم و اوایل قرن پنجم می‌زیست. وی در بیرون (حومه‌ی) شهر کاث، پایتخت خوارزمشاهیان، به دنیا آمد. او تا سن بیست و پنج سالگی در زادگاه خود مشغول فراگیری علوم‌ی چون جغرافیا، ریاضیات، ستاره‌شناسی، پزشکی، فقه، کلام و ... بود. بیرونی اولین فعالیت‌های علمی خود را در حدود سال ۳۸۰ هجری در شهر کاث با رصد آسمان به کمک وسایل نه چندان دقیق آغاز کرد. در سال ۳۸۷ هجری بار دیگر در شهر کاث خسوفی را با هماهنگی انجام شده بین او و ابوالوفاء بوزجانی، از برجسته‌ترین منجمان آن دوره، رصد کرد. در واقع، ابوالوفاء نیز همین خسوف را در بغداد رصد کرده بود. با مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از این دو رصد، بیرونی اختلاف طول جغرافیایی بغداد و کاث را پیدا کرد. او در ری با دو ستاره‌شناس معروف ایرانی، کوشیار بن لبان گیلانی و ابو محمد خجندی، آشنا شد و رساله‌ای کوتاه در مورد وسیله‌ای که خجندی برای رصد آسمان ساخته بود، نگاشت (حکایة الالة المسماة السدس الفخری). هم چنین، بیرونی در مقدمه‌ی کتاب «مقالید علم الهیة ما یحدث فی سطح بسیط الکره»، که یکی از مهم‌ترین آثار او و نخستین کتاب کامل در باب مثلثات کروی است، از دیدارها، مکاتبات و مباحثات علمی خود با خجندی، لبان گیلانی و ابوالوفاء بوزجانی سخن گفته است. در سال ۳۹۱ هجری در جرجان و نزد قابوس و شمگیر نخستین کتاب مشهور خود، «آثار الباقیه عن القرون الخالیة» را دربار‌ی گاه‌شماری تاریخی و علمی نگاشت. در سال‌های ۴۰۶ و ۴۰۷ فرصتی کوتاه برای پرداختن به رصد پیدا کرد و با بهره‌گیری از کمک‌های مالی پادشاه، آلتی رصدی به نام حلقه‌ی شاهیه ساخت. او پس از رصد خورشید گرفتگی سال ۴۰۹ در نزدیکی لمغان (جایی میان کابل و قندهار)، از سال ۴۱۰ تا ۴۱۲ هجری یک سلسله رصدهای مختلف و منظم را در غزنه آغاز کرد. او در سال ۴۱۶ هجری پس از دست کم هفت سال تحقیق، نگارش کتاب «تحدید نهایات الاماکن فی تصحیح مسافات المساکن» را به پایان رساند. سپس در سال ۴۲۰، کتاب مهم «التفهیم لاوائل الصناعة التنجیم» را به دو زبان عربی و فارسی نوشت؛ روایت فارسی این کتاب از کهن‌ترین متون فارسی علمی و کهن‌ترین متن ریاضی نجومی به شمار می‌رود. وی سپس کتاب «القانون المسعودی» را که دانش‌نامه‌ای از آگاهی‌های نجومی آن دوران بود، تألیف کرد.



با توجه به اطلاعات به دست آمده، تعداد آثار ابوریحان بیرونی شامل تألیف‌ها، ترجمه‌ها و آثار نیمه تمام او به ۱۸۰ عنوان می‌رسد که دست کم ۱۱۵ عنوان از آن‌ها به ریاضیات و نجوم اختصاص دارد و از این تعداد تنها ۲۸ عنوان به دست ما رسیده است. بیرونی در کتاب «افراد المقال فی امر الظلال»، یکی از نظریات مشهور ارسطو را با تکیه بر آزمایش رد می‌کند. نکته‌ی مهم و مورد توجه در آزمایش‌های بیرونی، شیوه‌ی علمی او در انجام دادن آزمایش‌هاست. وی مانند یک محقق امروزی در آزمایش خود به نکاتی توجه می‌کند؛ از جمله هنگام مقایسه‌ی خاصیتی ویژه از دو ماده می‌کوشد تا سایر شرایط برای آن‌ها یکسان باشد و نیز به تکرار در آزمایش تأکید می‌کند تا مطمئن شود که نتایج حاصل از فرایند اتفاقی نیست.

دیدگاه بیرونی درباره‌ی چستی 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 می‌کرده‌اند. تنها بیرونی و ابن هیثم نظریاتی نو در این زمینه مطرح کرده‌اند. بیرونی چنین می‌گوید: «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» درباره‌ی سیاهی هوا بر فراز نقاط مرتفع را نشانه‌ی مبالغه‌ی وی در پیروی از نظریه‌ای که از کتاب «الحس و المحسوس» ارسطو برمی‌آید، می‌داند. ابوریحان بر آن است که در این باره باید فقط با استناد به آزمایش و تجربه سخن گفت و می‌گوید که هیچ‌گاه از تغییر رنگ هوا در سرما یا نبود گرما سخنی نرفته است و قله کوه دماوند با بلندی بسیارش دیده می‌شود و هیچ نشانه‌ای از سیاهی در آن نیست.

ابوریحان بیرونی علاوه بر کتاب‌های نام برده شده کتاب‌های دیگری چون «استیعاب الوجوه الممكنه فی صنعة الاسطرلاب»، رساله‌ای مهم در تاریخ نجوم اسلامی درباره‌ی بررسی و مقایسه‌ی روش‌های گوناگون ساخت انواع اسطرلاب، و «تسطیح الصور و تطبیح اکور»، رساله‌ای درباره‌ی تصویر کردن شکل‌های روی کره بر سطح صاف، را نگاشته است.

تمرین‌های فصل دوم

۱- براساس 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؟

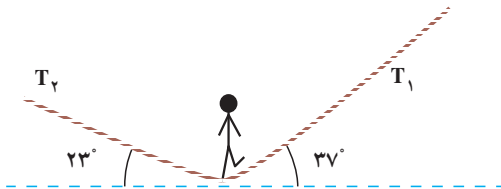
۲- به جسمی به جرم 100 kg نیروی ثابت F در راستای قائم به طرف بالا وارد می‌شود. جسم از حال سکون با شتاب 5 m/s^2 به طرف بالا حرکت می‌کند و پس از 2 s نیروی F حذف می‌شود. الف: مقدار نیروی F را تعیین کنید.

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 ۱۹-۲

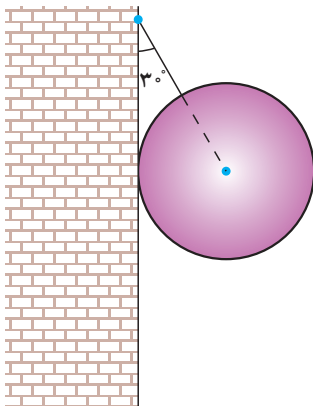
در حال تعادل است. نیروهای کشش طناب را محاسبه کنید.



شکل ۱۹-۲

۴- کره‌ای به جرم 2 kg را مطابق شکل ۲۰-۲،

به وسیله‌ی کابلی به دیوار قائم و بدون اصطکاک آویزان می‌کنیم. نیروی کشش کابل و واکنش دیوار را محاسبه کنید.

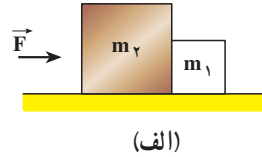
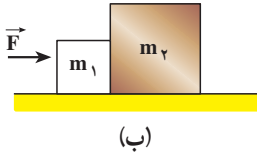


شکل ۲۰-۲

۵- دو جسم به جرم‌های $m_1 = 1 \text{ kg}$ و $m_2 = 2 \text{ kg}$

مطابق شکل ۲۱-۲ روی سطح افقی صافی قرار دارند. نیروی افقی \vec{F} باعث می‌شود که دو جسم با شتاب 3 m/s^2 به حرکت درآیند. اندازه‌ی نیروی F و نیروی تماسی‌ای که دو جسم بر یک‌دیگر وارد

می کنند را در هر یک از دو شکل «الف» و «ب» محاسبه کنید.



شکل ۲-۲۱



۶- کتابی را مانند شکل ۲-۲۲ به دیوار فشرده و ثابت نگه داشته ایم.

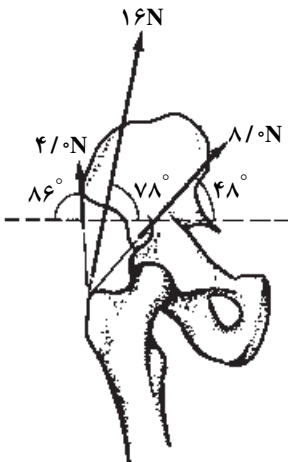
الف: آیا نیروی اصطکاک با نیروی وزن برابر است؟

چرا؟

ب: اگر کتاب را بیش تر به دیوار بفشاریم آیا نیروی

اصطکاک تغییر می کند؟ با این کار چه نیرویی افزایش می یابد؟

شکل ۲-۲۲



شکل ۲-۲۳

۷- سه ماهیچه، استخوان ران را به لگن متصل

می کنند. در شکل ۲-۲۳ مقدار و جهت نیروهایی که این

ماهیچه ها به استخوان ران وارد می کنند، نشان داده شده

است. برابند نیروهای وارد بر استخوان ران از طرف این

ماهیچه ها را به دست آورید.

۸- پره های یک بالگرد (هلیکوپتر) در هر دقیقه ۹۰۰

دور می گردد. کمیت های زیر را برای پره ها محاسبه کنید.

الف: دوره، بسامد و سرعت زاویه ای

ب: سرعت خطی و شتاب مرکزگرای نقطه ای که فاصله ای

آن از محور دوران ۳m است.

۹- ماهواره‌ای روی مدار دایره‌ای به دور زمین می‌گردد. اگر جرم ماهواره $m = ۲۵۰ \text{ kg}$ ، جرم زمین $M_e = ۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴} \text{ kg}$ ، ثابت جهانی گرانش $G = ۶/۶۷ \times ۱۰^{-۱۱} \text{ N.m}^2/\text{kg}$ ، فاصله‌ی ماهواره از سطح زمین ۲۶۰۰ km و شعاع زمین ۶۴۰۰ km باشد، کمیت‌های زیر را محاسبه کنید:

الف: نیروی گرانش بین ماهواره و زمین

ب: سرعت ماهواره

پ: دوره‌ی 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 ماهواره‌ی امید (شکل ۲-۲۴) تقریباً ۲۷ کیلوگرم و فاصله‌ی آن از سطح زمین

حدوداً ۲۵۰ کیلومتر است. با توجه به داده‌های مسئله‌ی ۹، دوره، سرعت و نیروی گرانشی بین این ماهواره و زمین را به دست آورید.



شکل ۲-۲۴

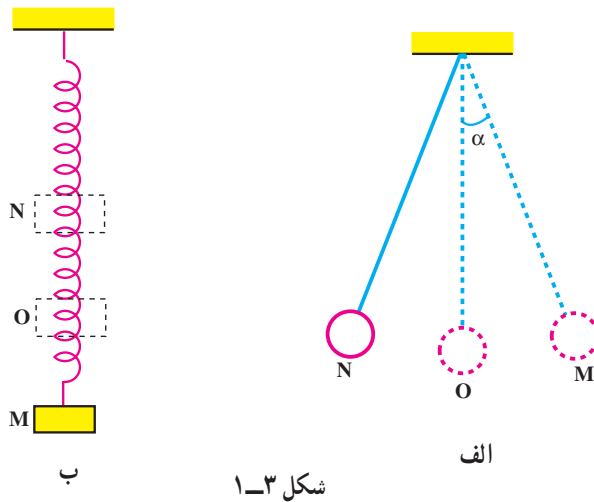
حرکت نوسانی



هاینریش هرتز
(۱۸۵۷-۱۸۹۴م)

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 فصل‌های سال، طلوع و غروب خورشید، یا حرکت یک آونگ ساده (شکل ۱-۳-الف)، حرکت وزنه‌ای که به یک فنر متصل است (شکل ۱-۳-ب) و مثال‌های بسیار دیگری مانند این‌ها، حرکت‌های دوره‌ای هستند که با گذشت زمان بارها تکرار می‌شوند. در حرکت‌های دوره‌ای، متحرک پس از طی زمان معینی به وضعیت اولیه برمی‌گردد و حرکت خود را از نو آغاز می‌کند. در این فصل پس از معرفی پدیده‌های دوره‌ای به توصیف حرکت هماهنگ ساده می‌پردازیم؛ زیرا شناخت و بررسی این حرکت، پایه و اساس مناسبی برای درک امواج و انتشار آن‌ها فراهم می‌کند.



شکل ۱-۳

۱-۳-۱- حرکت هماهنگ ساده

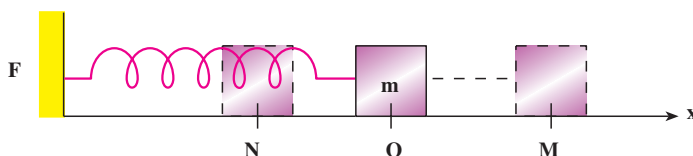
یک حرکت نوسانی را هماهنگ ساده می‌نامیم؛ وقتی مسیر رفت و برگشت متحرک روی یک پاره خط حول نقطه‌ای واقع در وسط آن باشد. برای مثال، حرکت آونگ (شکل ۱-۳-الف)، وقتی زاویه α خیلی کوچک باشد، به گونه‌ای که بتوان تاثرات و سینوس آن را برابر گرفت و هم‌چنین بالا و پایین رفتن وزنه‌ی آویخته به فنر (شکل ۱-۳-ب). در این دو حرکت، متحرک، در بازه‌های زمانی یکسان، از ابتدای پاره خط، یعنی از نقطه‌ی M به نقطه‌ی N می‌رود و برمی‌گردد و به این ترتیب، حول نقطه‌ی 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 بازه‌ی 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:

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

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



شکل ۲-۳

حال اگر مبدأ محور مختصات، یعنی نقطه‌ی O را منطبق بر مکان جسم در حالت تعادل اختیار نماییم و سپس جسم را تا نقطه‌ی M به سمت راست بکشیم و سپس رها کنیم، جسم حول وضع تعادلش (نقطه‌ی O) با حرکت هماهنگ ساده شروع به نوسان می‌کند. در ضمن نوسان جسم، فاصله‌ی آن از مبدأ تغییر می‌کند، اما هیچ‌گاه فاصله‌ی آن از مبدأ بیش از OM یا ON نمی‌شود. این بیش‌ترین فاصله‌ی 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 (نقطه‌ی O) برگرداند، این نیرو، نیروی بازگرداننده نامیده می‌شود. نیروی

بازگرداننده‌ی فنر با تغییر طول فنر، متناسب است و از رابطه‌ی زیر که به قانون هوک معروف است، به دست می‌آید:

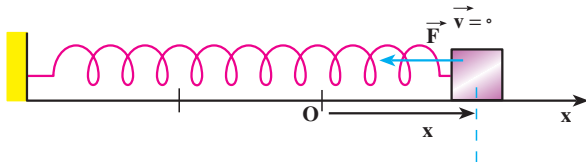
$$F = -kx \quad (2-3)$$

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

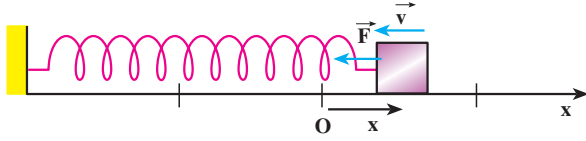
حال اثر نیروی بازگرداننده را در نوسانگر وزنه - فنر، در یک دوره، بررسی می‌کنیم. همان‌طور که در شکل ۳-۳ الف تا پ دیده می‌شود، اگر جسم را پس از خارج کردن از وضع تعادل رها کنیم، تحت اثر نیروی بازگرداننده به طرف وضع تعادل خود (نقطه‌ی O) برمی‌گردد و پس از رسیدن به نقطه‌ی O، به سبب داشتن انرژی جنبشی، به حرکتش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

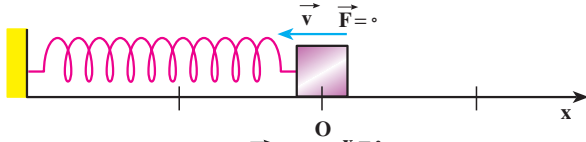
دیدیم در لحظه‌ای که فنر بیش‌ترین فشردگی را پیدا می‌کند سرعت نوسانگر به صفر می‌رسد. اکنون با توجه به شکل‌های ۳-۳ ج تا خ نیروی وارد بر نوسانگر و همچنین مکان، سرعت و شتاب نوسانگر را پس از لحظه‌ی مذکور بررسی کنید.



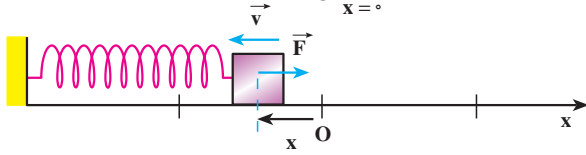
الف



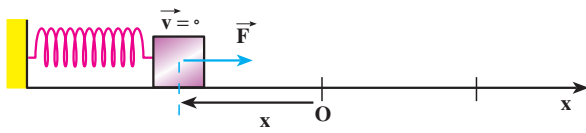
ب



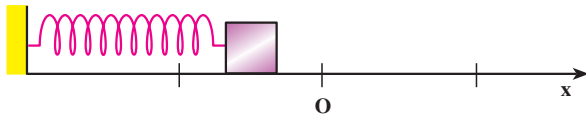
ج



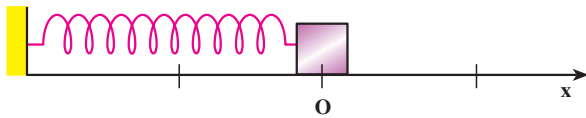
د



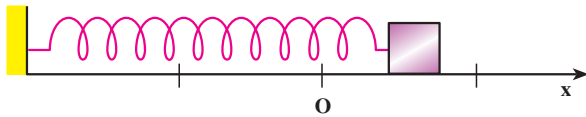
هـ



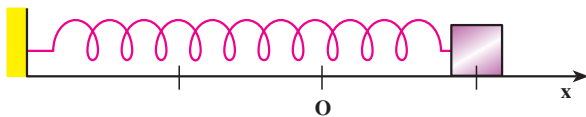
و



ز



ح

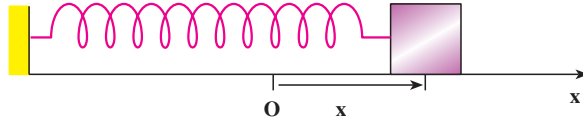


ط

شکل ۳-۳

۲-۳- معادله‌ی حرکت هماهنگ ساده

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



شکل ۳-۴

بنا به رابطه‌ی 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، معادله‌ی حرکت هماهنگ ساده باید به صورت زیر باشد:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (۴-۳)$$

اگر از رابطه‌ی ۳-۴ دو بار نسبت به زمان مشتق بگیریم خواهیم داشت:

$$\frac{dx}{dt} = A\omega \cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0)$$

با توجه به رابطه‌ی ۳-۴ می‌توان نوشت:

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

از مقایسه‌ی رابطه‌ی اخیر با رابطه‌ی ۳-۳ نتیجه‌ی زیر حاصل می‌شود.

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

ω را بسامد زاویه‌ای می‌نامیم. یکای بسامد زاویه‌ای رادیان بر ثانیه است. در رابطه‌ی ۳-۴، مکان متحرک در لحظه‌ی t و A دامنه نوسان است (چرا؟) هم‌چنین $(\omega t + \phi_0)$ فاز حرکت در لحظه‌ی t و ϕ_0 فاز حرکت در لحظه‌ی صفر یا فاز اولیه نامیده می‌شود؛ اگر در لحظه‌ی t_1 فاز حرکت:

$$\phi_1 = \omega t_1 + \phi_0$$

و در لحظه‌ی t_2 فاز حرکت

$$\phi_2 = \omega t_2 + \phi_0$$

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

$$\Delta\phi = (\omega t_2 + \phi_0) - (\omega t_1 + \phi_0) = \omega(t_2 - t_1)$$

یا

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

در رابطه‌ی ۳-۶ اگر $\Delta t = 1s$ باشد، $\Delta\phi = \omega$ می‌شود؛ یعنی، بسامد زاویه‌ای (ω) تغییر فاز در هر ثانیه است.

رابطه‌ی بسامد زاویه‌ای و دوره‌ی تناوب: چون دوره‌ی تناوب تابع سینوسی، 2π است باید در هر دوره (یعنی در زمان T) فاز به اندازه‌ی 2π تغییر کند. بنابراین، با توجه به رابطه‌ی ۳-۶ می‌توان 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 رابطه‌های ۳-۵ و ۳-۷ رابطه‌های زیر به دست می‌آید:

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

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

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

دستگاه، تغییر می‌کند. از طرف دیگر دوره و بسامد به دامنه و فاز اولیه 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

معادله‌ی حرکت نوسانگری در SI به صورت زیر است.

$$x = 0.05 \sin\left(6\pi t + \frac{\pi}{6}\right)$$

الف: دامنه، دوره، بسامد و فاز اولیه‌ی این حرکت چه مقدار است؟

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

پاسخ

الف: باتوجه به معادله‌ی ۳-۴ و رابطه‌ی ۳-۷ نتایج زیر حاصل می‌شود.

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

$$\frac{2\pi}{T} = 6\pi \Rightarrow T = \frac{1}{3} \text{ s} \quad \text{دوره:}$$

$$f = \frac{1}{T} = 3 \text{ Hz} \quad \text{بسامد:}$$

$$\varphi_0 = +\frac{\pi}{6} \quad \text{و فاز اولیه:}$$

$$x_0 = 0.05 \sin\left(6\pi \cdot 0 + \frac{\pi}{6}\right) = 0.05 \times \frac{1}{2} = 0.025 \text{ m} \quad \text{ب:}$$

$$x = 0.05 \sin\left(6\pi \cdot \frac{1}{36} + \frac{\pi}{6}\right) \Rightarrow x = 0.05 \sin \frac{\pi}{3} = 0.025\sqrt{3} \text{ m}$$

مثال ۲-۳

دامنه‌ی نوسان نوسانگر هماهنگ ساده‌ای ۲cm و بسامد آن ۲۰Hz است. اگر نوسانگر در لحظه‌ی $t=0$ در فاصله‌ی +۲ سانتی متری مبدأ باشد معادله‌ی حرکت آن را بنویسید.

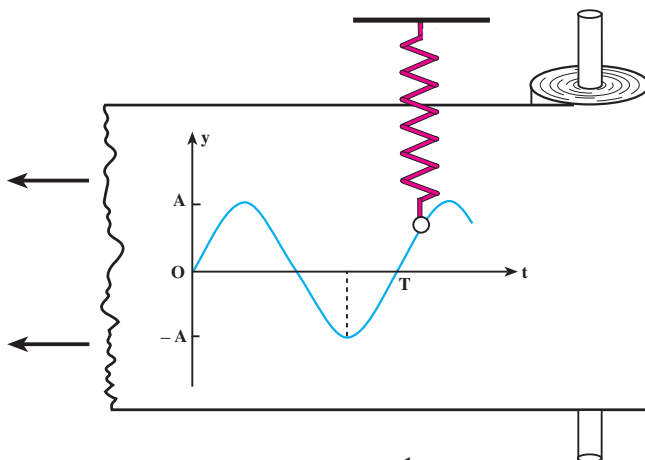
پاسخ $A = 0.02 \text{ m}$, $f = 2 \text{ Hz}$, $\omega = 2\pi f \Rightarrow \omega = 4\pi$,

$$x_0 = A \sin(\omega t_0 + \varphi_0)$$

$$\sin \varphi_0 = \frac{x_0}{A} = \frac{+2}{2} = 1 \Rightarrow \varphi_0 = \frac{\pi}{2}$$

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0) \Rightarrow x = 0.02 \sin(4\pi t + \frac{\pi}{2})$$

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 وزنه‌ی متصل به آن به‌وسیله‌ی 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 نشان‌دهنده‌ی 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 صفحه‌ی مختصات $x - t$ نمودار را رسم می‌کنیم. به مثال‌هایی در این باره توجه کنید:

مثال ۳-۳

دوره و دامنه‌ی نوسانگر هماهنگ ساده‌ای به ترتیب 0.2s و 6cm است. معادله‌ی حرکت این نوسانگر را هنگامی که فاز اولیه‌ی آن صفر است بنویسید و نمودار مکان - زمان آن را رسم کنید.

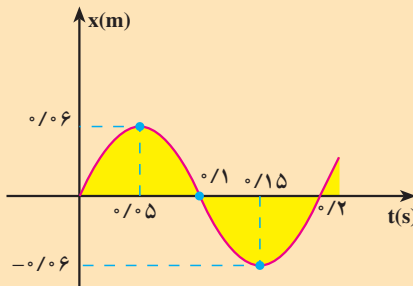
پاسخ

$$T = 0.2\text{s}, A = 0.06\text{m}, \omega = 10\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \varphi_0 = 0$$

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0) \rightarrow x = 0.06 \sin 10\pi t$$

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

می‌کنیم:



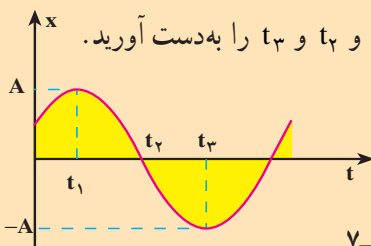
شکل ۳-۶

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

مثال ۳-۴

نمودار شکل ۳-۷ مربوط به حرکت هماهنگ ساده‌ای است که دوره‌ی آن 0.2s

ثانیه و فاز اولیه‌ی آن $\frac{\pi}{6}$ رادیان است. زمان‌های t_1 و t_2 و t_3 را به دست آورید.



شکل ۳-۷

پاسخ

$$\textcircled{a} \quad \frac{2\pi}{T} = 1 \cdot \pi \text{ rad/s}, \quad \varphi_0 = \frac{+\pi}{6} \Rightarrow x = A \sin(1 \cdot \pi t + \frac{\pi}{6})$$

با توجه به شکل ۳-۷ در لحظه‌ی t_1 مکان با دامنه برابر است؛ بنابراین:

$$+A = A \sin(1 \cdot \pi t_1 + \frac{\pi}{6}) \Rightarrow \sin(1 \cdot \pi t_1 + \frac{\pi}{6}) = 1$$

$$1 \cdot \pi t_1 + \frac{\pi}{6} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow 1 \cdot \pi t_1 = \frac{\pi}{3} \Rightarrow t_1 = \frac{1}{3} \text{ s}$$

در لحظه‌ی t_2 مکان صفر است؛ بنابراین:

$$0 = A \sin(1 \cdot \pi t_2 + \frac{\pi}{6})$$

$$(1 \cdot \pi t_2 + \frac{\pi}{6}) = 0 \quad \text{یا} \quad (1 \cdot \pi t_2 + \frac{\pi}{6}) = \pi$$

از تساوی $(1 \cdot \pi t_2 + \frac{\pi}{6}) = 0$ زمان t_2 منفی به دست می‌آید، در حالی که در

شکل t_2 مثبت است؛ بنابراین:

$$(1 \cdot \pi t_2 + \frac{\pi}{6}) = \pi \Rightarrow t_2 = \frac{1}{12} \text{ s}$$

مقدار t_2 را می‌توانیم از رابطه‌ی $t_2 = t_1 + \frac{T}{4}$ نیز به دست آوریم (چرا؟)

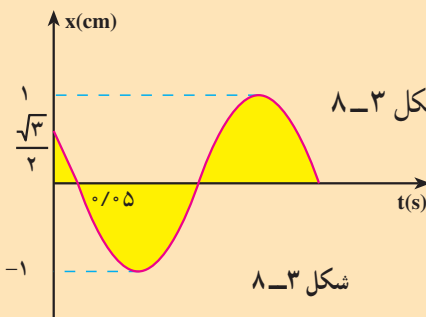
در لحظه‌ی t_3 مکان $-A$ است؛ بنابراین:

$$-A = A \sin(1 \cdot \pi t_3 + \frac{\pi}{6}) \Rightarrow \sin(1 \cdot \pi t_3 + \frac{\pi}{6}) = -1$$

$$1 \cdot \pi t_3 + \frac{\pi}{6} = \frac{3\pi}{2} \Rightarrow t_3 = \frac{2}{15} \text{ s}$$

مقدار t_3 را می‌توانستیم از رابطه‌ی $t_3 = t_1 + \frac{T}{2}$ نیز به دست آوریم.

مثال ۳-۵



نمودار مکان - زمان نوسانگری در شکل ۳-۸

رسم شده است. مطلوب است:

الف: فاز اولیه‌ی نوسانگر

ب: دوره‌ی حرکت

شکل ۳-۸

پاسخ

الف: با توجه به شکل معلوم می‌شود که $A = 1 \text{ cm}$ و در لحظه‌ی صفر

$$x_0 = \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ cm} \text{ است؛ بنابراین:}$$

$$\frac{\sqrt{3}}{2} = 1 \sin(\alpha_0 + \varphi_0) \Rightarrow \sin \varphi_0 = \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{3} \text{ rad یا } \varphi_0 = \frac{2\pi}{3} \text{ rad}$$

اگر $\varphi_0 = \frac{\pi}{3}$ باشد لازم است بعد از لحظه‌ی صفر، فاز حرکت از $\frac{\pi}{3}$ بیش‌تر

شود و به $\frac{\pi}{4}$ برسد؛ یعنی، سینوس آن باید افزایش یابد و به ۱ برسد، در حالی که نمودار

پس از لحظه‌ی صفر، کاهش x را نشان می‌دهد. پس جواب $\varphi_0 = \frac{\pi}{3} \text{ rad}$ قابل قبول

نیست. اگر $\varphi_0 = \frac{2\pi}{3} \text{ rad}$ اختیار شود همان‌طور که انتظار داریم با افزایش فاز، مقدار

آن به π می‌رسد و سینوس آن به صفر کاهش می‌یابد؛ بنابراین $\varphi_0 = \frac{2\pi}{3} \text{ rad}$ قابل قبول

است.

ب: معادله‌ی این حرکت در SI به صورت:

$$x = 1 \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \frac{2\pi}{3}\right)$$

است. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود در لحظه‌ی $t = 0.5 \text{ s}$ مکان متحرک

صفر است؛ بنابراین:

$$0 = 1 \sin\left(\frac{2\pi}{T} \times 0.5 + \frac{2\pi}{3}\right) \Rightarrow \frac{\pi}{T} + \frac{2\pi}{3} = n\pi$$

چون در لحظه‌ی $t = 0.5 \text{ s}$ برای اولین بار $x = 0$ شده است؛ بنابراین به ازای

$n = 1$ خواهیم داشت:

$$\frac{\pi}{T} + \frac{2\pi}{3} = \pi \Rightarrow T = 3 \text{ s}$$

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

الف - معادله‌ی سرعت: با توجه به این که سرعت، مشتق مکان نسبت به زمان است با

مشتق‌گیری از رابطه‌ی ۳-۴ خواهیم داشت:

$$v = \frac{dx}{dt} \Rightarrow v = A\omega \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (10-3)$$

معادله‌ی ۳-۱۰ نشان می‌دهد که سرعت به ازای $\cos(\omega t + \varphi_0) = \pm 1$ بیشینه می‌شود؛ پس

داریم:

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

در لحظه‌ای که $\cos(\omega t + \varphi_0) = \pm 1$ است، $\sin(\omega t + \varphi_0) = 0$ و در نتیجه $x = 0$ ؛ یعنی،

سرعت بیشینه مربوط به لحظه‌ای است که نوسانگر در حال گذر از وضع تعادل است.

تمرین ۳-۱

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

ب: به کمک رابطه‌ی اخیر معلوم کنید که در چه مکانی سرعت نوسانگر صفر و

یا بیشینه است؟

ب - معادله‌ی شتاب: می‌دانیم که شتاب مشتق سرعت نسبت به زمان، یا مشتق دوم مکان

نسبت به زمان است؛ در نتیجه با استفاده از رابطه‌ی ۳-۴ یا ۳-۱۰ داریم:

$$a = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (12-3)$$

معادله‌ی ۳-۱۲ نشان می‌دهد که در حرکت هماهنگ ساده، شتاب نیز به‌طور دوره‌ای تغییر

می‌کند و بیشینه‌ی آن از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

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

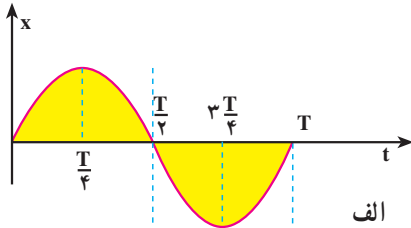
با استفاده از رابطه‌ی ۳-۴ می‌توان رابطه‌ی ۳-۱۲ را به‌صورت زیر نوشت:

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

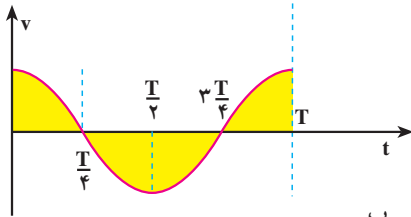
که رابطه‌ی شتاب را با مکان نوسانگر به‌دست می‌دهد. این رابطه هم‌چنین نشان می‌دهد که بردار شتاب

در خلاف جهت بردار مکان است.

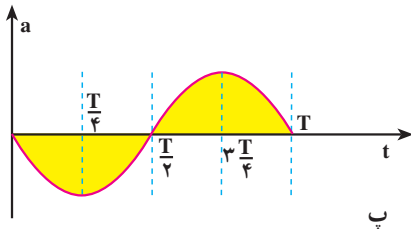
در شکل‌های ۳-۹ الف-ب و پ، به ترتیب، نمودارهای مکان-زمان و سرعت-زمان و شتاب-زمان برای حرکت هماهنگ ساده‌ای که معادله‌ی آن به صورت $x = A \sin \omega t$ است نشان داده شده است.



الف



ب



پ

شکل ۳-۹

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

مثال ۳-۶

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

الف: بیشینه‌ی 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

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

الف:

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

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

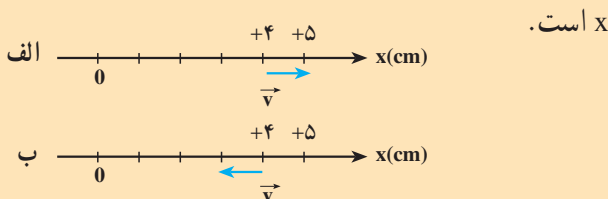
ب: در تمرین ۱-۳ دیدیم که $v = \pm \sqrt{A^2 - x^2}$ ، بنابراین

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

علامت (\pm) نشان دهنده‌ی 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 لحظه‌ای 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 شکل‌های 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 می‌شود در مکان $x = +4 \text{ cm}$ شتاب منفی و در خلاف جهت محور



شکل ۱-۳

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

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

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

با جای‌گذاری x از معادله‌ی ۴-۳ خواهیم داشت:

$$U_e = \frac{1}{2} kA^2 \sin^2(\omega t + \phi_0) \quad (15-3)$$

با استفاده از رابطه ی ۳-۵ می توان نوشت :

$$U_e = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \phi_0) \quad (۱۶-۳)$$

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

$$K = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cos^2(\omega t + \phi_0) \quad (۱۷-۳)$$

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

$$E = U_e + K = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \phi_0) + \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cos^2(\omega t + \phi_0)$$

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 [\sin^2(\omega t + \phi_0) + \cos^2(\omega t + \phi_0)]$$

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

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 ی x از مبدأ قرار دارد، بخشی از انرژی آن به صورت پتانسیل و بقیه به صورت جنبشی است. اما رابطه ی 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 ی دیگری نیز، انرژی مکانیکی با مربع دامنه و مربع بسامد متناسب است.

تمرین ۳-۲

الف: رابطه ی انرژی جنبشی نوسانگر ساده را برحسب مکان نوسانگر (x) به دست آورید و با استفاده از آن و هم چنین رابطه ی 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 ۳-۳

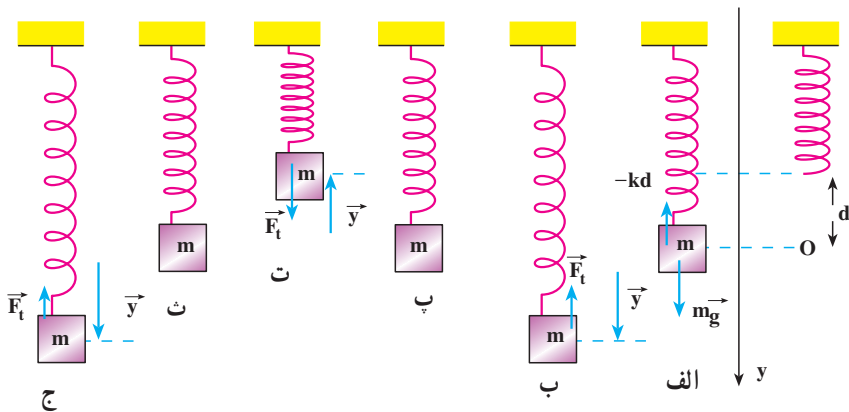
نمودار تغییرات U_e و K و E را نسبت به مکان برای یک دوره‌ی نوسانگر ساده رسم کنید.

۳-۵- فنر در راستای قائم

حرکت هماهنگ ساده‌ی وزنه- فنر در راستای قائم در شکل‌های ۳-۱۱- الف تا ج نشان داده شده است. در شکل الف وزنه‌ای به جرم m از فنر آویخته شده است و دستگاه وزنه- فنر در حالت تعادل است. چنان که می‌بینید طول فنر بر اثر نیروی وزن mg به اندازه‌ی d افزایش یافته است. در واقع، به جسم دو نیروی mg (وزن جسم) روبه پایین، و $|\vec{F}| = kd$ از طرف فنر، رو به بالا وارد می‌شود. بنا به قانون دوم نیوتون و با توجه به این که جهت محور y رو به پایین انتخاب شده است می‌توان نوشت:

$$mg - kd = 0$$

$$d = \frac{mg}{k}$$



شکل ۳-۱۱

حال اگر وزنه را مطابق شکل ب قدری پایین کشیده و رها کنیم، در لحظه‌ای که فاصله‌ی وزنه از O برابر y باشد، برابند نیروهای وارد بر وزنه برابر است با:

$$F_t = mg - k(y + d)$$

با جایگذاری مقدار d در این رابطه داریم :

$$F_t = mg - k\left(y + \frac{mg}{k}\right) = -ky$$

بنابراین در این حالت نیز برابری نیروهای وارد به وزنه متناسب با فاصله‌ی آن از نقطه‌ی تعادل است که مبدأ (نقطه‌ی O) اختیار شده است و جهت آن خلاف جهت بردار مکان است. در نتیجه مکان وزنه‌ی آویخته را نیز می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۳-۴ به دست آورد. روابط دیگری را نیز که در حالت نوسان افقی وزنه - فنر به دست آمد می‌توان برای نوسان وزنه - فنر قائم به کار برد.

فعالیت ۲-۳

فنر سبکی انتخاب کنید و با آویختن یک وزنه به آن ثابت نیروی فنر را اندازه‌گیری کنید. سپس با خارج کردن وزنه از وضع تعادل آن را به نوسان درآورید. دوره‌ی نوسان را یک بار با شمارش تعداد نوسان‌ها در یک زمان معین و بار دیگر با استفاده از رابطه‌ی

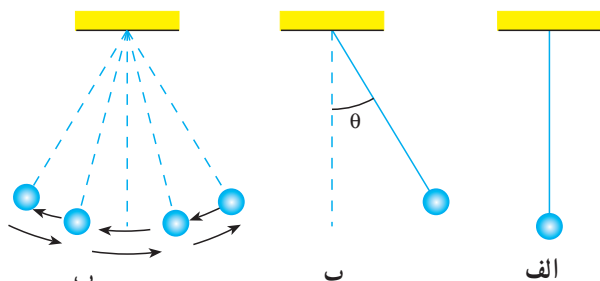
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

گروه و نتیجه‌ی آن را به کلاس گزارش کنید.

۳-۶- آونگ ساده

آونگ ساده وزنه‌ی 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 ۳-۱۲-الف).

اگر وزنه را پس از خارج کردن آونگ از وضع تعادل رها کنیم (شکل ۳-۱۲-ب) حول وضع تعادلش نوسان می‌کند (شکل ۳-۱۲-پ). در نوسان آونگ، نیروی بازگرداننده، مؤلفه‌ی نیروی وزن جسم در راستای مماس بر مسیر است.

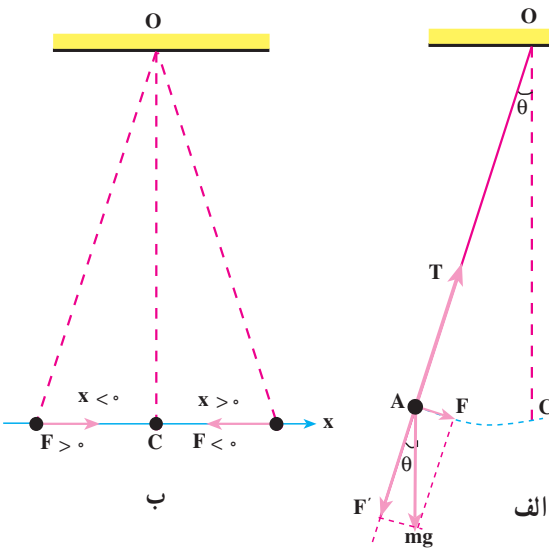


شکل ۳-۱۲

اگر زاویه‌ی انحراف اولیه از وضع قائم (θ) به اندازه‌ی کافی کوچک باشد، مسیر حرکت وزنه تقریباً یک پاره‌خط افقی است (شکل ۳-۱۳-ب). در این صورت، وزنه مانند وزنه‌ی متصل به فنر یک حرکت هماهنگ ساده با دامنه‌ی کم (حرکت نوسانی کم دامنه) انجام می‌دهد.

محاسبه‌ی دوره‌ی آونگ ساده‌ی کم دامنه: در آونگ ساده اگر اصطکاک قابل چشم‌پوشی

و جرم نخ ناچیز باشد، بر وزنه‌ی آونگ نیروی وزن ($m\vec{g}$) و نیروی کشش نخ (\vec{T}) وارد می‌شود. همان‌طور که شکل ۳-۱۳-الف نشان می‌دهد نیروی کشش نخ در امتداد نخ است و در هر لحظه بر



شکل ۳-۱۳

مسیر حرکت وزنه عمود است. بنابراین، در راستای مماس بر مسیر، مؤلفه ندارد. مؤلفه‌ی نیروی وزن در امتداد مماس بر مسیر $F = mg \sin \theta$ و در امتداد عمود بر مسیر $F' = mg \cos \theta$ است. مؤلفه‌ی مماس بر مسیر که نیروی بازگرداننده است می‌خواهد آونگ را به وضع تعادل برگرداند.

دیدیم که اگر زاویه‌ی 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، $\sin \theta \approx \theta$ است و می‌توان نوشت:

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

همان‌گونه که در شکل ۳-۱۳-ب دیده می‌شود مؤلفه‌ی نیروی وزن جسم در راستای مماس بر مسیر و همواره در خلاف جهت بردار مکان است. بنابراین:

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

همان‌طور که می‌بینید، نیروی بازگرداننده از قانون هوک (رابطه‌ی ۳-۲) پیروی می‌کند و حرکت آونگ ساده‌ی 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 رابطه‌ی 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 ۳-۷

اندازه‌ی دوره و بسامد حرکت نوسانی کم‌دامنه‌ی یک آونگ ساده به طول ۴۰ cm چقدر است؟ ($g = ۱۰ \text{ m/s}^2$).

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

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{۰/۴}{۱۰}} = 2\pi \times \frac{۲}{۱۰} \approx ۱/۲۵ \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} = ۰/۸ \text{ Hz}$$

مثال ۳-۸

طول آونگ ساده‌ی کم‌دامنه باید چند سانتی‌متر باشد تا بتواند در هر دقیقه ۳۰ نوسان انجام دهد؟ ($g = ۹/۸ \text{ m/s}^2$ و $\pi^2 = ۱۰$).

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

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

$$۴ = 4 \times ۱۰ \times \frac{l}{۹/۸}$$

$$l = ۰/۹۸ \text{ m} = ۹۸ \text{ cm}$$

فعالیت ۳-۳

- ۱- به کمک یک گلوله و قطعه نخی به طول 40 cm آونگ ساده‌ای بسازید و دوره‌ی آن را به ترتیب با زاویه‌های انحراف 4° ، 6° و 20° درجه اندازه بگیرید.
 - ۲- گلوله‌ی آونگی را که ساخته‌اید به ترتیب، با چند گلوله‌ی دیگر تعویض کنید. سپس دوره‌ی هر یک را با زاویه‌ی انحراف 6° درجه اندازه بگیرید.
 - ۳- طول آونگ‌هایی را که ساخته‌اید تغییر دهید و دوره‌ی نوسان آن‌ها را با زاویه‌ی انحراف 6° درجه اندازه بگیرید.
- نتیجه‌ی فعالیت گروه را در کلاس به بحث بگذارید.

فعالیت ۴-۳

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

۳-۷- تشدید

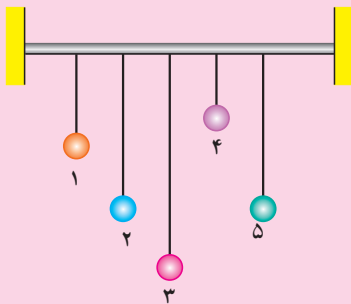
در بخش‌های قبل دیدیم که وقتی یک نوسانگر ساده نظیر آونگ و یا دستگاه وزنه - فنر را از وضع تعادل منحرف می‌کنیم و آن را برای نوسان آزاد می‌گذاریم، دستگاه حول وضع تعادل خود شروع به نوسان می‌کند. این حرکت نوسانی، نوسان طبیعی یا آزاد دستگاه نامیده می‌شود. بسامد (یا دوره‌ی) نوسان طبیعی از ویژگی‌های ساختاری نوسانگر است؛ مثلاً، بسامد آونگ ساده‌ی کم دامنه به طول آونگ (1) بستگی دارد؛ یعنی، اگر با دادن انرژی به یک آونگ دامنه‌ی نوسان آن را افزایش دهیم (به طوری که زاویه‌ی 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، دامنه‌ی 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 دوره‌ی وارد کردن نیرو با دوره‌ی نوسان تاب برابر است. با اعمال این نیرو دامنه‌ی نوسان افزایش می‌یابد و به یک مقدار بیشینه می‌رسد و از این پس حرکت نوسانی بدون کاهش دامنه ادامه می‌یابد. در این حالت نیروی اعمال شده اثر نیروهای اتلافی را خنثی می‌کند.

فعالیت ۳-۵

مطابق شکل ۳-۱۴ به یک میله‌ی افقی آونگ‌های ساده‌ای با طول‌های متفاوت



شکل ۳-۱۴

ولی جرم یکسان بیاویزید، به طوری که طول آونگ‌های شماره‌ی ۲ و ۵ با یکدیگر برابر باشد. اکنون آونگ شماره‌ی 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 نتیجه‌ی کار گروه را به کلاس گزارش دهید.

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

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

پدیده‌ی تشدید ممکن است مفید و یا برعکس مشکل‌زا باشد؛ مثلاً، در ساعت کوکی این پدیده مفید است. فنر کوک شده یک نیروی دوره‌ای بر رقاصک ساعت اعمال می‌کند که بسامد آن با بسامد نوسان رقاصک برابر است و در نتیجه تشدید رخ می‌دهد و باعث می‌شود که حرکت نوسانی رقاصک ادامه یابد. پدیده‌ی تشدید ممکن است اثر مخرب نیز داشته باشد و باعث تخریب ساختمان‌ها و تأسیسات شود؛ به‌عنوان مثال، پل تاکومانروز در سال ۱۹۴۰ به علت نزدیک بودن بسامدهای وزش باد با بسامد طبیعی پل در اثر تشدید تخریب شد. شکل ۱۵-۳ مراحل مختلف به نوسان درآمدن پل و تخریب آن را نشان می‌دهد.



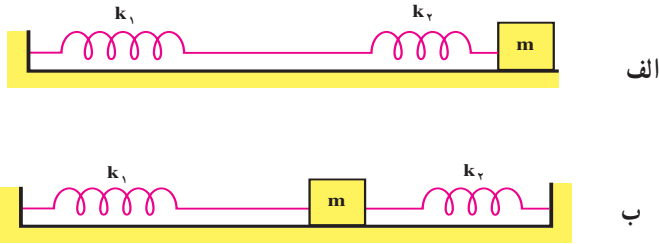
شکل ۱۵-۳

تمرین های فصل سوم

- ۱- توضیح دهید در حرکت هماهنگ ساده‌ی وزنه - فنر، اگر دامنه‌ی نوسان دو برابر شود، چه تغییری در دوره، بیشینه‌ی 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 درباره‌ی نتیجه‌ی 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 بیشینه‌ی سرعت نوسانگر وزنه - فنری دو برابر شود، انرژی کل آن چند برابر می‌شود؟
- ۵- در لحظه‌ای که انرژی جنبشی یک نوسانگر وزنه - فنر 3 برابر انرژی پتانسیل آن است مکان نوسانگر چند برابر دامنه‌ی نوسان آن است؟ سرعت و شتاب نوسانگر در این لحظه به ترتیب، چند برابر بیشینه‌ی سرعت و بیشینه‌ی شتاب نوسانگر است؟
- ۶- دامنه‌ی نوسان یک حرکت هماهنگ ساده $3 \times 10^{-2} \text{ m}$ و بسامد آن 5 هرتز است. معادله‌ی این حرکت را در دو حالت زیر بنویسید و در هر یک از دو حالت نمودار مکان - زمان را در یک دوره رسم کنید. (مسئله را برای هر دو جهت حرکت حل کنید.)
- الف: در لحظه‌ی صفر نوسانگر در مبدأ قرار دارد.
- ب: در لحظه‌ی صفر مکان نوسانگر $3 \times 10^{-2} \text{ m}$ است.
- ۷- وزنه‌ای به جرم m به دو فنر با ضریب ثابت k_1 و k_2 به دو روش مختلف که در شکل های ۱۶-۳ الف و ب نشان داده شده است بسته شده و روی سطح افقی دارای حرکت هماهنگ ساده است. نشان دهید که اگر از اصطکاک چشم‌پوشی کنیم دوره‌ی نوسان‌های وزنه - فنر از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$T = 2\pi \sqrt{m \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right)} \quad \text{الف:}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_1 + k_2}} \quad \text{ب:}$$



شکل ۳-۱۶

۸- وزنه‌ای را به انتهای فنر سبکی می‌آویزیم، طول فنر به اندازه‌ی d زیاد می‌شود. نشان دهید که اگر وزنه را از وضع تعادل خارج و رها کنیم دوره‌ی نوسان آن از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

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

۹- وزنه‌ای به جرم 40 g به فنر سبکی آویخته شده است. اگر وزنه را به اندازه‌ی 3 cm از وضع تعادل خارج و رها کنیم با دوره‌ی $T = 0.628 \text{ s}$ به نوسان درمی‌آید. ($g = 10 \text{ m/s}^2$)
الف: ثابت فنر، اندازه و جهت سرعت نوسانگر را وقتی وزنه در $1/5$ سانتی متری بالای وضع تعادل قرار دارد و سرعت آن، رو به افزایش است تعیین کنید.

ب: انرژی پتانسیل کشسانی فنر را در حالت الف به دست آورید.

۱۰- فنر سبکی در امتداد قائم آویزان است. وزنه‌ای را به انتهای فنر می‌بندیم و آن را طوری نگه می‌داریم که طول فنر تغییر نکند. اگر در این حال، وزنه را رها کنیم تا 20 سانتی متر پایین رفته و برمی‌گردد و با حرکت هماهنگ ساده به نوسان ادامه می‌دهد. دامنه، دوره و سرعت آن را هنگام عبور از وضع تعادل محاسبه کنید.

۱۱- معادله‌ی حرکت هماهنگ ساده‌ای را بنویسید که دامنه‌ی آن 4 cm و دوره‌ی آن 0.4 s و در لحظه‌ی صفر در $x = +2 \text{ cm}$ قرار دارد و سرعت آن منفی است. نمودار مکان - زمان این حرکت را در یک دوره رسم کنید.

۱۲- معادله‌ی نیروی وارد بر یک نوسانگر (وزنه - فنر) به جرم 0.5 kg که در امتداد قائم با دامنه‌ی A نوسان می‌کند در SI به صورت $F = -200y$ است. سرعت این نوسانگر هنگام عبور از وضع تعادل 10 m/s است. در لحظه‌ی صفر $y = \frac{-\sqrt{2}}{4} A$ و سرعت آن در جهت مثبت است. شتاب

حرکت را در لحظه‌ی $t = \frac{T}{4} \text{ s}$ حساب کنید (T دوره‌ی حرکت است).

۱۳- معادله‌ی حرکت هماهنگ ساده‌ی یک نوسانگر در SI به صورت

$$x = 0.05 \sin\left(20\pi t + \frac{2\pi}{3}\right) \text{ است.}$$

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

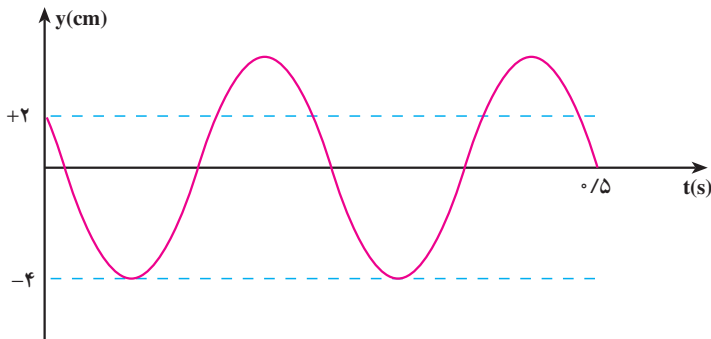
ب: در چه فاصله‌ای از مبدأ انرژی جنبشی نوسانگر برابر با انرژی پتانسیل آن خواهد شد؟

۱۴- نمودار مکان- زمان نوسانگر مطابق شکل ۳-۱۷ است:

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

ب: چه زمانی پس از لحظه‌ی صفر، برای اولین بار به ترتیب، سرعت و شتاب آن بیشینه

می‌شود؟



شکل ۳-۱۷

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

اگر دامنه‌ی نوسان آن‌ها 5° میلی‌متر و بسامد آن 11° هرتز باشد، کمیت‌های زیر را به دست آورید.

الف: بیشینه‌ی سرعت پیستون‌ها

ب: بیشینه‌ی شتاب نوسان آن‌ها



موج‌های مکانیکی (۱)



توماس یانگ
(۱۸۲۹-۱۷۷۳م)

موج های مکانیکی (۱)

نگاهی به فصل: مبحث موج یکی از مباحث های مهم فیزیک است. بیش ترین اطلاعاتی که از جهان اطرافمان دریافت می کنیم، از طریق انتشار موج ها صورت می گیرد.

برخی از موج ها برای انتشار به محیط مادی نیاز دارند؛ این گونه موج ها را موج های مکانیکی می نامند. تشکیل موج بر سطح آب را کد، در اثر وزش باد یا هر عامل دیگری که باعث برهم زدن تعادل آب شود، نمونه ای آشنا از موج های مکانیکی است. انتقال صوت از منبع به شنونده، با موج های صوتی که در هوا منتشر می شوند، صورت می گیرد. موج صوتی نیز نوعی موج مکانیکی است که در فصل اول فیزیک ۲ با ویژگی های آن بیشتر آشنا می شوید.

نوع دیگری از موج ها که می توانند در محیط های غیر مادی (خلأ) نیز منتشر شوند، موج های الکترومغناطیسی نامیده می شوند؛ برای مثال، هم اکنون که در حال خواندن این نوشته ها هستید، اطلاعات را به صورت نوری که از صفحه ی کتاب باز می تابد دریافت می کنید. نور نوعی موج الکترومغناطیسی است. در فصل دوم فیزیک ۲ با ماهیت و ویژگی های این گونه موج ها آشنا می شوید. هر چند ماهیت موج های مکانیکی و الکترومغناطیسی با یک دیگر تفاوت دارند، اما رفتار و ویژگی های آن ها از جهت های زیادی، مشابه یک دیگر است؛ برای مثال، هر دو در حین انتشار می توانند انرژی را از نقطه ای به نقطه ی 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 ی مجاور فنر نیروی کشسانی به وجود می آید که می خواهد فنر را به حالت اولیه برگرداند. به فنر یا هر محیط دیگری که مانند فنر عمل می کند محیط کشسان گفته می شود. 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 تیغ‌ی فبری 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 پیستون را به درون آن فرو ببریم و رها کنیم، پیستون به حالت اول برمی‌گردد. در همه‌ی این مثال‌ها، تیغ‌ی فبری، آب و هوای درون سُرنگ محیط‌هایی کشسان هستند.

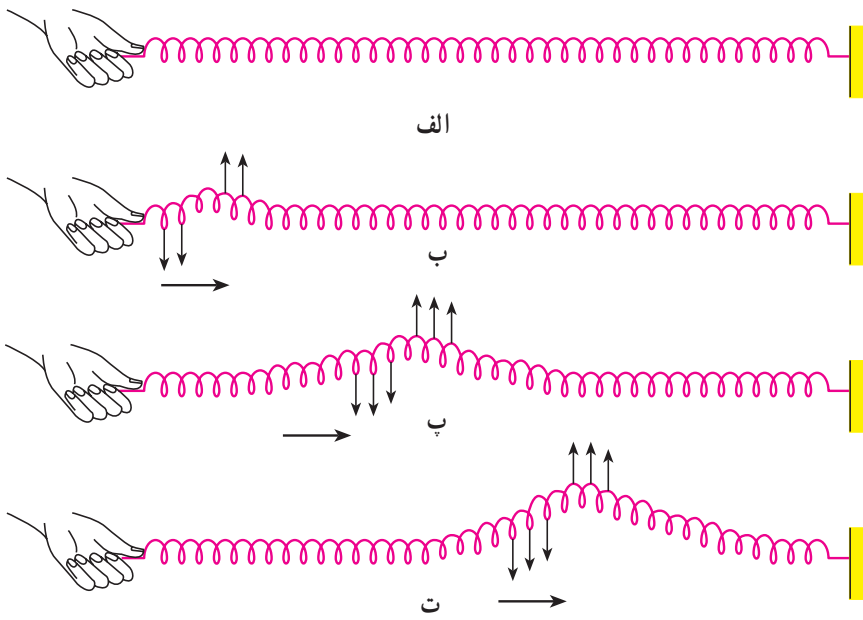
فعالیت ۱-۴

طنابی را مطابق شکل ۱-۴، کشیده و بین دو نقطه‌ی A و B محکم کنید. اکنون با دست جزئی از طناب را پایین بکشید و رها کنید. به این ترتیب تغییر شکلی در آن ایجاد می‌کنید. رفتار بعدی طناب را مشاهده و نتیجه‌ی 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 فبری 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 حلقه‌ی 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. نتیجه‌ی مشاهده‌ی 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. چشمه‌ی موج سینوسی، نوسانگری است که

می‌تواند، با بسامد (یا دوره) و دامنه‌ی ثابتی، حرکت هماهنگ ساده انجام دهد. دیپازون یکی از وسیله‌هایی است که به‌عنوان چشمه‌ی موج در آزمایش‌ها به‌کار برده می‌شود.

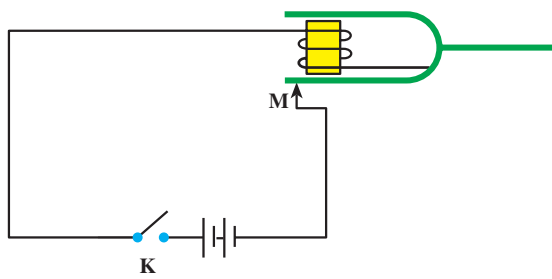
مطالعه‌ی آزاد



شکل ۳-۴

نوسان دیپازون با دامنه‌ی ثابت
 دیپازون، دو شاخه‌ای مانند شکل ۳-۴ است که اگر به یکی از شاخه‌های آن 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 آن که نوسان‌های دیپازون ادامه یابد، می‌توان آن را در مدار الکتریکی مانند شکل ۴-۴

قرار داد. در این مدار، توسط آهنربای الکتریکی، نیروی مغناطیسی‌ای به‌طور دوره‌ای، بر شاخه‌های دیپازون (که خود از ماده‌ی 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 نقطه‌ی M، شاخه‌ی دیپازون از مدار جدا شده و جریان الکتریکی نیز قطع می‌شود. با قطع جریان، خاصیت مغناطیسی

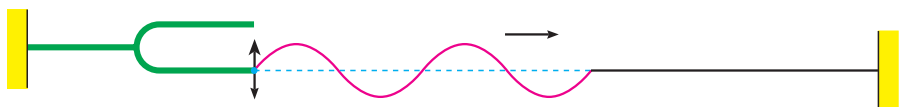


شکل ۴-۴

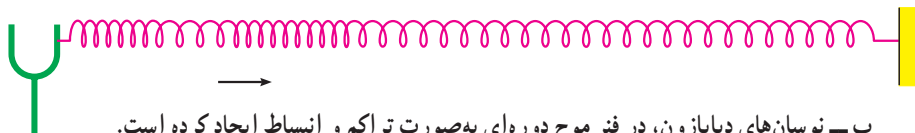
از بین می‌رود و شاخه‌های دیپازون به‌جای اول برمی‌گردند و دوباره اتصال برقرار می‌شود و این عمل ادامه می‌یابد. به این ترتیب، نوسان‌های دیپازون پایدار می‌ماند.

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

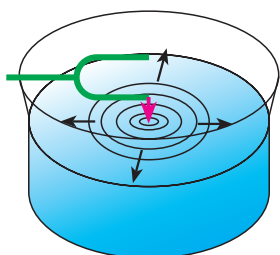
می‌دهد.



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

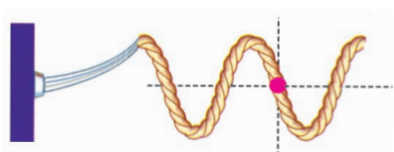


ب - نوسان‌های دیپازون، در فتر موج دوره‌ای به صورت تراکم و انبساط ایجاد کرده است.



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

شکل ۴-۵



الف

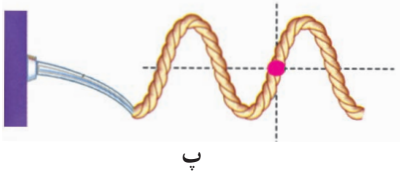
موج‌های ایجاد شده در طناب، فتر و سطح آب، نمونه‌هایی از موج‌های مکانیکی اند. این موج‌ها در محیط‌های مادی کشسان تولید و منتشر می‌شوند.



ب

بسامد موج: وقتی یک چشمه‌ی موج با

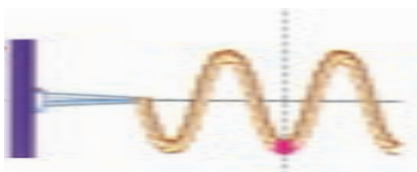
بسامد ۷ در محیطی کشسان شروع به نوسان می‌کند، ذره‌های مجاور خود را نیز با همان بسامد به نوسان وامی‌دارد. به همین ترتیب، همه‌ی ذره‌های محیط با همان بسامد چشمه‌ی موج به نوسان درمی‌آیند.



پ

شکل ۴-۶ - الف تا ت چگونگی نوسان یک

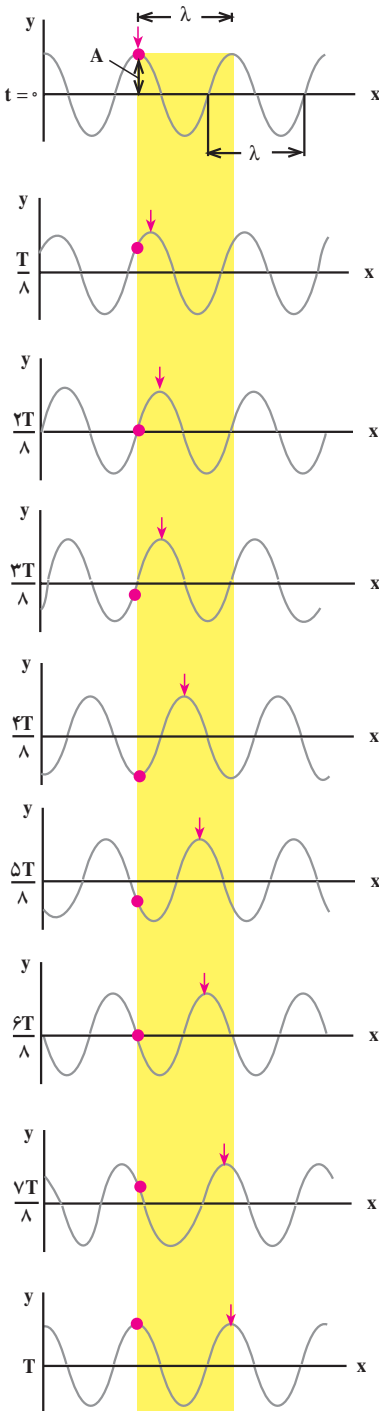
ذره‌ی محیط را که با رنگ قرمز مشخص شده است، ضمن انتشار موج نشان می‌دهد.



ت

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

انتشار موج: شکل ۴-۷ حالت‌های مختلف طنابی را نشان می‌دهد که در آن موجی سینوسی



شکل ۴-۷- انتشار موج در طناب

منتشر می‌شود. در این شکل‌ها، یک قلّه‌ی موج را با پیکان مشخص کرده‌ایم. در حالت‌های مختلف شکل مشاهده می‌شود که پیکان در جهت محور x جابه‌جا می‌شود که نشان دهنده‌ی پیشروی موج در طول طناب است. این شکل‌ها، وضعیت نقطه‌های مختلف طناب را در بازه‌های زمانی $\frac{T}{8}$ نشان می‌دهد. اگر در یک لحظه‌ی معین یکی از نقطه‌های طناب در قلّه‌ی موج باشد و پس از t ثانیه نقطه‌ی دیگری که به فاصله‌ی x از آن واقع است به همان وضعیت برسد، سرعت پیشروی موج که آن را سرعت انتشار می‌نامیم برابر است با:

$$v = \frac{x}{t} \quad (۴-۱)$$

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

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

برای سادگی، $\frac{m}{L}$ (که جرم واحد طول است) را

با μ نشان می‌دهیم.

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

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

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

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

مثال ۴-۱

ریسمانی به طول یک متر و جرم 100 g بین دو نقطه محکم کشیده شده است. اگر نیروی کشش ریسمان برابر 40 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 رابطه‌ی ۴-۲ ب سرعت انتشار را به دست می‌آوریم:

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

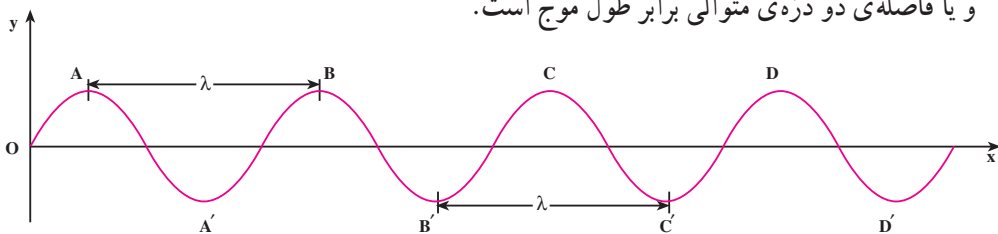
$$v = \sqrt{\frac{40}{0.1}} = 20 \text{ m/s}$$

فعالیت ۴-۳

در فعالیت ۴-۱، مشاهده‌ی انتقال تپ به دلیل آن‌که سرعت انتشار آن در طناب زیاد است، مشکل است. چه راه‌هایی پیشنهاد می‌کنید تا بتوان با کاهش سرعت انتشار، انتقال تپ را مشاهده کرد؟ پیشنهادهای خود را در کلاس به بحث بگذارید.

طول موج: به حالت‌های مختلف شکل ۴-۷ توجه کنید. در مدتی که یک نقطه‌ی محیط (مثلاً نقطه‌ی واقع در قلّه‌ی موج) یک نوسان انجام می‌دهد؛ یعنی، در مدت یک دوره T، قلّه‌ی موج که با علامت پیکان مشخص شده است، به اندازه‌ی پهنای نوار زرد رنگ پیش می‌رود اندازه‌ی این پیشروی را **طول موج** می‌نامیم و آن را با λ نشان می‌دهیم. اگر به هر نقطه‌ی دیگر موج، مثلاً درّه‌ی موج هم توجه کنید، می‌بینید که در مدت یک دوره به اندازه‌ی طول موج منتقل می‌شود. بنابراین، طول موج را می‌توان به صورت مسافتی که موج در مدت یک دوره می‌پیماید، تعریف کرد.

در شکل ۴-۸ که انتشار موج را در یک طناب نشان می‌دهد، فاصله‌ی دو قلّه‌ی متوالی موج و یا فاصله‌ی دو درّه‌ی متوالی برابر طول موج است.



شکل ۴-۸

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

اگر فاصله‌ی دو نقطه‌ی هم‌فاز را با Δx نشان دهیم داریم:

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

اکنون به دو نقطه‌ی متوالی طناب در شکل ۴-۸ که یکی در قلّه‌ی موج (نقطه‌ی A) و دیگری در درّه‌ی موج (نقطه‌ی A') قرار دارد توجه کنید. اگر حرکت این دو نقطه را دنبال کنید، متوجه خواهید شد که حرکت آن‌ها همواره در جهت‌های مخالف یک‌دیگر است. چنین دو نقطه‌ای را در فاز مخالف می‌نامیم. فاصله‌ی این دو نقطه از یک‌دیگر در راستای انتشار، برابر نصف طول موج

است. به همین ترتیب، نقطه‌های دیگری نیز می‌توان مشخص کرد که با یک‌دیگر در فاز مخالف‌اند. فاصله‌ی این نقطه‌ها از یک‌دیگر مضرب فردی از نصف طول موج است. بنابراین: نقطه‌هایی از محیط که فاصله‌ی آن‌ها از یک‌دیگر مضرب فردی از نصف طول موج باشد، در فاز مخالف‌اند. برای این نقطه‌ها داریم:

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

پرسش ۱-۴

روی شکل ۸-۴ نقطه‌هایی را که هم‌فازند و نقطه‌هایی را که در فاز مخالف‌اند پیدا کنید.

رابطه‌ی طول موج با سرعت و بسامد: اگر زمان انتشار برابر یک دوره، یعنی $t = T$ باشد، مسافتی که موج در این مدت می‌پیماید، برابر طول موج می‌شود؛ یعنی $x = \lambda$ است. با توجه به تعریف طول موج و رابطه‌ی 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 دیافازونی 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 رابطه‌ی ۲-۴ داریم:

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

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

طول موج را از رابطه‌ی ۴-۶ محاسبه می‌کنیم:

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

$$\lambda = \frac{۲۰}{۱۰۰} = ۰/۲ \text{ m}$$

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

$$f_1 = f_2 = ۱۰۰ \text{ Hz}$$

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

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

$$\frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{۶}{۱۲}} = \frac{\sqrt{۲}}{۲}$$

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

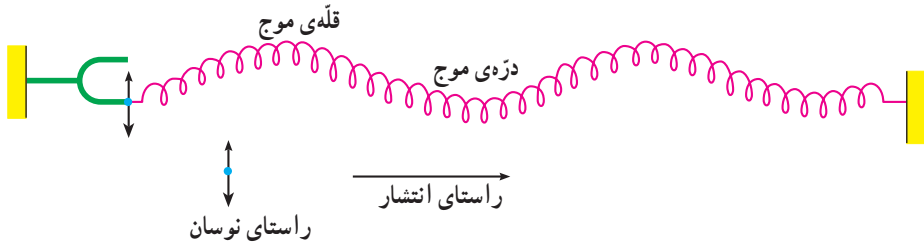
$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\sqrt{۲}}{۲}$$

$$\lambda_2 = ۰/۲ \frac{\sqrt{۲}}{۲} \approx ۰/۱۴ \text{ m}$$

۴-۲- موج‌های عرضی — موج‌های طولی

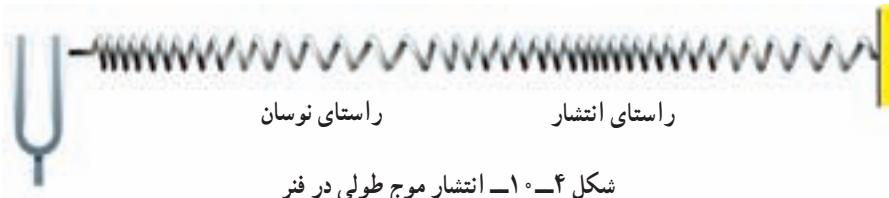
گفتیم وقتی یک چشمه‌ی موج با بسامد f در محیطی کشسان نوسان می‌کند ذره‌های مجاور خود را نیز با همان بسامد به نوسان درمی‌آورد و بدین ترتیب، همه‌ی ذرات محیط به نوسان درمی‌آیند. راستای نوسان این ذره‌ها، ممکن است عمود بر راستای انتشار موج و یا موازی با آن باشد.

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 ۹-۴ عرضی‌اند. موج عرضی در فنر و یا در طناب با قلّه‌ها و درّه‌ها قابل تشخیص است.



شکل ۹-۴- 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 ۱۰-۴ وقتی دیاپازون 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 ۱۰-۴- 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 بی‌در پی می‌توان تشخیص داد. در فنر می‌توان هر دو نوع موج عرضی و طولی را ایجاد کرد.

۳-۴- 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 تپ در یک لحظه (مثلاً در $t=0$) و در نقطه‌ی A به صورت شکل ۱۱-۴ الف باشد، بعد از Δt ثانیه (در لحظه‌ی t) این تپ به نقطه‌ی B

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



شکل ۱۱-۴

اکنون فرض کنید چشمه‌ی موجی با دوره‌ی T (بسامد f) و دامنه‌ی A حرکت هماهنگ ساده‌ای انجام دهد و نوسان‌های آن با سرعت v در طنابی همگن منتشر شود. مبدأ مختصات را منطبق بر چشمه‌ی موج (ابتدای طناب) و راستای طناب را پیش از نوسان، محور x انتخاب می‌کنیم. وقتی چشمه به نوسان درآید، نوسان‌ها در طول طناب، منتشر می‌شوند. چشمه‌ی موج و نقطه‌ای از طناب که به آن متصل است در مکان $x = 0$ واقع‌اند. اگر جابه‌جایی هر نقطه‌ی طناب را از وضع تعادل خود با u نشان دهیم، وضعیت نوسانی آن با رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

$$u = A \sin \omega t = A \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (۷-۴)$$

موج بعد از زمان $\Delta t = \frac{x}{v}$ به نقطه‌ای واقع در مکان x می‌رسد. وضعیت این نقطه، همان‌گونه که قبلاً بیان شد، مانند وضعیت چشمه‌ی موج در Δt ثانیه قبل است که با جایگزین کردن مقدار « $t - \frac{x}{v}$ » به جای t در رابطه‌ی ۷-۴ مشخص می‌شود. بنابراین خواهیم داشت:

$$u = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = A \sin \left(\omega t - \frac{\omega x}{v} \right) \quad (۸-۴)$$

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

$$u = A \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x \right) \quad (۹-۴)$$

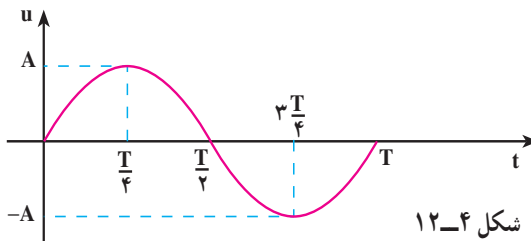
را با k نشان می‌دهند و به آن عدد موج می‌گویند.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} \quad (۱۰-۴)$$

یکای عدد موج در SI رادیان بر متر (rad/m) است؛ در نتیجه رابطه‌ی ۹-۴ به صورت زیر نوشته می‌شود.

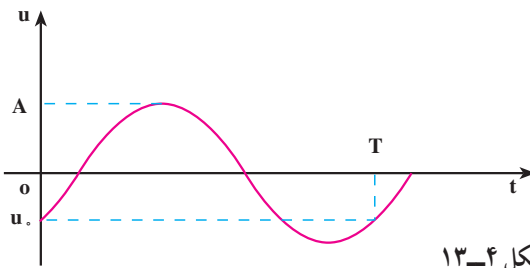
$$u = A \sin(\omega t - kx) \quad (11-4)$$

رابطه‌ی ۱۱-۴ وضعیت نوسانی نقطه‌ای از محیط را که به فاصله‌ی x از مبدأ مختصات (چشمه‌ی موج) واقع است، در لحظه‌ی t نشان می‌دهد. به این رابطه تابع موج می‌گوییم. تابع موج، تابعی دو متغیره است؛ یعنی در آن، u تابع دو متغیر زمان (t) و مکان (x) است؛ برای مثال، اگر به یک نقطه‌ی محیط نگاه کنیم (x را ثابت بگیریم) خواهیم دید که این نقطه در لحظه‌های مختلف وضعیت‌های نوسانی متفاوتی پیدا می‌کند؛ یک لحظه در وضعیت تعادل است، لحظه‌ای دیگر از وضع تعادل خارج شده و فاصله‌ی آن از وضع تعادل برابر u می‌شود و در لحظه‌ای دیگر، دورترین فاصله از وضع تعادل قرار می‌گیرد ($u = A$). به عبارت دیگر u تابع زمان است. پس با ثابت گرفتن x می‌توان تابع u را بر حسب زمان (t) برای هر یک از ذره‌های محیط به دست آورد و نمودار آن را نیز رسم کرد؛ مثلاً، این تابع برای چشمه‌ی موج که آن را مبدأ مختصات گرفته‌ایم ($x = 0$) به صورت $u = A \sin \frac{2\pi}{T} t$ و نمودار آن نیز به صورت زیر است:



شکل ۱۲-۴

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



شکل ۱۳-۴

مثال ۳-۴

یک چشمه‌ی موج با بسامد 10^6 Hz نوسان‌هایی با دامنه‌ی 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

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \text{با استفاده از رابطه‌ی ۴-۶ داریم:}$$

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

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{با توجه به رابطه‌ی ۴-۱۰ خواهیم داشت:}$$

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

با استفاده از رابطه‌ی 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 ۴-۱

تابع موجی که در جهت محور x منتشر می‌شود برحسب یکاهای SI به صورت $u = 0.02 \sin(2 \cdot 10^3 \pi t - 4\pi x)$ است. دامنه، بسامد، طول موج و سرعت انتشار این موج را محاسبه کنید.

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

$$u_y = A \sin(\omega t - kx) \quad (12-4)$$

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

$$u_x = A \sin(\omega t - kx) \quad (13-4)$$

هم چنین 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 $\varphi = \omega t - kx$ و یا $\varphi = \omega t + kx$ ، 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

نشان دهید که:

الف: اختلاف فاز دو نقطه ی هم فاز محیط مضرب زوجی از π است.
ب: اختلاف فاز دو نقطه ی محیط که در فاز مخالف اند مضرب فردی از π است.

مثال ۴-۴

با دیافراگمی به بسامد 5°Hz سر طناب کشیده شده ای را به نوسان درمی آوریم. دامنه ی نوسان ها 5mm در راستای محور y و سرعت انتشار موج در طناب برابر 10°m/s و نوسان ها در جهت مثبت محور x منتشر می شود.
الف: تابع موج ایجاد شده در طناب را بنویسید.
ب: معادله ی نوسان نقطه ی M از طناب را که به فاصله ی 25cm از سر طناب (نقطه ی 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 رابطه‌ی ۴-۱۲ داریم:

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

$$u_y = 5 \times 10^{-3} \sin(100\pi t - \pi x)$$

ب: برای نقطه‌ی یاد شده داریم:

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

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

$$u_M = 5 \times 10^{-3} \sin\left(100\pi t - \frac{\pi}{4}\right)$$

تمرین ۴-۴

چشمه‌ی موجی نوسان‌هایی با بسامد 20 Hz و دامنه‌ی 5 cm در یک محیط کشسان و در راستای محور y انجام می‌دهد. اگر این نوسان‌ها 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.

پ: کم‌ترین فاصله‌ی نقطه‌ی M از چشمه‌ی موج چه اندازه باشد تا با چشمه‌ی

موج در فاز مخالف قرار گیرد.

فاصله‌ی دو نقطه‌ی محیط از یک‌دیگر: محیطی را در نظر بگیرید که در آن موجی در حال

انتشار است. معادله‌ی نوسان دو نقطه‌ی A و B از این محیط که در یک جهت انتشار موج و به

فاصله‌ی x_A و x_B از مبدأ مختصات واقع‌اند، با توجه به رابطه‌ی ۴-۱۲، به‌صورت زیر است:

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

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

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 رابطه‌ی ۱۵-۴ با معلوم بودن اختلاف فاز دو نقطه‌ی محیط که در یک جهت انتشار موج‌اند، می‌توان فاصله‌ی دو نقطه را از یک‌دیگر (یعنی Δx) محاسبه کرد.

رابطه‌ی ۱۵-۴ نشان می‌دهد که اختلاف فاز دو نقطه‌ی محیط که به فاصله‌ی $\Delta x = 1\text{ m}$ از یک‌دیگر و در یک جهت انتشار موج‌اند، برابر است با :

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

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

رابطه‌ی ۱۶-۴ را می‌توان تعریفی برای عدد موج دانست و گفت : عدد موج برابر اختلاف فاز دو نقطه‌ی محیط است که به فاصله‌ی یک متر از یک‌دیگر و در یک جهت انتشار موج‌اند.

مثال ۵-۴

موجی در یک محیط، در حال انتشار است. معادله‌ی نوسانی نقطه‌های A و B از این محیط، در SI، به صورت $u_A = 0.02 \sin(50\pi t - 0.4\pi)$ و $u_B = 0.02 \sin(50\pi t - 0.7\pi)$ است؛ اگر موج از نقطه‌ی A به نقطه‌ی B برود، کم‌ترین فاصله‌ی دو نقطه را از یک‌دیگر به دست آورید. سرعت انتشار موج 20 m/s است.

پاسخ

ابتدا بسامد نوسان‌ها و سپس طول موج را محاسبه می‌کنیم :

$$\omega = 2\pi f$$

$$2\pi f = 50\pi$$

$$f = 25\text{ Hz}$$

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

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

اکنون اندازه‌ی اختلاف فاز دو نقطه را محاسبه می‌کنیم:

$$\Delta\phi = |\phi_B - \phi_A|$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x = \frac{2\pi}{1.0} \Delta x$$

با استفاده از رابطه‌ی ۴-۱۵ داریم:

$$\frac{3\pi}{1.0} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x = \frac{2\pi}{1.0} \Delta x$$

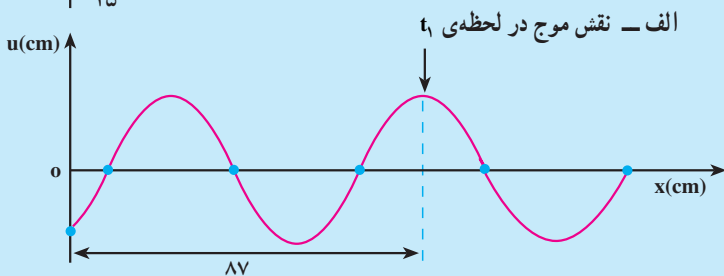
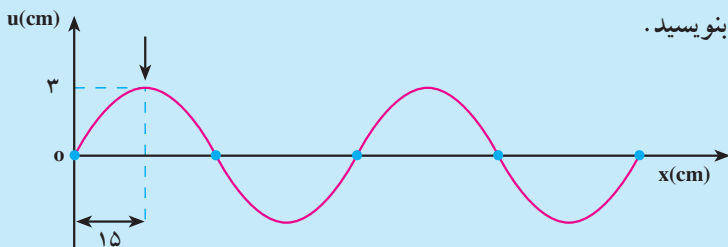
$$\Delta x = AB = 1.2 \text{ cm}$$

فعالیت ۴-۴

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

تمرین ۴-۵

شکل‌های ۴-۱۴ الف و ب، نقش یک موج را، در دو لحظه‌ی t_1 و t_2 ، نشان می‌دهند که در یک محیط و در جهت محور x در حال انتشار است. علامت پیکان، یک قلّه‌ی موج را در این دو لحظه نشان می‌دهد؛ اگر $t_2 - t_1 = 0.06 \text{ s}$ باشد، تابع این موج را بنویسید.



شکل ۴-۱۴
الف - نقش موج در لحظه‌ی t_1
ب - نقش موج در لحظه‌ی t_2

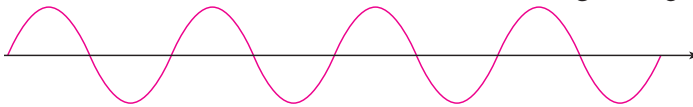
تمرین‌های فصل چهارم

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

۳- 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؟

۴- شکل ۴-۱۵، 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 دامنه‌ی آن نصف باشد. دامنه و طول موج را روی شکل مشخص کنید.



شکل ۴-۱۵

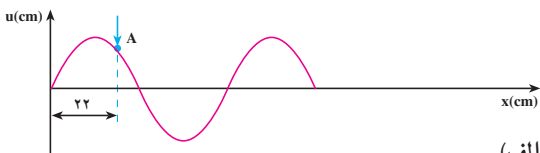
۵- سیمی به چگالی $7/8 \text{ g/cm}^3$ و سطح مقطع 5 mm^2 بین دو نقطه با نیروی 156 N کشیده شده است. سرعت انتشار موج را در این سیم محاسبه کنید.

۶- دو موج با بسامدهای 50 Hz و 75 Hz در یک محیط منتشر می‌شوند.

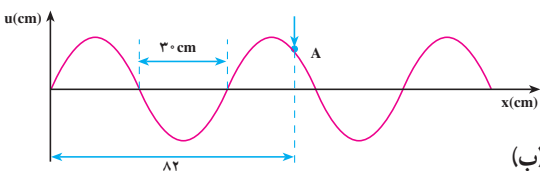
الف: سرعت انتشار موج دوم چند برابر سرعت انتشار موج اول است؟

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

۷- شکل‌های ۴-۱۶ الف و ب، نقش یک موج را در دو لحظه‌ی t_1 و t_2 نشان می‌دهد که



(الف)



(ب)

شکل ۴-۱۶

در امتداد محور x منتشر می‌شود. علامت پیکان، یک نقطه از موج را در این دو لحظه نشان می‌دهد. موردهای زیر را محاسبه کنید:

الف: این موج طولی است یا

عرضی و عدد موج آن چه اندازه است؟

ب: اگر بسامد نوسان‌ها 25 Hz باشد،

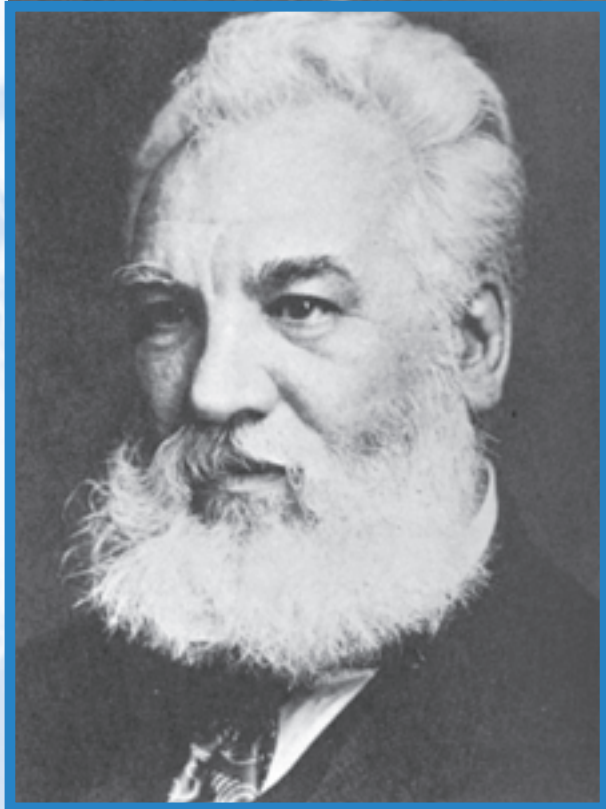
باشد، $t_2 - t_1 = \Delta t$ چند ثانیه است؟

فیزیک ۲



۱

موج‌های مکانیکی (۲)



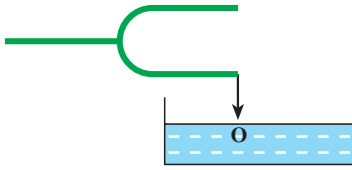
الکساندر گراهام بل

(۱۸۴۷-۱۹۲۲م)

موج های مکانیکی (۲)

۱-۱- انتشار موج در دو و سه بُعد

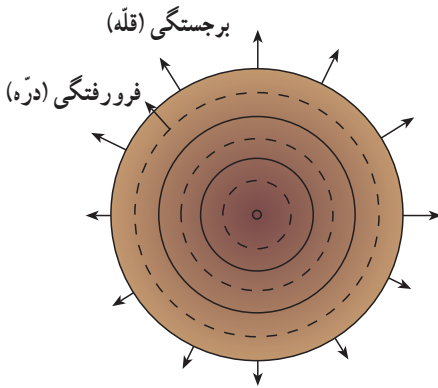
اگر مطابق شکل ۱-۱ به کمک یک سوزنی که به انتهای یک شاخه‌ی دیاپازون نصب شده است، ضربه‌هایی را در راستای قائم بر سطح آب درون تشتک وارد کنیم، موج‌های ایجاد شده به صورت دایره‌هایی به مرکز چشمه‌ی موج، در سطح آب، یعنی در دو بُعد منتشر می‌شوند.



شکل ۱-۱

در شکل ۲-۱ دو دسته دایره می‌بینید.

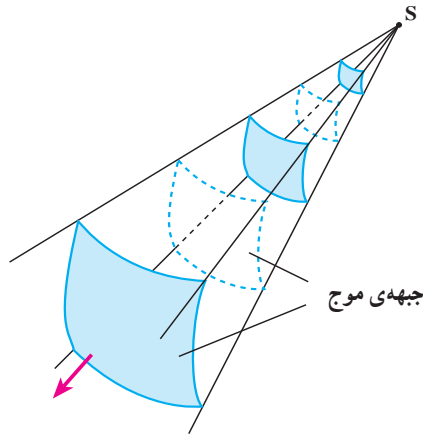
دایره‌های توپر، برجستگی‌ها و دایره‌های خط‌چین، فرورفتگی‌ها را در سطح آب نشان می‌دهند. به این دایره‌های در حال انتشار جبهه‌ی موج می‌گوییم و آن را چنین تعریف می‌کنیم: جبهه‌ی موج مکان هندسی نقطه‌هایی از محیط است که در آن نقطه‌ها تابع موج دارای فاز یکسانی است. بنابراین، اختلاف فاز نقطه‌های واقع بر یک جبهه‌ی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



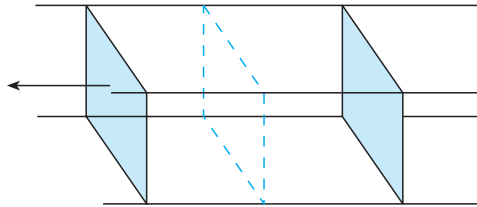
شکل ۲-۱

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 چشمه‌ی موج نقطه‌ای را در یک محیط همسانگرد سه‌بُعدی قرار دهیم (مثلاً بلندگوی کوچکی در هوای درون اتاق)، جبهه‌ی موج به صورت کره‌هایی خواهد بود که مرکز همه‌ی آن‌ها، چشمه‌ی موج است و از چشمه‌ی موج در سه بُعد منتشر می‌شوند و شعاع آن‌ها با انتشار موج به تدریج افزایش می‌یابد. به این موج‌ها، موج کروی می‌گوییم. شکل ۱-۳ قسمت‌های کوچکی از سطح موج‌ها را که از چشمه‌ی موج نقطه‌ای S گسیل می‌شوند نشان می‌دهد.

در فاصله‌ی بسیار دور از یک چشمه‌ی موج نقطه‌ای، قسمت‌های کوچکی از جبهه‌ی موج‌های کروی، همان‌گونه که در شکل ۱-۴ نشان داده شده است، به صورت صفحه‌هایی موازی یک‌دیگر درمی‌آیند. در این صورت به آن‌ها موج تخت می‌گوییم.



شکل ۱-۳- موج‌های کروی



شکل ۱-۴- موج‌های تخت

موج حامل انرژی است: موج‌ها با خود انرژی را از نقطه‌ای به نقطه‌ی 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، ضربه‌ی موج می‌خواهد طناب را از دست شما خارج کند. در فیزیک ادیدیم که هر نوسانگری دارای انرژی است. از طرف دیگر می‌دانیم موج به هر ذره‌ی محیط که می‌رسد، آن ذره را با بسامدی برابر بسامد موج به نوسان وامی‌دارد، به عبارت دیگر موج به هر ذره‌ی محیط که می‌رسد به آن انرژی منتقل می‌کند. از سوی دیگر می‌دانیم که انرژی مکانیکی نوسانگری به جرم m که با دامنه‌ی A و بسامد f نوسان می‌کند برابر است با:

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$$

با توجه به این که $\omega = 2\pi f$ است، داریم:

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

چون هر ذره‌ی محیط، حرکت نوسانی ساده با بسامد موج انجام می‌دهد؛ بنابراین، انرژی مکانیکی هر ذره نیز از رابطه‌ی ۱-۱ محاسبه می‌شود.

رابطه‌ی ۱-۱ نشان می‌دهد که: انرژی‌ای که توسط موج حمل می‌شود هم با مجذور دامنه و هم با مجذور بسامد موج، نسبت مستقیم دارد.

در لحظه‌ای که قله‌ی موج به یک ذره از محیط می‌رسد، تمام انرژی ذره به صورت انرژی پتانسیل است، و وقتی که ذره از وضع تعادل می‌گذرد، تمام انرژی آن به صورت جنبشی خواهد بود.

بازتاب موج: فرض کنید موجی در یک محیط در حال انتشار است. به نظر شما وقتی این

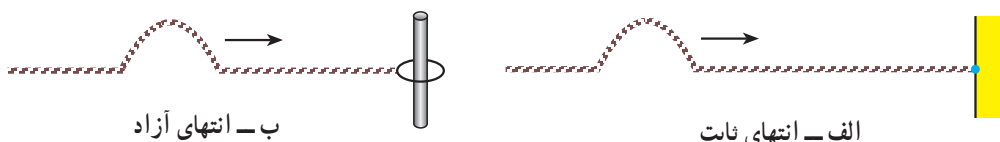
موج به انتهای محیط، یعنی مرز این محیط با محیط دیگر می‌رسد، چه پدیده‌ای رخ می‌دهد؟ وقتی موج، به انتهای محیط می‌رسد، مقداری از انرژی این موج از مرز مشترک دو محیط عبور می‌کند و وارد محیط دوم می‌شود و بقیه‌ی آن از مرز مشترک بازتاب شده و به محیط اول برمی‌گردد.

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

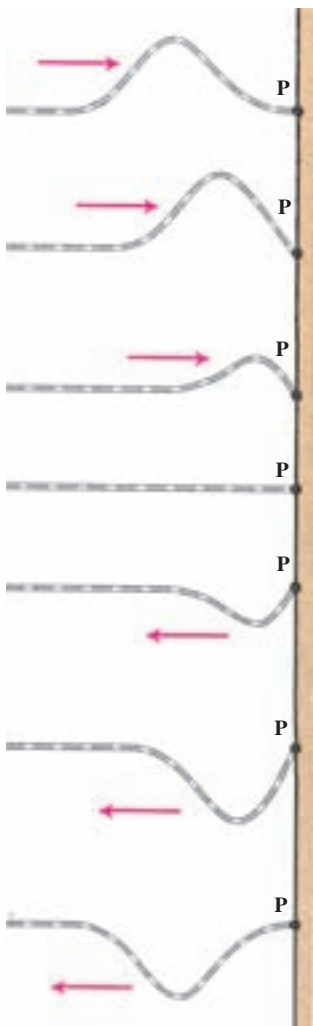
نتیجه‌ی به دست آمده در این مورد و در مورد دیگر موج‌های مکانیکی، نظیر موج‌های صوتی و موج‌های الکترومغناطیسی، نیز درست است.

بازتاب تپ (موج) از انتهای طناب به نحوه‌ی اتصال انتهای طناب بستگی دارد. انتهای طناب، ممکن است به یک دیوار، محکم ثابت شده باشد. در این صورت، انتهای طناب را انتهای ثابت یا بسته می‌نامیم (شکل ۵-۱ الف) و هم‌چنین ممکن است انتهای طناب به حلقه‌ی بسیار سبکی وصل شده باشد و روی میله‌ی قائمی بدون اصطکاک بتواند، بالا و پایین برود (شکل ۵-۱ ب). در این حالت، انتهای طناب انتهای آزاد نامیده می‌شود.

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



شکل ۵-۱



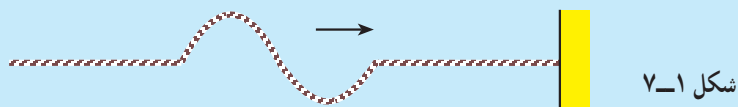
بازتاب از انتهای ثابت: وقتی تپ مطابق شکل ۶-۱

به انتهای ثابت P می‌رسد، جزء کوچکی از طناب که در مجاورت نقطه‌ی P قرار دارد، به آن نیرویی رو به بالا وارد می‌کند تا نقطه‌ی P را به نوسان وادارد. نقطه‌ی P از طناب، روی دیوار ثابت است و نمی‌تواند جابه‌جا شود. بنا به قانون سوم نیوتون، نقطه‌ی 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 چشمه‌ی موج عمل می‌کند و یک تپ در خلاف جهت تپ تابشی (فروودی) در طناب ایجاد می‌کند که برجستگی را به فرورفتگی و فرورفتگی را به برجستگی تبدیل می‌کند (به حالت‌های مختلف شکل ۶-۱ توجه کنید). تپ باز تابیده، در خلاف جهت تپ تابشی، روی طناب منتشر می‌شود.

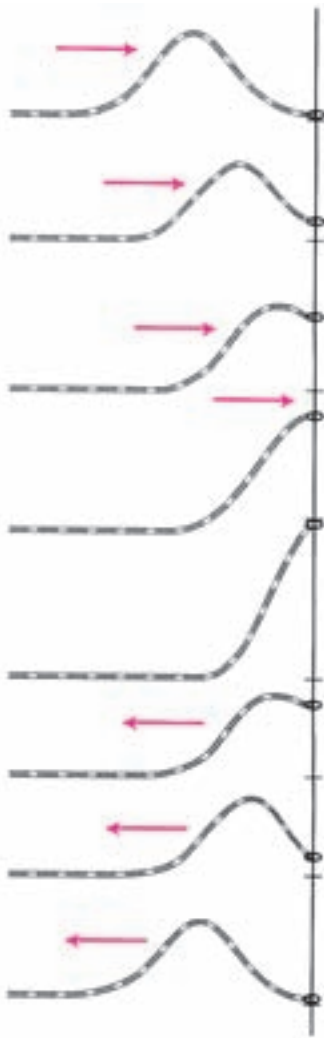
شکل ۶-۱- انتهای طناب ثابت است.

تمرین ۱-۱

در شکل ۷-۱ تپی روی طنابی در حال انتشار است. شکل تپ بازتاب آن را از انتهای ثابت طناب، رسم کنید.



شکل ۷-۱

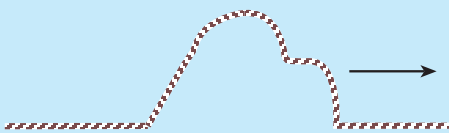


بازتاب از انتهای آزاد: اگر انتهای طناب آزاد باشد، وقتی تپ به آن می‌رسد، انتهای طناب را در جهت خود به حرکت درمی‌آورد. در شکل ۸-۱ تپ تابشی، انتهای طناب را بالا می‌کشد. در این حالت همان طور که شکل نشان می‌دهد، انتهای طناب به قلّه‌ای می‌رسد که جابه‌جایی آن از وضع تعادل، دو برابر جابه‌جایی سایر نقطه‌های طناب است. در این حالت، انتهای طناب، مانند چشمه‌ی 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.

شکل ۸-۱- انتهای طناب آزاد است.

تمرین ۲-۱

تپی مانند شکل ۹-۱ در طنابی در حال انتشار است. شکل تپ بازتابی آن را از انتهای آزاد طناب، رسم کنید.



شکل ۹-۱

۱-۲- اصل برهم نهی موج‌ها

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

به شکل ۱-۱۰ نگاه کنید، در سطح آب دریاچه، موج‌هایی هم‌زمان در حال انتشارند. این موج‌ها، هر یک به‌طور مستقل به انتشار خود ادامه می‌دهند.



شکل ۱-۱۰

مثال‌های بالا به‌طور عملی نشان دهنده‌ی اصلی به‌نام اصل برهم نهی هستند. مطابق این اصل:

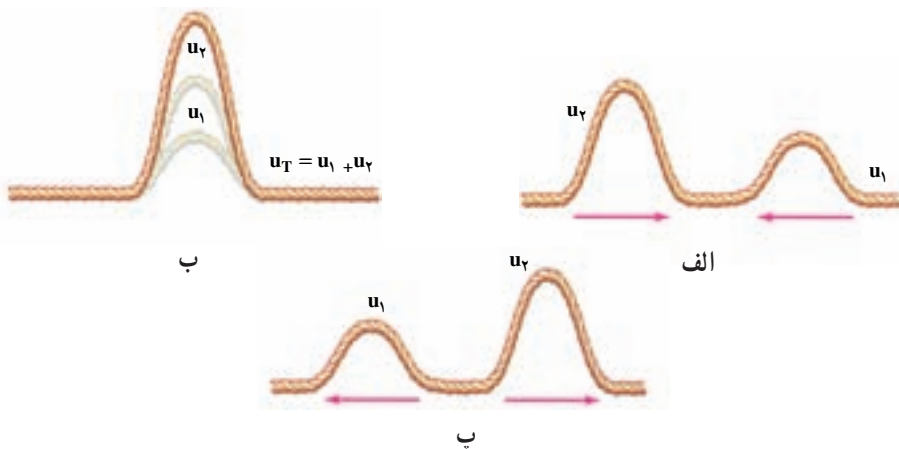
هر موج در حال انتشار، بدون آن که برای انتشار سایر موج‌ها مزاحمتی ایجاد کند، از آن‌ها عبور کرده و به انتشار خود ادامه می‌دهد. درست مانند آن که هیچ موج

دیگری در محیط منتشر نمی‌شود. در نقطه‌ای که دو و یا چند موج با هم تلاقی می‌کنند، جابه‌جایی ذره‌ای از محیط که در آن نقطه است، برابر برآیند جابه‌جایی‌های حاصل از هر یک از موج‌هاست.

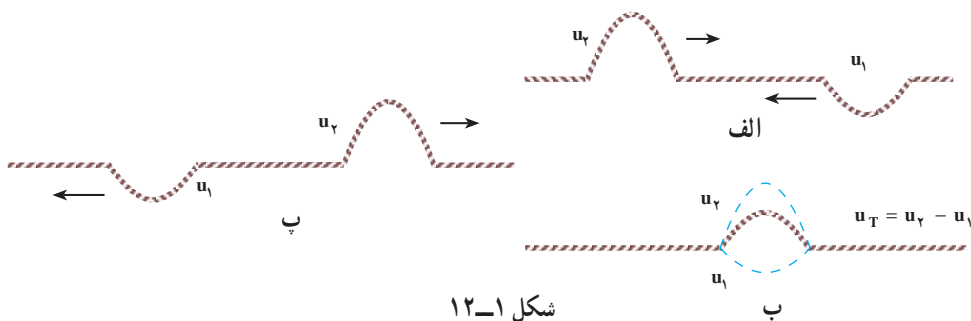
$$\vec{u}_T = \vec{u}_1 + \vec{u}_2 + \dots \quad (۲-۱)$$

به حالت‌های مختلف شکل ۱۱-۱ نگاه کنید. در حالت (الف) دو تپ عرضی در طول طناب به‌طرف یک‌دیگر در حال انتشارند. این دو تپ در حالت (ب) به یک‌دیگر رسیده‌اند و چون جابه‌جایی حاصل از دو تپ، هم‌جهت‌اند، برآیند آن‌ها برابر مجموع اندازه‌ی جابه‌جایی‌های حاصل از هر یک شده است. در حالت (ب) می‌گوییم: برهم نهی موج‌ها سازنده است. در حالت (پ) دو تپ از یک‌دیگر عبور کرده و به انتشار خود ادامه داده‌اند.

در حالتی که جابه‌جایی‌ها در خلاف جهت یک‌دیگر باشند جابه‌جایی برآیند برابر تفاضل اندازه‌ی جابه‌جایی‌هایی است که هر تپ به تنهایی در جزیی از طناب که با هم به آن رسیده‌اند، ایجاد می‌کند. به حالت‌های مختلف شکل ۱۲-۱ توجه کنید. در حالت (ب) می‌گوییم: برهم نهی موج‌ها، ویرانگر است.



شکل ۱۱-۱

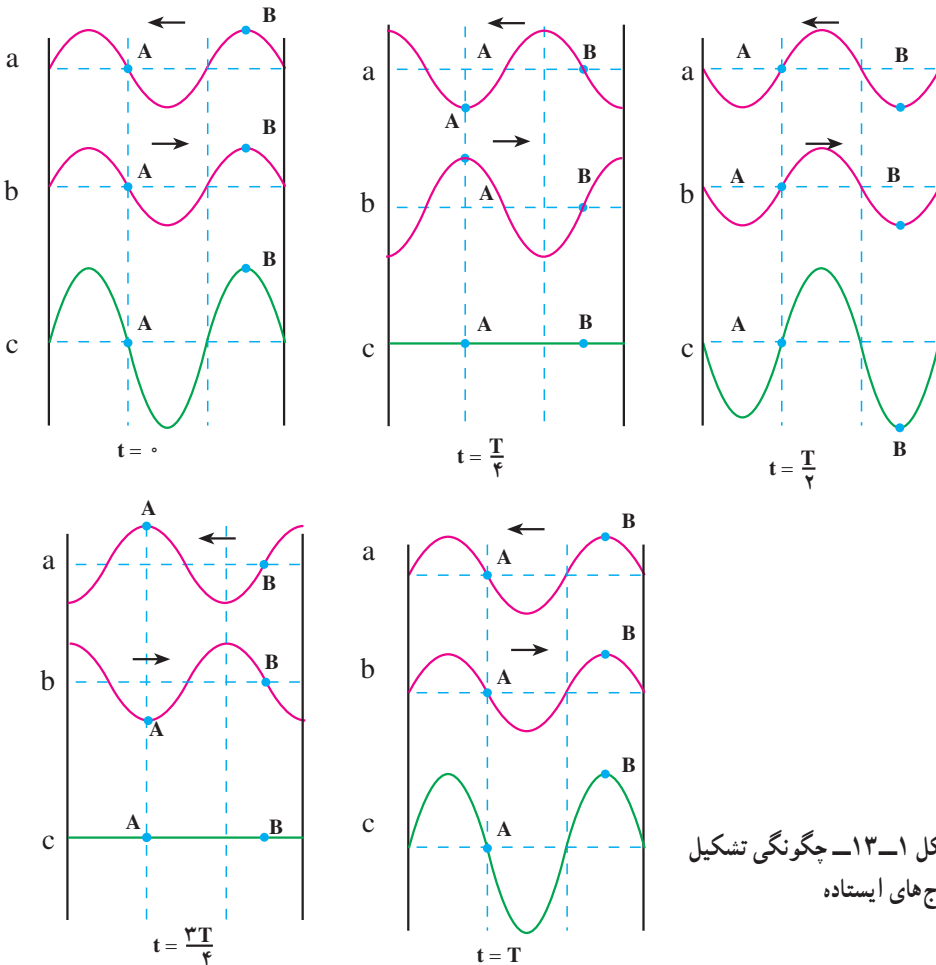


شکل ۱۲-۱

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

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

به حالت‌های مختلف شکل ۱۳-۱ توجه کنید. در این حالت‌ها و در هر یک از لحظه‌های مشخص شده، موجی را که از راست به چپ روی طناب منتشر می‌شود با a و موجی را که از چپ به راست در حال انتشار است با b و حاصل برهم نهی این دو موج را با c نشان داده و هر یک را جداگانه رسم کرده‌ایم. در واقع، حالت‌های c وضعیت طناب را هنگامی که موج‌های a و b روی آن منتشر می‌شوند، در بازه‌های زمانی $\frac{T}{4}$ (دوره‌ی موج است) نشان می‌دهد.



شکل ۱۳-۱- چگونگی تشکیل موج‌های ایستاده

در حالت‌های مختلف شکل ۱۳-۱ به نقطه‌ی 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، نقطه‌ی A همواره ساکن می‌ماند. نقطه‌ی A یک گره است.

پرسش ۱-۱

در شکل ۱-۱۳ گره‌های دیگری نیز وجود دارند. آن‌ها را مشخص کنید.

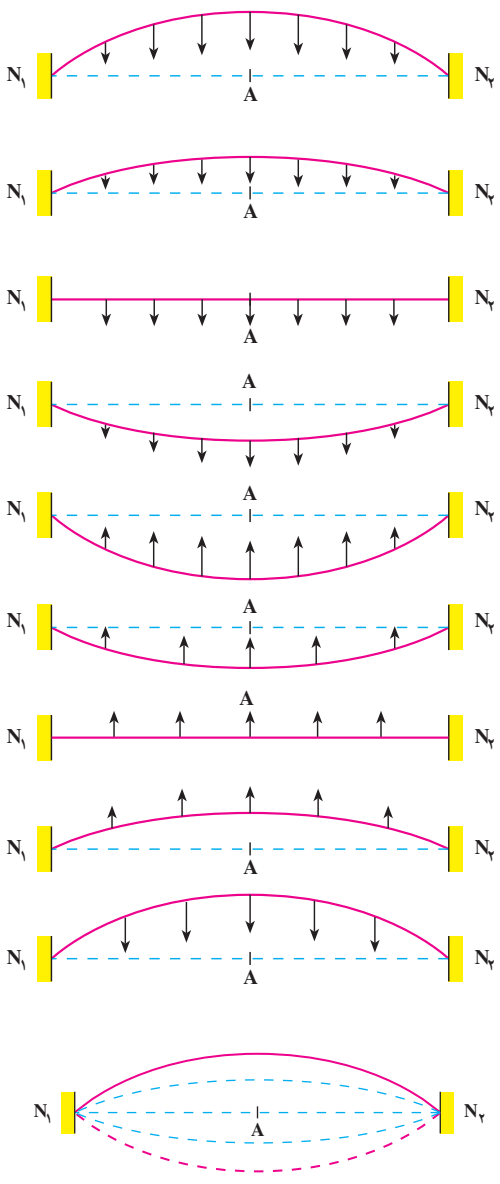
به بعضی نقطه‌های دیگر طناب نیز در هر لحظه دو موج می‌رسد، با این تفاوت که در این نقطه‌ها برهم نهی به گونه‌ای است که باعث می‌شود موج برآیند، با بیشینه‌ی دامنه نوسان کند. به این نقطه‌ها شکم، یا پادگره، می‌گویند و آن‌ها را با A نشان می‌دهند. جای شکم‌ها نیز، مانند گره‌ها، ثابت است. در حالت‌های مختلف شکل ۱-۱۳ یکی از شکم‌ها را با نام B مشخص کرده‌ایم. نقطه‌ی B در مکانی واقع شده است که برهم نهی حاصل از دو موج a و b آن را با بیشینه‌ی دامنه به نوسان وا می‌دارد. نقطه‌ی B یک شکم است.

پرسش ۲-۱

آیا در حالت‌های مختلف شکل ۱-۱۳ 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، فاصله‌ی دو گره‌ی متوالی برابر فاصله‌ی دو شکم متوالی و برابر نصف طول موج است. همچنین فاصله‌ی 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 رابطه‌ی 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، دو حالت الف: دو سر طناب ثابت و ب: یک سر ثابت و سر دیگر آزاد را در نظر می‌گیریم. در این بررسی‌ها فرض شده که تعداد گره‌ها و شکم‌ها در طول طناب کم‌ترین تعداد ممکن باشد.



الف: دو سر طناب ثابت است: چون انتهای ثابت نمی‌تواند نوسان کند، در دو انتهای (دوسر) طناب، همواره گره ایجاد می‌شود. حالت‌های مختلف شکل ۱۴-۱ 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 ۱۵-۱ حالت‌های مختلف شکل ۱۴-۱ نشان داده شده است.

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

$$L = \frac{\lambda}{2} \quad (3-1)$$

شکل ۱۴-۱

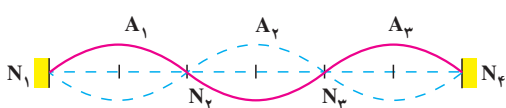
شکل ۱۵-۱

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

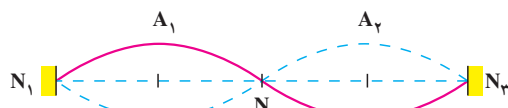
$$2L = \frac{v}{f}$$

$$f_1 = \frac{v}{2L} \quad (4-1)$$

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 ۱۴-۱ 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 رابطه‌ی ۱-۴ 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 بیش تر باشد. شکل‌های ۱۶-۱ و ۱۷-۱ وضعیت‌هایی را نشان می‌دهد که در آن‌ها به ترتیب دو و یا سه شکم تشکیل شده است.



شکل ۱۷-۱



شکل ۱۶-۱

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.

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \quad (5-1)$$

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

رابطه‌ی اخیر را می‌توان برحسب بسامد به صورت زیر نوشت:

$$f_n = \frac{nv}{2L} = nf_1 \quad (6-1)$$

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

مثال ۱-۱

دو سر طنابی ثابت شده است. وقتی طناب را به ارتعاش درمی‌آوریم، در آن موج ایستاده تشکیل می‌شود. 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

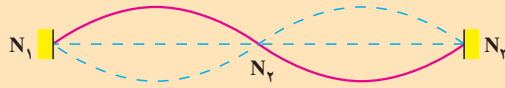
الف: شکل ۱۸-۱ وضعیت نوسانی طناب را نشان می‌دهد. با توجه به شکل،

معلوم می‌شود که $n=2$ است. با استفاده از رابطه‌ی ۱-۵ داریم:

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

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

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

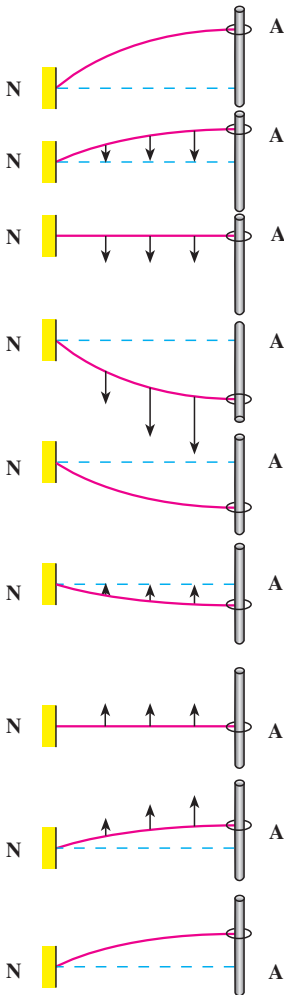


شکل ۱-۱۸

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

$$60 / 6 = \frac{240}{f}$$

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



همان‌طور که دیدیم برای آن که در طول طناب موج ایستاده تشکیل شود، باید رابطه‌ی ۱-۵ برقرار شود. برای برقراری این رابطه می‌توان طول طناب و یا نیروی کششی طناب و در نتیجه سرعت انتشار موج در طناب را تغییر داد.

ب: یک سر طناب ثابت است: با توجه به آن چه در قسمت الف بیان شد، در انتهای ثابت طناب، گره و در انتهای آزاد آن، شکم تشکیل می‌شود. در ساده‌ترین حالت، بین ابتدا و انتهای طناب، گره و یا شکم دیگری به وجود نمی‌آید. در این حالت، شکل طناب مانند بخش‌های مختلف شکل ۱-۱۹ است. در این جا نیز ممکن است، بخش‌های مختلف شکل ۱-۱۹ را در یک شکل، مانند شکل ۱-۲۰ نشان داد.

چون فاصله‌ی یک گره و یک شکم متوالی برابر ربع طول موج است، اگر طول طناب برابر L و طول موج برابر λ باشد داریم:

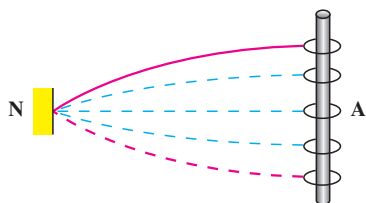
$$L = \frac{\lambda}{4} \quad (7-1)$$

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

$$L = \frac{v}{4f}$$

شکل ۱-۱۹

$$f_1 = \frac{v}{4L} \quad (8-1)$$



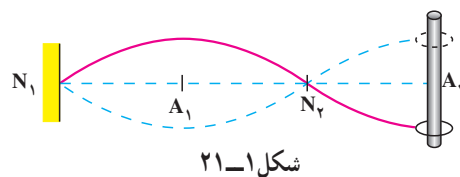
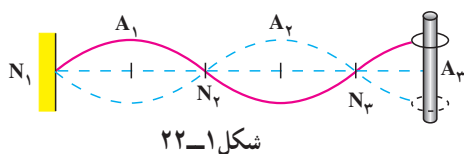
رابطه‌ی بالا، بسامد اصلی طناب را به دست می‌دهد.

شکل ۱-۲

اگر در طول طناب، مانند شکل‌های ۱-۲۱ و ۱-۲۲، تعداد گره‌ها و شکم‌ها بیش‌تر باشد، داریم:

$$L = (2n-1) \frac{\lambda_{(2n-1)}}{4} \quad (9-1)$$

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



یعنی در این حالت، طول طناب مضرب فردی از ربع طول موج است. با استفاده از رابطه‌ی ۴-۶ خواهیم داشت:

$$L = (2n-1) \frac{v}{4f_{(2n-1)}}$$

$$f_{(2n-1)} = (2n-1) \frac{v}{4L} = (2n-1)f_1 \quad (10-1)$$

به ازای $n=1$ در رابطه‌ی ۱-۱۰، بسامد اصلی و به ازای $n=2, 3, \dots$ هماهنگ‌های سوم، پنجم و... بسامد اصلی به دست می‌آیند. در این حالت (که یک سر طناب آزاد است) فقط مضرب‌های فرد بسامد اصلی در طناب و یا تار ایجاد می‌شوند.

مثال ۱-۲

در یک طناب موج ایستاده تشکیل شده است. یک سر طناب ثابت و سر دیگر آن آزاد است و در طول آن ۴ گره به وجود آمده است. اگر فاصله‌ی اولین گره از دومین شکم بعد از آن برابر ۱۵cm باشد:

الف: طول طناب را به دست آورید.

ب: اگر بسامد نوسان‌ها برابر ۴۰۰ Hz باشد، سرعت انتشار موج در طناب را محاسبه کنید.

پاسخ

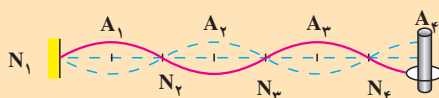
الف: در حالتی که یک سر طناب ثابت و سر دیگر آن آزاد است، تعداد گره‌ها برابر تعداد شکم‌هاست. در این حالت، n برابر تعداد گره (یا تعداد شکم) است.

فاصله‌ی اولین گره از دومین شکم بعد از آن با توجه به شکل زیر برابر N_1A_2 است:

$$N_1A_2 = 15$$

$$3 \frac{\lambda}{4} = 15$$

$$\lambda = 20 \text{ cm}$$



شکل ۱-۲۳

با استفاده از رابطه‌ی ۱-۹ داریم:

$$L = (2n-1) \frac{\lambda(2n-1)}{4} \text{ و } n = 4$$

$$L = (2 \times 4 - 1) \times \frac{20}{4} = 35 \text{ cm}$$

ب: چون $\lambda = \frac{v}{f}$ است داریم:

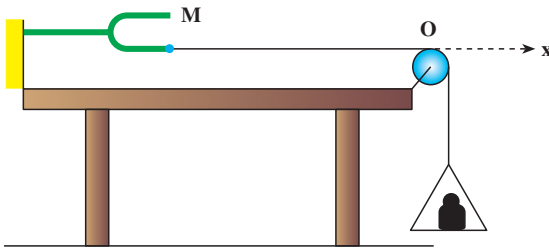
$$20/2 = \frac{v}{400}$$

$$v = 80 \text{ m/s}$$

مطالعه‌ی آزاد

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

مطابق شکل ۱-۲۴ یک سر طناب نازکی را به دیپازون وصل کنید و سر دیگر آن را از روی قرقره‌ی ثابتی بگذرانید و به آن کفه‌ای آویزان کنید. وزن کفه و وزنه‌ی درون آن، نیروی کشش را در طناب ایجاد می‌کند. وقتی دیپازون را به نوسان درمی‌آورید، در طناب موج ایجاد می‌شود. موج‌ها از انتهای ثابت O بازتاب می‌یابند و با موج‌های فرودی، برهم نهاده می‌شوند. با تغییر وزنه‌ی درون کفه، می‌توانید نیروی کشش طناب و در نتیجه سرعت انتشار موج را در آن تغییر دهید. با این کار، بیش‌ترین مقدار وزنه را که به ازای آن در نقطه‌های O و M گره و در وسط آن‌ها شکم تشکیل می‌شود، به دست آورید. با کاهش وزنه‌ی درون کفه، حالت‌هایی را به وجود آورید که تعداد گره و شکم‌ها



شکل ۱-۲۴

بیش‌تر شوند. با جایگزین کردن دیپازونی که بسامد دیگری دارد چه تغییری در آزمایش رخ می‌دهد؟ نتیجه‌ی این آزمایش را چگونه توجیه می‌کنید؟

۱-۳ — برهم نهی موج‌ها در دو بُعد — تداخل موج‌ها در سطح آب

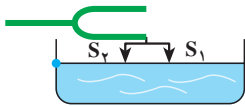
در بخش قبل، برهم نهی دو موج کاملاً یکسان را در طناب یا تار بررسی کردیم. در این بخش به بررسی برهم نهی موج‌هایی می‌پردازیم که در دو بُعد، مثلاً در سطح آب، منتشر می‌شوند.

با یک دیپازون، دو چشمه‌ی موج S_1 و S_2 را ایجاد می‌کنیم

(شکل ۱-۲۵). طول سوزن‌های S_1 و S_2 با هم برابرند.



شکل ۱-۲۵



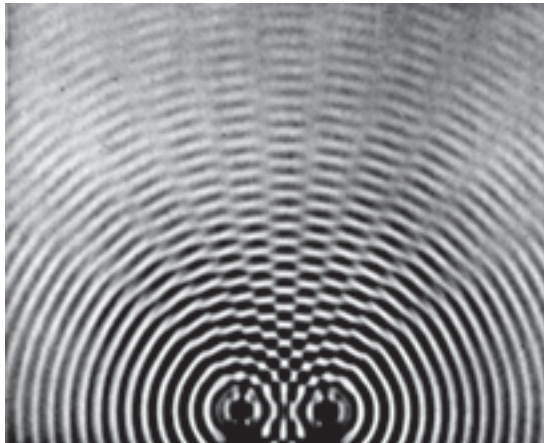
شکل ۱-۲۶

اکنون دیپازون را مطابق شکل ۱-۲۶ 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 دیپازون را به نوسان درآوریم، موج‌های دایره‌ای حاصل از هر یک از دو چشمه S_1 و S_2 در سطح آب منتشر می‌شوند. در نتیجه به هر ذره‌ی آب که در سطح آب تشتک قرار دارد، هم‌زمان دو موج می‌رسد. بنابراین وضعیت نوسانی ذره‌های آب، حاصل برهم نهی دو موجی است که با هم به هر ذره می‌رسند. در این جا 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، برهم نهی دو موج در این نقاط، ویرانگر است و این ذره‌ها مانند گره‌ها، ساکن می‌مانند. مکان بعضی ذره‌ها طوری است که برهم نهی 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 بیشینه‌ی دامنه، نوسان می‌کنند. در طناب که محیطی یک‌بُعدی است، تعدادی نقطه‌ی گره و شکم به طور متوالی تشکیل می‌شود، اما در این جا که سطح آن دو بُعدی است، نقطه‌های گره مشابه و نیز نقطه‌های شکم مشابه بی‌شماری وجود دارد.

شکل ۱-۲۷ تصویری را نشان می‌دهد که حاصل برهم نهی آزمایشی مشابه آزمایش یادشده‌ی بالا است.

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

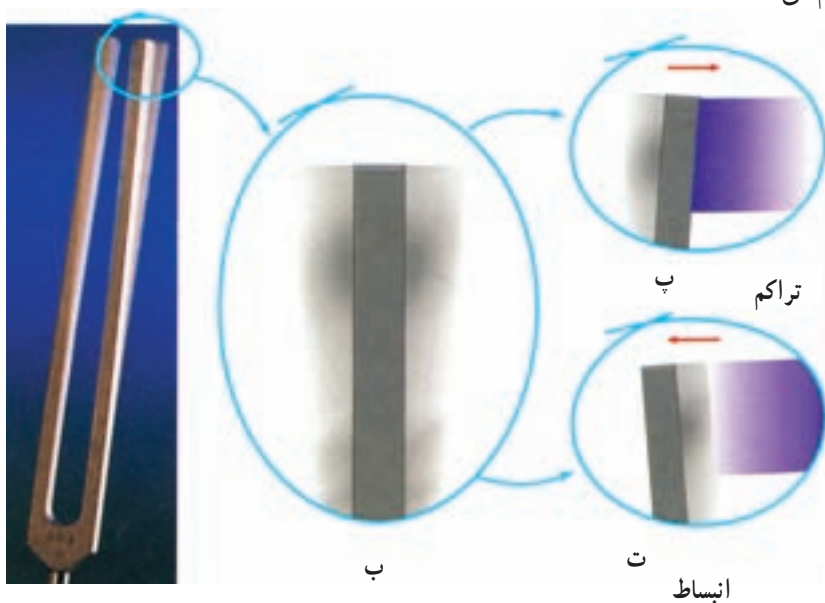


شکل ۱-۲۷

۱-۴- موج صوتی

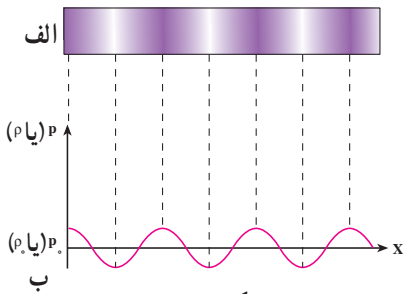
یکی از مهم‌ترین موج‌هایی که ما در زندگی روزمره با آن سروکار داریم موج صوتی است. برای مثال، از طریق این موج‌ها با یک‌دیگر گفت‌وگو می‌کنیم، با به صدا در آوردن بوق ماشین، به عابری که از خیابان عبور می‌کند هشدار می‌دهیم و ...

برای این که بدانیم موج‌های صوتی چگونه ایجاد می‌شوند فرایند تولید صوت به وسیله‌ی یک دیپازون را تشریح می‌کنیم. یک دیپازون را مطابق شکل ۱-۲۸- الف و ب در نظر بگیرید. قبل از ارتعاش دیپازون 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 دیپازون را مرتعش می‌کنیم. هنگامی که شاخه‌ی آن مطابق شکل ۱-۲۸- پ به طرف راست حرکت می‌کند، لایه‌ی هوای مجاور خود را متراکم می‌کند و چگالی و فشار آن را نسبت به حالت تعادل افزایش می‌دهد که این لایه‌ی متراکم نیز به نوبه‌ی خود لایه‌ی مجاورش را متراکم می‌کند.

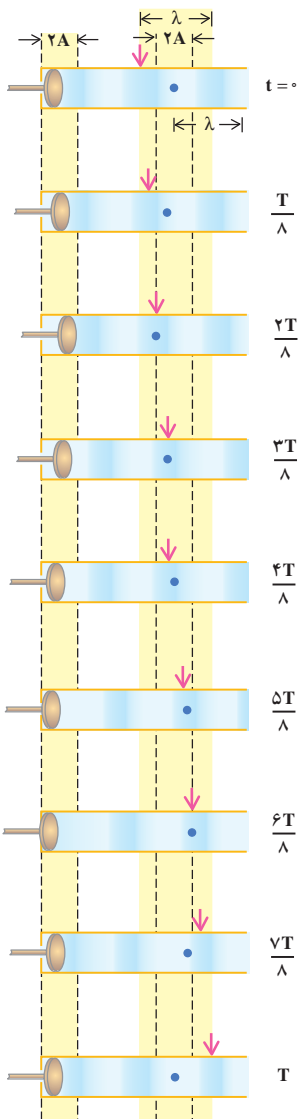


شکل ۱-۲۸

به این ترتیب یک آشفتگی یا تپ ایجاد می‌شود که در آن فشار و چگالی بیش‌تر از حالت تعادل است. این تپ تراکمی (پرفشار) در هوا منتشر می‌شود. هنگامی که شاخه‌ی دیپازون برمی‌گردد، همان‌طور که در شکل ۱-۲۸- ت می‌بینید، لایه‌ی هوای مجاور آن منبسط می‌شود و چگالی و فشار این لایه نسبت به حالت تعادل کاهش می‌یابد. این لایه‌ی انبساط یافته نیز به صورت یک تپ انبساطی (کم‌فشار) در



شکل ۲۹-۱



شکل ۳۰-۱

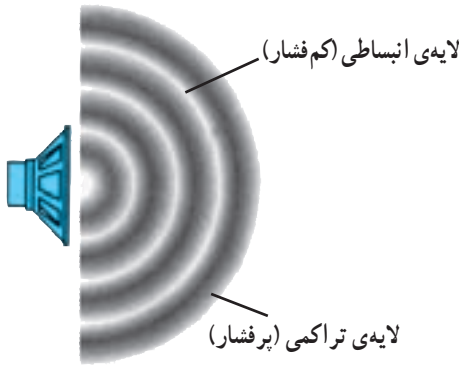
هوا منتشر می‌شود. بنابراین هنگامی که دیافراگم مرتعش می‌شود، تب‌های متوالی تراکمی و انبساطی (شکل ۲۹-۱) در هوا منتشر می‌کند. نمودار تغییرات فشار (چگالی) برحسب فاصله در یک لحظه از زمان در شکل ۲۹-۱-ب نشان داده شده است.

در مورد انتشار موج در طناب یا سطح آب دیدیم که آشفتگی یا تب به صورت برجستگی و یا فرورفتگی بود. اما در حالت انتشار صوت در هوا، آشفتگی یا تب به صورت لایه‌های تراکمی و انبساطی یا لایه‌های پرفشار و کم‌فشار است. هم‌چنین، دیدیم که هنگام انتشار موج در محیط ذره‌های محیط منتقل نمی‌شوند، بلکه حول نقطه‌ی تعادل خود حرکت نوسانی انجام می‌دهند؛ مثلاً، در شکل ۴-۷ دیدیم که اگر به یک نقطه از محیط نگاه کنیم، این نقطه (که با رنگ قرمز نشان داده شده است) درحین انتشار موج حول حالت تعادل خود نوسان می‌کند، ولی اگر به یک نقطه از موج که با پیکان مشخص شده است نگاه کنیم، این نقطه با سرعت ثابت در محیط حرکت می‌کند. در انتشار صوت نیز ذره‌های هوا منتقل نمی‌شوند بلکه حول نقطه‌ی تعادل خود نوسان می‌کنند. لایه‌های تراکمی و انبساطی نیز در اثر این نوسان‌ها به وجود می‌آید.

در شکل ۱-۳۰ انتشار یک موج صوتی در یک لوله، در بازه‌های زمانی $\frac{T}{8}$ ، نشان داده شده است. در این شکل یکی از ذره‌های هوا (محیط) با رنگ آبی مشخص شده است. این نقطه، درحین انتشار موج پس از یک نوسان کامل به محل اولیه‌ی خود برمی‌گردد. در حالی اگر یک نقطه از موج را مثلاً در ناحیه‌ی مترام که در شکل ۱-۳۰ با پیکان مشخص شده است در نظر بگیریم، می‌بینیم که با سرعت ثابت در هوا حرکت می‌کند، چون در انتشار صوت ذره‌های هوا در راستای انتشار نوسان می‌کنند. این موج‌ها طولی‌اند.

فعالیت ۱-۱

مثال‌هایی از انتشار صوت در مایع‌ها و جامد‌ها ذکر کنید.



شکل ۱-۳۱

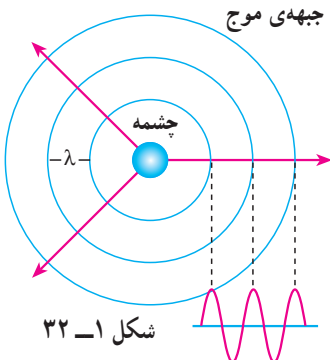
هر جسم مرتعش در هوا، خود یک چشمه‌ی تولید موج‌های صوتی است. چشمه‌ی صوت ممکن است به سادگی یک دیابازون و یا به پیچیدگی حنجره‌ی انسان باشد. در هنگام صحبت در اثر ارتعاش تارهای صوتی در حنجره امواج صوتی در هوا ایجاد می‌شوند.

هنگامی که یک چشمه‌ی صوت مرتعش می‌شود، صوت ایجاد شده در تمام جهت‌ها منتشر می‌شوند. لایه‌های تراکمی (پرفشار) و انبساطی (کم فشار) یک موج صوتی که از یک بلندگوی کوچک در هوا منتشر می‌شود، در شکل ۱-۳۱ نشان داده شده است.

پرسش ۱-۳

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

می‌شوند.



شکل ۱-۳۲

اگر یک چشمه‌ی صوت، صوت را به‌طور یکنواخت در تمام جهت‌ها گسیل کند، صوت به‌صورت موج کروی در فضا منتشر می‌شود. جبهه‌های موج این امواج به‌صورت کره‌هایی به‌مرکز چشمه‌ی صوت در شکل ۱-۳۲ 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 ۲۰ تا ۲۰,۰۰۰ هرتز است، بشنود. بعضی حیوان‌ها مانند سگ‌ها گستره‌ی وسیع‌تری از بسامدها (۱۵ تا ۵۰,۰۰۰ هرتز) را می‌شنوند. خفاش‌ها تا بسامد ۱۰۰,۰۰۰ هرتز را نیز می‌شنوند. موج‌های صوتی با بسامد پایین‌تر از ۲۰ Hz را فروصوت و بالاتر از ۲۰,۰۰۰ Hz را فراصوت می‌نامند. موج‌های فراصوت کاربردهای فراوانی در پزشکی و صنعت دارند.

۱-۵- سرعت صوت

در فیزیک ۱ 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 ۱-۱ داده شده است. چنان که می‌بینید هرچه ماده متراکم‌تر باشد، سرعت انتشار صوت در آن بیش‌تر است؛ زیرا در ماده‌ی متراکم مولکول‌ها به یک‌دیگر نزدیک‌ترند و تپ ایجاد شده می‌تواند در زمان کم‌تری به نقطه‌ی مجاور خود منتقل شود.

جدول ۱-۱- سرعت صوت در ماده‌های مختلف*

سرعت (m/s)	دما (°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 رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \quad (11-1)$$

که در آن T دمای گاز برحسب کلوین، R ثابت عمومی گازها و M جرم مولکولی گاز است. γ نیز ضریب اتمیسیته‌ی گاز نام دارد که برای گازهای مختلف در جدول ۱-۲ داده شده است.

جدول ۱-۲- 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 ۱-۳

سرعت انتشار صوت را در هوا و در دمای 27°C به‌دست آورید (برای هوا

$$(R \approx 8/3 \text{ J/mol.K} \text{ و } \gamma = 1/4, M = 29 \text{ g})$$

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی ۱-۱۱ داریم :

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

تمرین ۱-۳

با استفاده از اطلاعات جدول ۱-۲ سرعت صوت را در گازهای اکسیژن، نیتروژن و هلیوم در دمای صفر درجه‌ی سلسیوس محاسبه و نتیجه‌ی به‌دست آمده را با مقادیر جدول ۱-۱ مقایسه کنید.

مطالعه‌ی آزاد

کاربرد موج‌های صوتی

برای تعیین محل جسم‌هایی که زیر آب قرار دارند، از بازتاب موج‌های صوتی استفاده می‌شود. این روش که به نام روش پژواک تپ معروف است کاربردهای پزشکی نیز دارد.

اساس این روش آن است که یک موج صوتی را به عمق آب می‌فرستند و با یک آشکارساز، بازتاب یا پژواک آن را اندکی بعد دریافت می‌کنند. سپس زمان رفت و برگشت موج را به دقت اندازه می‌گیرند و از روی آن فاصله‌ی جسمی را که موج را بازتابانده است تعیین می‌کنند. (سرعت صوت در آب مشخص است) با این روش عمق دریاها، محل صخره‌های زیر آب، محل کشتی‌های غرق شده، زیر دریایی‌ها و حتی محل تجمع گروهی از ماهی‌ها را که باهم حرکت می‌کنند می‌توان تعیین کرد.

با این روش می‌توان ساختار داخلی زمین را نیز مشخص کرد. برای این منظور یک انفجار زیرزمینی ایجاد می‌کنند و با آشکارسازی بازتاب موج‌های تولید شده در اثر انفجار می‌توان ساختار نواحی مختلف زمین را تعیین کرد. این روش در اکتشاف نفت و مواد معدنی به کار می‌رود.

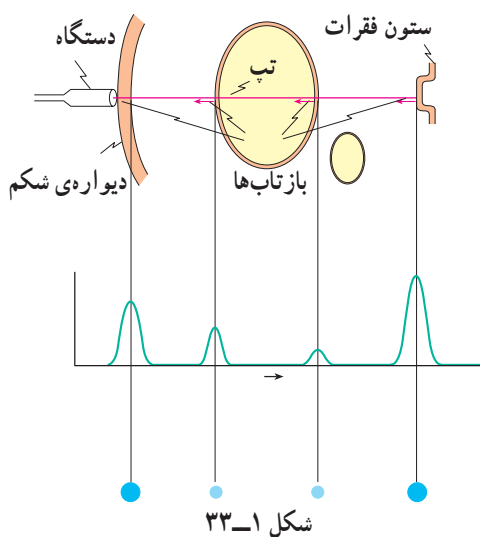
در کاربردهای بالا اغلب از بسامدهای بیش از 20 kHz که در ناحیه‌ی فراصوتی قرار دارد استفاده می‌شود؛ زیرا این موج‌ها علاوه بر این که قابل شنیدن نیستند دارای طول موج کوتاه‌اند و اجسام با ابعاد کوچک را می‌توان با استفاده از آن‌ها آشکار کرد.

در پزشکی هم از این موج‌ها برای از بین بردن بافت‌های ناخواسته و یا اجسام نامطلوب در بدن (مانند غده‌ها و یا سنگ‌های کلیه) استفاده می‌شود. این موج‌ها بر روی

ماده‌ی ناخواسته متمرکز می‌شوند؛ برای مثال، تابش متمرکز این موج‌ها بر روی سنگ کلیه باعث می‌شود که سنگ به پاره‌های کوچک شکسته شده و به تدریج از بدن دفع گردند. بدون این که احتیاجی به عمل جراحی باشد.

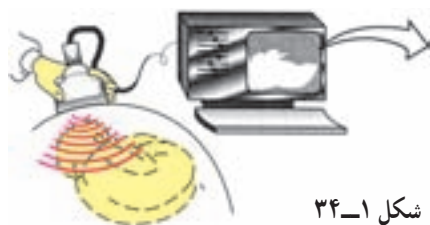
از موج‌های فراصوتی هم‌چنین در تشخیص بیماری نیز استفاده می‌شود. بدین ترتیب که یک تپ فراصوتی به داخل بدن بیمار فرستاده می‌شود. این تپ از مرزها و فصل مشترک‌های بین اعضای داخل بدن بازتاب می‌یابد که با آشکارسازی آن می‌توان اطلاع لازم را در مورد بیماری عضو مورد نظر کسب کرد. این روش برای تشخیص محل غده‌ها و 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 ۱-۳۳). آشکارسازی تپ‌های بازتابیده، با همان دستگاه صورت می‌گیرد که موج‌های صوتی را به تپ‌های الکتریکی تبدیل می‌کند. تپ‌ها را می‌توان روی یک مونیتر مشاهده کرد (شکل ۱-۳۴).

تصویر یک جنین که با استفاده از فراصوت تهیه شده نیز در این شکل نشان داده شده است.



۱-۶- 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 لوله‌ی صوتی می‌نامند. هنگامی که در دهانه‌ی لوله‌ی 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 لوله‌ی صوتی باز و انتهای دیگر بسته و یا این که هر دو انتهای آن باز باشد، دو حالت متفاوت به‌وجود می‌آید که به بررسی آن‌ها می‌پردازیم:

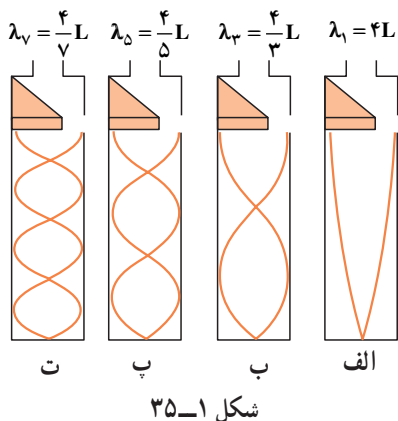
الف: یک انتهای لوله باز و انتهای دیگر آن بسته است. در این حالت در انتهای باز شکم و در انتهای بسته گره تشکیل می‌شود. در ساده‌ترین حالت، مطابق شکل ۱-۳۵- الف فقط یک گره و شکم در داخل لوله تشکیل می‌شود (در این شکل موج‌های صوتی داخل لوله برای سهولت نمایش به صورت موج‌های عرضی نشان داده شده‌اند. پیشینه‌ی دامنه در این شکل حالتی را نشان می‌دهد که در آن جابه‌جایی ذرات لایه‌ی هوا پیشینه است) در این حالت طول لوله، L ، با فاصله‌ی گره تا شکم برابر است یعنی:

$$L = \frac{\lambda_1}{4} \quad (12-1)$$

و یا طول موج صوت برابر است با:

$$\lambda_1 = 4L \quad (13-1)$$

اگر سرعت صوت در داخل لوله v باشد، بسامد این صوت، f_1 ، از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:



$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L} \quad (14-1)$$

موج ایستاده‌ی 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 ۱-۳۵ - ب، پ، ... تعداد بیش‌تری گره و شکم در لوله تشکیل می‌شود یعنی

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

$$\lambda_{2n-1} = \frac{4L}{2n-1} \quad \text{و} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (15-1)$$

و بسامد این صوت برابر است با:

$$f_{2n-1} = \frac{(2n-1)v}{4L} = (2n-1)f_1, \quad n = 1, 2, \dots \quad (16-1)$$

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 لوله‌ی صوتی که یک انتهای آن بسته است به‌شمار می‌روند.

مثال ۱-۴

در یک لوله‌ی 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 رابطه‌ی $v = \lambda f$ داریم :

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

در این صورت با استفاده از رابطه‌ی ۱-۱۲ طول لوله برابر است با :

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

ب : با استفاده از رابطه‌ی ۱-۱۶ برای $n=2$ و $n=3$ داریم :

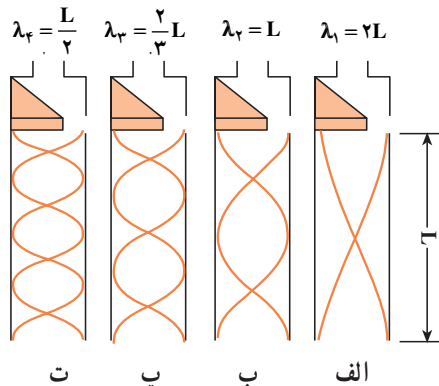
$$f_3 = (2 \times 2 - 1) 340 = 1020 \text{ Hz}$$

$$f_5 = (2 \times 3 - 1) \times 340 = 1700 \text{ Hz}$$

ب: هر دو انتهای لوله باز است. در این حالت در هر دو انتها شکم تشکیل می‌شود. برای صوت اصلی، همان‌طور که در شکل ۱-۳۶ الف نشان داده شده است، دو شکم در دو انتها و یک گره در وسط لوله تشکیل می‌شود. در این حالت طول لوله برابر فاصله‌ی دو شکم است. در این صورت داریم :

$$L = \lambda_1 / 2 \quad (17-1)$$

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



شکل ۱-۳۶

در نتیجه بسامد اصلی برابر است با :

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L} \quad (18-1)$$

همان‌گونه‌های دیگر این صوت هنگامی پدیدار می‌شوند که مطابق شکل ۱-۳۶ 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 رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad n = 1, 2, \dots \quad (19-1)$$

و بسامد این صوت برابر است با:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n \frac{v}{2L} = n f_1 \quad n = 1, 2, \dots \quad (20-1)$$

ملاحظه می‌کنید که تمام هماهنگ‌ها در لوله‌ای که هر دو انتهای آن باز است ایجاد می‌شود. در چنین لوله‌ای، بسامد نوسان‌های طبیعی هوای داخل آن به صورت f_1 ، $2f_1$ ، $3f_1$ و ... است.

تمرین ۱-۴

بسامد صوت اصلی و هماهنگ‌های دوم و سوم را در یک لوله‌ی 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 دهانه‌ی لوله‌ی 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 پدیده‌ی تشدید استفاده کنیم. در فصل سوم فیزیک (۱) با پدیده‌ی 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 لوله‌ی 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 دیافازون را در نزدیکی دهانه‌ی لوله به نوسان درآوریم. اگر بسامد نوسان این دیافازون با هریک از بسامدهای طبیعی لوله‌ی صوتی برابر باشد، تشدید رخ خواهد داد. بدین وسیله می‌توان موج ایستاده با بسامد موردنظر را در لوله‌ی صوتی ایجاد کرد.

فعالیت ۲-۱

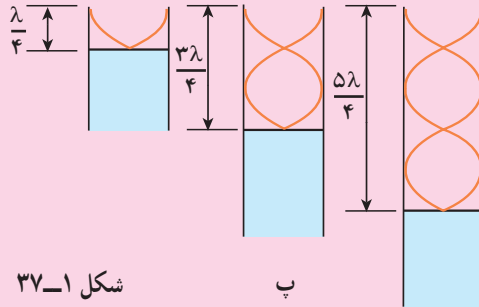


ب

در شکل ۱-۳۷ الف و ب می‌توان با تغییر مکان لیوان یا لوله، طول لوله‌ی صوتی را تغییر داد. با توجه به شکل پ توضیح دهید که در هر یک از سه حالت شکل پ چگونه موج ایستاده تشکیل می‌شود؟



الف



شکل ۱-۳۷

ب

فعالیت ۳-۱

با استفاده از یک لوله‌ی صوتی، آزمایشی را برای اندازه‌گیری سرعت صوت در هوا طراحی کنید.

فعالیت ۱-۴

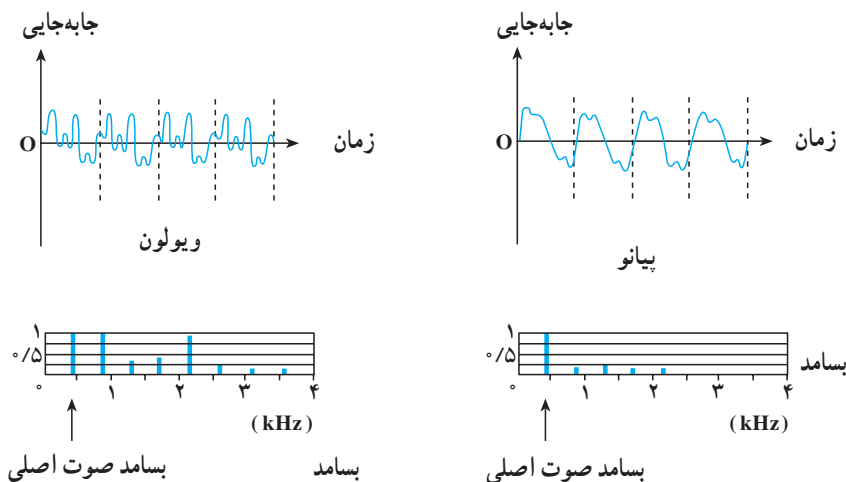
یک لوله‌ی صوتی باز بسازید که بسامدی برابر با ۴۳۵ هرتز (la_3) در گام طبیعی (به مطالعه‌ی آزاد زیر مراجعه کنید)) تولید کند.

مطالعه‌ی آزاد

صوت‌های موسیقی

صوتی را که می‌شنویم به خصوصیت‌های گوش و سازوکار شنوایی و نیز ویژگی‌های فیزیکی صوت بستگی دارد. معمولاً صوتی را که انسان با دستگاه شنوایی خود درک می‌کند برحسب سه مشخصه‌ی بلندی، ارتفاع و ظنین 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 ۱-۳۸ نسبت موج صوتی حاصل از پیانو و ویولون نشان داده شده است. در این شکل، نسبت دامنه‌ی هماهنگ‌ها به دامنه‌ی صوت اصلی نیز آمده است. در هر دو مورد بسامد صوت اصلی 440 هرتز است؛ ولی تعداد و دامنه‌ی 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. ظنین صوت به شکل موج مرکب بستگی دارد. یعنی ظنین به نوع، تعداد و دامنه‌ی 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



شکل ۳۸-۱

شنونده بستگی دارد.

اکنون به توصیف صوت‌های موسیقی می‌پردازیم. برای این منظور لازم است چند مفهوم را تعریف کنیم.

۱- صوت موسیقی یا نت، صوتی است که (مانند شکل ۳۸-۱) از ارتعاش‌های منظم تشکیل شده است و اثر خوشایندی بر گوش انسان دارد.

۲- فاصله‌ی موسیقی، نسبت بسامد دو نت را فاصله‌ی موسیقی می‌نامند. تجربه نشان می‌دهد که هر فاصله‌ای برای انسان خوشایند نیست.

۳- گام موسیقی، مجموعه‌ای از چند نت است که فاصله‌ی آن‌ها برای گوش خوشایند است. گام‌های متفاوتی در موسیقی وجود دارد. اکنون به توصیف گام طبیعی (زارلن) می‌پردازیم.

گام طبیعی از هشت نت $do_1, re, mi, fa, sol, la, si, do_2$ تشکیل شده است که فاصله‌ی آن‌ها از یک نت مینا (do_1) که کم‌ترین بسامد را دارد، به صورت زیر است:

$$\frac{re}{do_1} = \frac{9}{8}, \quad \frac{mi}{do_1} = \frac{5}{4}, \quad \frac{fa}{do_1} = \frac{4}{3}, \quad \frac{sol}{do_1} = \frac{3}{2}, \quad \frac{la}{do_1} = \frac{5}{3}, \quad \frac{si}{do_1} = \frac{15}{8}$$

بسامد $do_2 = 2 \frac{do_1}{do_1}$ دو برابر بسامد do_1 است و اکتاو do_1 نامیده می‌شود. اگر do_2

رانت مبنا بگیریم، با رعایت فاصله‌های فوق می‌توان گام دوم را ساخت. به همین ترتیب می‌توان بر مبنای do_3 که اکتاو do_2 است گام سوم را ساخت و به همین ترتیب ادامه داد. به‌عنوان مثال، اگر بسامد نت مبنا را $65/25$ هرتز اختیار کنیم، با استفاده از نسبت‌های بالا می‌توانیم بسامد نت‌های دیگر را به‌دست آوریم؛ در این صورت داریم:

$$\frac{re_1}{do_1} = \frac{9}{8}$$

$$re_1 = \frac{9}{8} do_1 = 73/41 \text{ Hz}$$

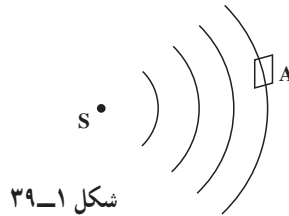
به همین ترتیب بسامدهای $81/56$ ، 87 ، $97/88$ ، $108/75$ و $122/34$ هرتز به ترتیب برای me_1 ، fa_1 ، sol_1 ، la_1 ، si_1 به‌دست می‌آیند. برای do_2 که اکتاو do_1 است بسامد $130/5$ هرتز محاسبه می‌شود. اکنون می‌توانیم بر مبنای do_2 گام بعدی را بسازیم. برای نت‌های این گام به ترتیب مقدارهای $146/81$ ، $163/13$ ، 174 ، $195/75$ ، $217/5$ ، $244/69$ هرتز به‌دست می‌آیند. هر یک از این نت‌ها 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 می‌آیند. این مثال، نت‌های گام طبیعی را بر مبنای قرارداد $la_3 = 435 \text{ Hz}$ به‌دست می‌دهد. اکنون به‌عنوان تمرین تعیین کنید که بسامدهای 1044 و 870 هرتز بسامد چه نت‌هایی هستند و در کدام گام قرار دارند؟

۷-۱- شدت صوت

در بخش ۱-۱ دیدیم که موج‌ها (در طناب یا سطح آب) با خود انرژی حمل می‌کنند و این انرژی با مجذور دامنه و مجذور بسامد موج متناسب است ($E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$). این بیان در مورد موج‌های صوتی نیز درست است. در شکل ۱-۳۹ چشمه‌ی صوتی S را می‌بینید که موج‌های صوتی را در فضا منتشر می‌کند. فرض کنید انرژی E در زمان t به سطح A که عمود بر راستای انتشار صوت است برسد. شدت صوت بنا به تعریف عبارت است از: مقدار انرژی‌ای که در واحد زمان به واحد سطح عمود بر راستای انتشار می‌رسد؛ در نتیجه، شدت صوت I در مکانی که سطح A قرار گرفته با رابطه‌ی صفحه‌ی بعد بیان می‌شود:

$$I = \frac{E}{At}$$

(۲۱-۱)



شکل ۱-۳۹

رابطه‌ی ۲۱-۱ را می‌توان با استفاده از تعریف توان ($P = \frac{E}{t}$) به صورت زیر نوشت:

$$I = \frac{P}{A}$$

(۲۲-۱)

یکای شدت موج در SI وات بر مترمربع (W/m^2) است.

مثال ۱-۵

به سطح یک میکروفون که مساحت آن 3cm^2 است در مدت ۵ ثانیه $1/5 \times 10^{-11}\text{J}$ انرژی صوتی می‌رسد. شدت صوت در سطح میکروفون چه مقدار است؟ (سطح میکروفون عمود بر راستای انتشار صوت است).

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی ۲۱-۱ داریم:

$$I = \frac{E}{At} = \frac{1/5 \times 10^{-11}}{3 \times 10^{-4} \times 5} = 10^{-8} \text{ W/m}^2$$

اکنون ممکن است این پرسش پیش بیاید که: چرا هرچه از چشمه‌ی صوت دور می‌شویم صدا

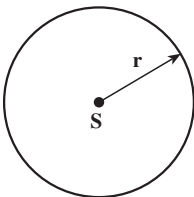
ضعیف‌تر می‌شود؟ برای پاسخ دادن به این سؤال چشمه‌ی صوت S را

در نظر می‌گیریم که موج‌های کروی در فضا ایجاد می‌کند (شکل ۱-۴۰).

فرض کنید توان چشمه‌ی صوت P باشد. شدت صوت در روی

کره‌ای به شعاع r چه قدر است؟ اگر از اتلاف انرژی صوتی در هوا صرف نظر

کنیم، در واحد زمان انرژی P به سطح کره‌ای به مساحت $4\pi r^2$ می‌رسد.

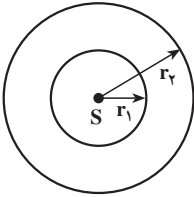


شکل ۱-۴۰

در نتیجه شدت صوت بر روی این کره برابر است با :

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (23-1)$$

این رابطه نشان می‌دهد که با دور شدن از چشمه‌ی S شدت صوت کاهش می‌یابد. حال برای این که بینیم این کاهش به چه نسبتی صورت می‌گیرد، دو جبهه‌ی موج کروی به شعاع‌های r_1 و r_2 در نظر می‌گیریم (شکل ۴۱-۱).



شکل ۴۱-۱

انرژی‌ای که در واحد زمان به سطح کره‌ای با شعاع r_1 می‌رسد (P_1) با انرژی‌ای که در واحد زمان به سطح کره‌ای با شعاع r_2 می‌رسد (P_2) برابر است. بنابراین داریم :

$$P_1 = P_2 \quad (24-1)$$

$$I_1 = \frac{P_1}{4\pi r_1^2} \quad \text{شدت صوت روی سطح کره‌ی ۱ برابر است با :}$$

$$I_2 = \frac{P_2}{4\pi r_2^2} \quad \text{و روی سطح کره‌ی ۲ برابر است با :}$$

با جای گذاری این رابطه‌ها در رابطه‌ی ۴۱-۱ داریم :

$$4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2$$

و یا

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \quad (25-1)$$

همان‌طور که این رابطه نشان می‌دهد، شدت صوت با مجذور فاصله از چشمه‌ی صوت نسبت عکس دارد.

مثال ۶-۱

شدت صوت یک سخنان در یک سالن در فاصله‌ی ۴ متری 10^{-6} W/m^2 است. شدت صوت او در فاصله‌ی ۲۰ متری چه قدر است؟

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی ۲۵-۱ داریم :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

با جای گذاری مقادیر r_1 و r_2 داریم :

$$\frac{I_2}{10^{-6}} = \left(\frac{4}{20}\right)^2 = \frac{1}{25}$$

$$I_2 = 4 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$$

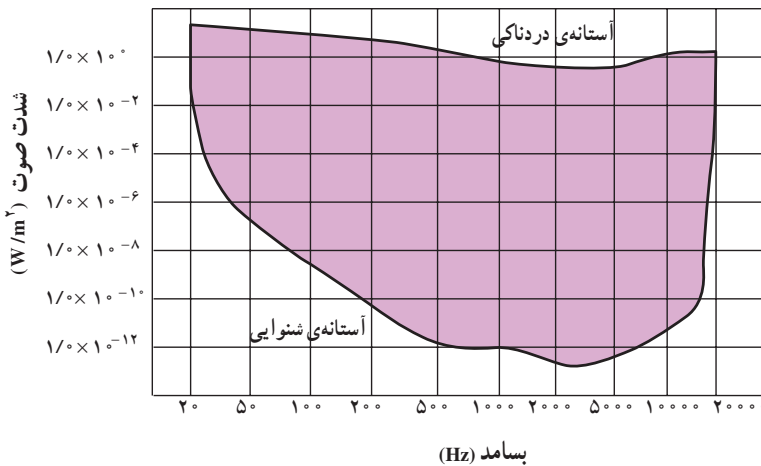
یعنی در مقایسه با فاصله ۴ متری، شدت صوت در فاصله ۲۰ متری ۲۵ مرتبه کاهش می یابد. به نظر شما آیا این بدان معنا است که صوت در فاصله ۴ متری ۲۵ بار بلندتر از صوت در فاصله ۲۰ متری شنیده می شود؟

شدت صوت برای برخی صوت ها در جدول ۱-۳ آمده است.

جدول ۱-۳- شدت صوت و تراز شدت صوت برای برخی صوت ها

تراز شدت صوت dB	شدت صوت W/m ²	صدا
۰	۱۰ ^{-۱۲}	شدت صوت مینا
۱۰	۱۰ ^{-۱۱}	نفس کشیدن
۲۰	۱۰ ^{-۱۰}	برگ درختان در نسیم صحبت کردن از فاصله ی
۴۰	۱۰ ^{-۸}	یک متری
۶۰	۱۰ ^{-۶}	همهمه در فروشگاه سروصدای خودروها در
۷۰	۱۰ ^{-۵}	خیابان شلوغ
۱۲۰	۱	آستانه ی دردناکی (برای بسامد ۱۰۰۰ Hz)
۱۳۰	۱۰	مسلسل غرش هواپیمای جت
۱۴۰	۱۰ ^۲	درحین بلندشدن راکت فضایی، در موقع
۱۷۰	۱۰ ^۵	بلندشدن

آهسته‌ترین صدایی (کم‌ترین شدت) را که انسان می‌تواند بشنود آستانه‌ی شنوایی می‌نامند، و بلندترین صدایی (بیشینه‌ی شدت) که انسان می‌تواند بشنود بدون این که گوش او به درد آید آستانه‌ی دردناکی می‌نامند. آستانه‌ی شنوایی و آستانه‌ی دردناکی به بسامد بستگی دارند. نمودار شدت صوت در آستانه‌ی شنوایی و دردناکی را به صورت تابعی از بسامد، در شکل ۴۲-۱ مشاهده می‌کنید.



شکل ۴۲-۱

پرسش ۴-۱

با استفاده از نمودار شکل ۴۲-۱ تعیین کنید که آستانه‌ی شنوایی و دردناکی در بسامد $10,000$ هرتز تقریباً چه قدر است.

هرچه شدت صوت بیش‌تر باشد، مقدار انرژی‌ای که گوش دریافت می‌کند بیش‌تر است و انسان صدا را بلندتر احساس می‌کند، با این حال، این به معنای آن نیست که بلندی صوت با شدت آن نسبت مستقیم دارد؛ پس اگر شدت صوت دو برابر شود، بلندی صدایی که احساس می‌کنیم دو برابر نمی‌شود. در جدول ۳-۱ می‌بینید که شدت صوت در غرش هواپیما $10^2 W/m^2$ و شدت صوت در گفت و گوی بین دو نفر $10^{-8} W/m^2$ است؛ یعنی، شدت غرش هواپیمای جت 10^{10} برابر شدت گفت و گو است. ولی می‌دانید که ما غرش هواپیما را هیچ‌گاه 10^0 برابر بلندتر از گفت و گوی دو نفر احساس نمی‌کنیم. به این علت به تعریف تراز شدت صوت که درک انسان را از بلندی صوت بیان می‌کند نیاز داریم: تراز شدت یک صوت عبارت است از لگاریتم (در پایه ده) نسبت شدت آن صوت به شدت صوت مبنا. تراز شدت صوت را با β نشان می‌دهند و یکای آن را به افتخار بل فیزیک‌دان امریکایی

مخترع تلفن، بل (B) و دسی بل (dB) نام گذاری کرده اند. هر بل برابر ده دسی بل است.

$$\beta = \log \frac{I}{I_0} \quad \text{بل (B)} \quad (26-1)$$

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad \text{دسی بل (dB)} \quad (27-1)$$

I. شدت صوت مبنا است که برابر با آستانه‌ی شنوایی گوش سالم در بسامد ۱۰۰۰ هرتز (10^{-12} W/m^2) در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۳-۱ شدت پاره‌ای از صوت‌ها برحسب دسی بل بیان شده است.

مثال ۲-۱

در جدول ۳-۱ شدت صوت آستانه‌ی دردناکی (برای بسامد ۱۰۰۰ Hz) 1 W/m^2 ذکر شده است. تراز شدت صوت را برای آن به دست آورید.

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی ۲۷-۱ داریم:

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{1}{10^{-12}} = 120 \text{ dB}$$

تمرین‌های فصل اول

۱- جرم سیم پیاپی به طول $8/0$ 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؟

۲- کدام یک از عامل‌های زیر بر سرعت صوت در هوا مؤثر است؟

الف: شکل موج ب: دامنه‌ی موج پ: بسامد موج ت: دمای هوا

۳- آزمایشی برای اندازه‌گیری سرعت صوت در آب طراحی کنید.

۴- دلفین، مانند خفاش، از خود فراصوت گسیل می‌کند. طول موج صوت دلفین با بسامد 4×10^5 Hz در آب چه قدر است؟

۵- ناظری در سطح زمین ایستاده است، صدای رعد 5 ثانیه پس از مشاهده‌ی برق به گوش او می‌رسد. اگر دمای هوا 27°C باشد، فاصله‌ی ناظر از محل ایجاد رعد و برق چه مقدار است؟

۶- دانش‌آموزی بین دو صخره‌ی قائم ایستاده است و فاصله‌ی او از صخره‌ی نزدیک‌تر 48 متر است. دانش‌آموز فریاد می‌زند و اولین پژواک صدای خود را پس از 3 ثانیه و صدای پژواک دوم را 2 ثانیه بعد از پژواک اول می‌شنود.

الف: سرعت صوت را در هوا به دست آورید. ب: فاصله‌ی بین دو صخره را محاسبه کنید.

۷- یک انتهای یک لوله‌ی صوتی، باز و انتهای دیگر بسته است. الف: طول لوله برای این که هوای داخل لوله در بسامد اصلی 60 Hz به تشدید درآید چه قدر است؟ ب: با رسم شکل، هماهنگ اصلی و هماهنگ‌های سوم و پنجم آن را نمایش دهید. پ: طول موج صوت اصلی و هماهنگ‌های سوم و پنجم آن را تعیین کنید. سرعت صوت را 340 m/s در نظر بگیرید.

۸- تمرین ۷ را در حالتی که هر دو انتهای لوله‌ی صوتی باز است حل کنید.

۹- طول یک لوله‌ی صوتی که هر دو انتهای آن باز است $1/7$ m است. بسامد هماهنگ سوم این لوله را محاسبه کنید. سرعت صوت را 340 m/s در نظر بگیرید.

۱۰- یک چشمه‌ی صوت موج‌های کروی در هوا گسیل می‌کند. الف: نسبت شدت صوت در دو نقطه که فاصله‌ی آن‌ها از چشمه‌ی 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 می‌آید. علت چیست؟

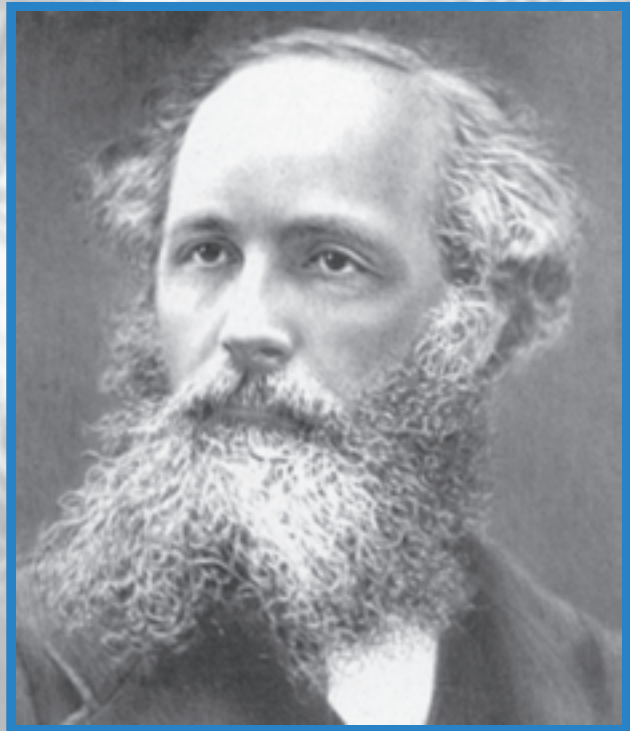
۱۱- دو نفر به فاصله‌های d_1 و d_2 از یک چشمه‌ی صوت ایستاده‌اند. تراز شدت صوت برای

این دو نفر به ترتیب 2 dB و 10 dB است. نسبت $\frac{d_2}{d_1}$ را حساب کنید.

- ۱۲- در فاصله‌ی ۲۰m از چشمه‌ی صوتی تراز شدت صوت ۶۰dB است. با این فرض که جذب صوت به وسیله‌ی هوا قابل چشم‌پوشی است، در چه فاصله‌ای از این چشمه می‌توان صوت را به زحمت شنید. آیا به نظر شما پاسخ به دست آمده منطقی است؟
- ۱۳- پرده‌ی صماخ گوش شخصی به قطر ۷۵/۰ سانتی‌متر، به مدت ۲ ساعت، صوتی با تراز ۹۰dB را جذب می‌کند. در این مدت پرده‌ی گوش چه مقدار انرژی برحسب ژول جذب کرده است؟

۶

موج‌های الکترو مغناطیسی



جیمز کلارک ماکسول

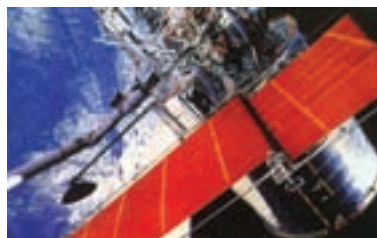
(۱۸۳۱-۱۸۷۹م)

موج های الکترو مغناطیسی

نگاهی به فصل: آیا می دانید انرژی حیاتی مورد نیاز گیاهان، جانوران، انسان و ... از چه

طریق و چگونه به زمین می رسد؟

آیا می دانید رادیو، تلویزیون، تلفن، بی سیم، ماهواره ها و ... بر چه اساسی کار می کنند؟



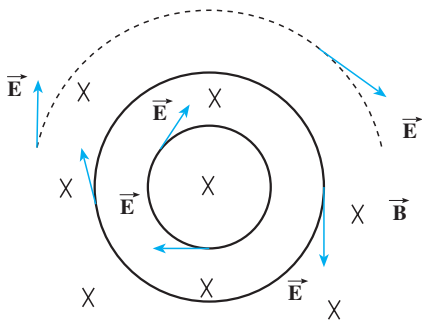
شکل ۲-۱

هر موجود زنده ای در زمین به انرژی خورشید نیاز دارد، به طوری که بدون انرژی خورشید حیات روی کره ی زمین از بین می رود. این انرژی از طریق موج های الکترومغناطیسی به زمین می رسد و در تمام ارتباطات راه دور این موج ها به کار گرفته می شوند. با استفاده از سرعت بالای این امواج می توان خبر رخ دادن هر حادثه را کم تر از چند دهم ثانیه به هر نقطه از زمین رساند. مایکل فارادی دانشمند انگلیسی (۱۸۶۷-۱۷۹۱ میلادی) و جیمز کلارک ماکسول فیزیک دان اسکاتلندی (۱۸۷۹-۱۸۳۱ میلادی) نقش عمده ای در کشف پدیده های الکترومغناطیسی و مطالعه بر روی آن ها داشتند.

در فیزیک ۳ و آزمایشگاه با قانون فارادی آشنا شدیم و دیدیم که اگر شار مغناطیسی گذرنده از

یک مدار بسته تغییر کند، نیروی محرکه ای را در مدار ایجاد می کند که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار متناسب است؛

مثلاً اگر در شکل ۲-۲ میدان مغناطیسی \vec{B} تغییر کند، در اثر تغییر شار یک نیروی محرکه در مدار القا می شود. در واقع و به طور عمیق تر می توان گفت که در اثر تغییر میدان مغناطیسی یک میدان الکتریکی القایی در فضا ایجاد می شود که خط های آن در این شکل نشان داده شده اند این



شکل ۲-۲

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 محرکه‌ی 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، هانزی و فارادی مبانی علم الکتروسیسته 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.

۲-۱- چگونگی تشکیل موج‌های الکترومغناطیس

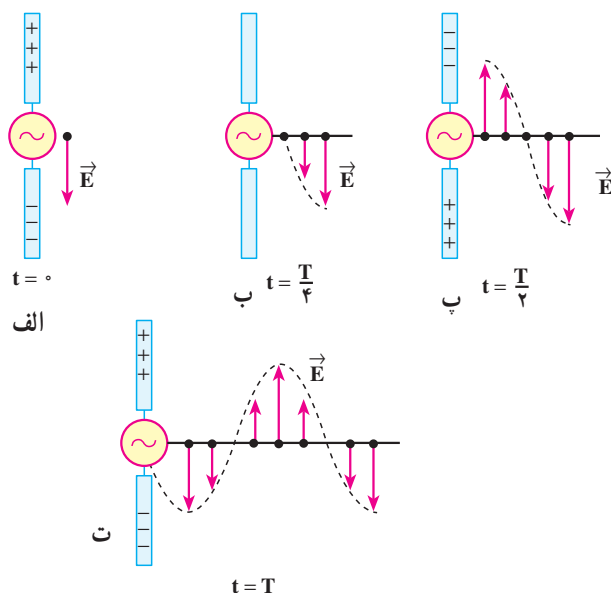
موج‌های الکترومغناطیس از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تشکیل شده‌اند. عامل اصلی ایجاد موج‌های الکترومغناطیسی، ذرات باردار شتاب‌دارند؛ یعنی، وقتی ذره‌ی باردار شتاب‌دار می‌شود بخشی از انرژی خود را به‌صورت موج‌های الکترومغناطیسی گسیل می‌کند، گسیل موج‌های الکترومغناطیسی توسط اجسام را تابش می‌نامند.

مطالعه‌ی آزاد

چگونگی 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 به‌عنوان چشمه‌ی موج‌های الکترومغناطیس در ایستگاه‌های رادیویی، مخابراتی و ... استفاده می‌شود. شکل ۲-۳ نحوه‌ی تولید یک موج الکترومغناطیس را در یک آنتن نشان می‌دهد. دو میله‌ی فلزی به یک مولد متناوب (ac) متصل شده‌اند. چون ولتاژ خروجی این مولد به صورت سینوسی است، بار روی میله‌ها دائماً تغییر می‌کند. در لحظه‌ی $t = 0$ بار روی میله‌ی بالایی بیشینه و مثبت و روی میله‌ی پایینی بیشینه و منفی است. سپس بار این میله‌ها کاهش می‌یابد و در لحظه‌ی $t = \frac{T}{4}$ به صفر می‌رسد (شکل ۲-۳ ب) در ادامه‌ی این حرکت، علامت بار میله‌ها معکوس می‌شود، یعنی بار میله‌ی بالایی منفی و

بار میله‌ی پایینی مثبت می‌شود و مقدار آن نیز افزایش می‌یابد تا در لحظه‌ی $t = \frac{T}{4}$ به یک مقدار بیشینه برسد (شکل ۲-۳-پ). تغییر بار میله‌ها به همین ترتیب ادامه می‌یابد. در زمان $t = 0$ بار مثبت در میله‌ی بالایی و بار منفی در میله‌ی پایینی بیشینه است (شکل ۲-۳-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 ۲-۳- میدان الکتریکی ناشی از نوسان بارهای الکتریکی در آنتن با سرعت نور از آنتن دور می‌شود.

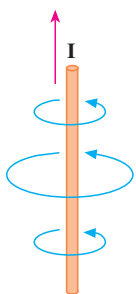
با کاهش بار روی میله‌ها، شدت میدان الکتریکی در نزدیکی میله‌ها، کاهش می‌یابد و میدان الکتریکی بیشینه‌ی رو به پایینی که در لحظه‌ی $t = 0$ تولید شده بود از میله دور می‌شود. هنگامی که بارهای مثبت و منفی روی میله‌ها صفر است (مانند شکل ۲-۳-ب) میدان الکتریکی نیز صفر است. این وضعیت $\frac{1}{4}$ دوره ($t = \frac{T}{4}$) بعد از شروع نوسان پیش می‌آید. با ادامه‌ی این عمل، میله‌ی بالایی، بعد از زمان $t = \frac{T}{4}$ ، دارای بیش‌ترین مقدار بار منفی و میله‌ی پایینی دارای بیش‌ترین بار مثبت می‌شود. در

این حالت میدان الکتریکی ایجاد شده رو به بالاست (شکل ۲-۳-پ) و با ادامه یافتن نوسان بار الکتریکی روی میله‌ها میدان الکتریکی مطابق شکل ۲-۳-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 میله‌ی بالایی مثبت است رو به پایین و وقتی میله‌ی بالایی منفی است، رو به بالاست و اندازه‌ی میدان در هر لحظه به مقدار بار روی میله در آن لحظه بستگی دارد.

با ادامه‌ی نوسان بارهای الکتریکی روی میله‌ها، میدان‌های الکتریکی ایجاد شده با سرعت نور از آنتن دور می‌شوند. در شکل ۲-۳-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 اندازه‌ی 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

آنتن‌اند (شکل ۲-۴). این خط‌ها بر میدان الکتریکی تولید شده در هر نقطه عمودند. 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.

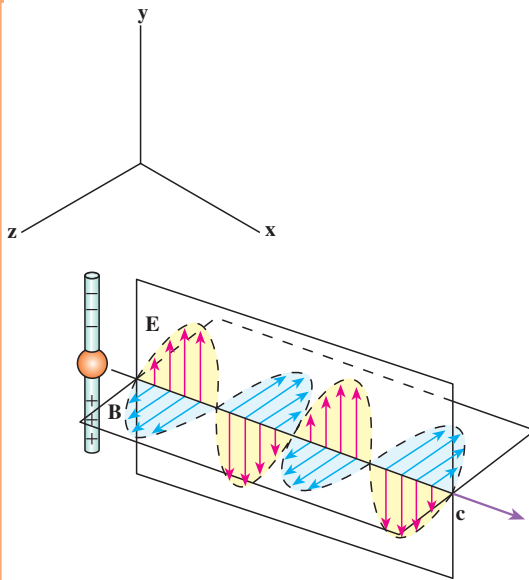


شکل ۲-۴- چگونگی تشکیل خطوط میدان مغناطیسی در اطراف یک آنتن که از آن جریان الکتریکی متغیر می‌گذرد.

تا این‌جا دیدیم که نوسان بارهای الکتریکی روی میله‌ها، در فضا میدان الکتریکی و مغناطیسی متغیر تولید می‌کند. اما علاوه بر این‌ها دو پدیده‌ی 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 پیش‌بینی کرده بود -



شکل ۲-۵- 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.

میدان مغناطیسی ایجاد می کند. این میدان های الکتریکی و مغناطیسی القایی هم فازند؛ یعنی، در هر نقطه هر دو میدان هم زمان با هم پیشینه یا کمینه می شوند (شکل ۲-۵). علاوه بر این میدان های الکتریکی و مغناطیسی بر یک دیگر و هر دوی آنها بر راستای حرکت موج عمودند. در نتیجه ی این دو پدیده و مواردی که در بالا ذکر شد، یک موج الکترومغناطیسی ایجاد می شود که در فضا منتشر می شوند (شکل ۲-۵).

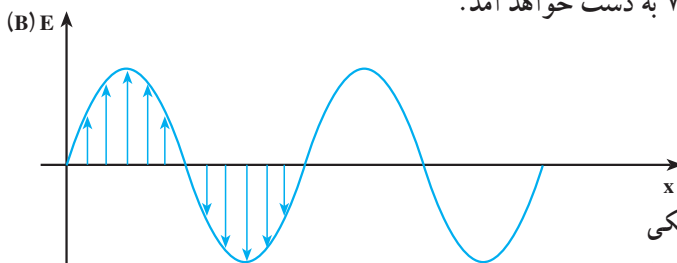
موج های الکترومغناطیسی نیز، مانند موج های مکانیکی، در زمان و مکان تغییر می کنند، با این تفاوت که در موج های مکانیکی ذره های تشکیل دهنده ی محیط نوسان می کنند و در موج های الکترومغناطیسی، میدان های الکتریکی و مغناطیسی در هر نقطه از فضا به طور نوسانی تغییر می کنند. همین موضوع سبب می شود که موج های الکترومغناطیسی برای انتشار خود، الزاماً به محیط مادی نیاز نداشته باشند و در خلأ نیز منتشر شوند.

برای بیان چگونگی انتشار موج های الکترومغناطیسی نیز می توانیم، همان طور که در مورد موج های مکانیکی انجام دادیم، از نمودارهای میدان های الکتریکی (و یا مغناطیسی) بر حسب مکان یا زمان استفاده کنیم. ابتدا تغییرات میدان الکتریکی را توصیف می کنیم.

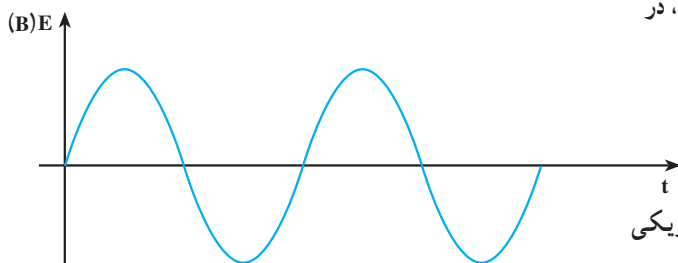
یک موج الکترومغناطیسی را در نظر می گیریم که در جهت محور x منتشر می شود. نمودار میدان الکتریکی بر حسب مکان این موج در شکل ۲-۶ رسم شده است. این نمودار، میدان الکتریکی را در تمام نقطه ها در امتداد محور x و در یک لحظه نشان می دهد. می بینید که در جهت محور x ، میدان الکتریکی افزایش می یابد تا به یک مقدار پیشینه برسد، سپس کاهش می یابد و صفر می شود و در

ادامه، همین تغییرات در جهت عکس صورت می‌گیرد.

تغییرات میدان الکتریکی در یک نقطه از فضا را نیز می‌توان با استفاده از نمودار میدان الکتریکی برحسب زمان نشان داد. این نمودار در شکل ۷-۲ رسم شده است. مشاهده می‌کنید که مقدار میدان در این نقطه، از صفر تا مقدار بیشینه افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد و دوباره به صفر می‌رسد. پس از آن جهت میدان معکوس می‌شود. در این جهت نیز میدان از صفر تا مقدار بیشینه افزایش می‌یابد و دوباره کاهش می‌یابد تا به صفر برسد و این نوسان‌ها به همین ترتیب ادامه می‌یابد. نمودار میدان مغناطیسی برحسب مکان و میدان مغناطیسی برحسب زمان را نیز می‌توان مانند نمودارهای مربوط به میدان الکتریکی رسم کرد که باز هم نمودارهایی مانند شکل‌های ۶-۲ و ۷-۲ به دست خواهد آمد.

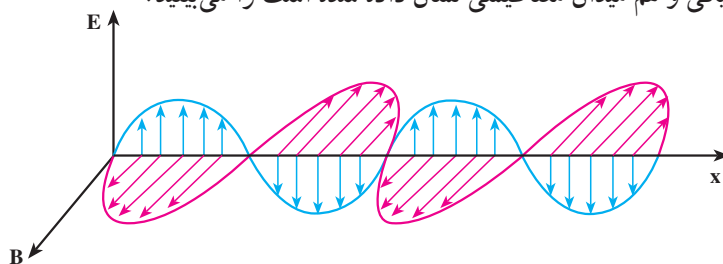


شکل ۶-۲- نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی) برحسب مکان، یک موج الکترومغناطیسی در امتداد محور x ، در یک لحظه از زمان.



شکل ۷-۲- نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی) برحسب زمان، یک موج الکترومغناطیسی در یک نقطه از محور x .

در شکل ۸-۲ نمودارهای میدان الکترومغناطیسی برحسب مکان که در آن هم میدان الکتریکی و هم میدان مغناطیسی نشان داده شده است را می‌بینید.



شکل ۸-۲- نمودار میدان الکترومغناطیسی برحسب 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 فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی متوالی از موج است که در آن دو نقطه میدان‌های الکتریکی (و یا مغناطیسی) هم‌فازند. سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی نیز، همچون موج‌های مکانیکی از رابطه‌ی $v = \lambda f$ به دست می‌آید.

پرسش ۱-۲

با توجه به شکل ۵-۲ توضیح دهید که موج‌های الکترومغناطیسی طولی‌اند یا عرضی؟

۲-۲- 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 «c» از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1-2)$$

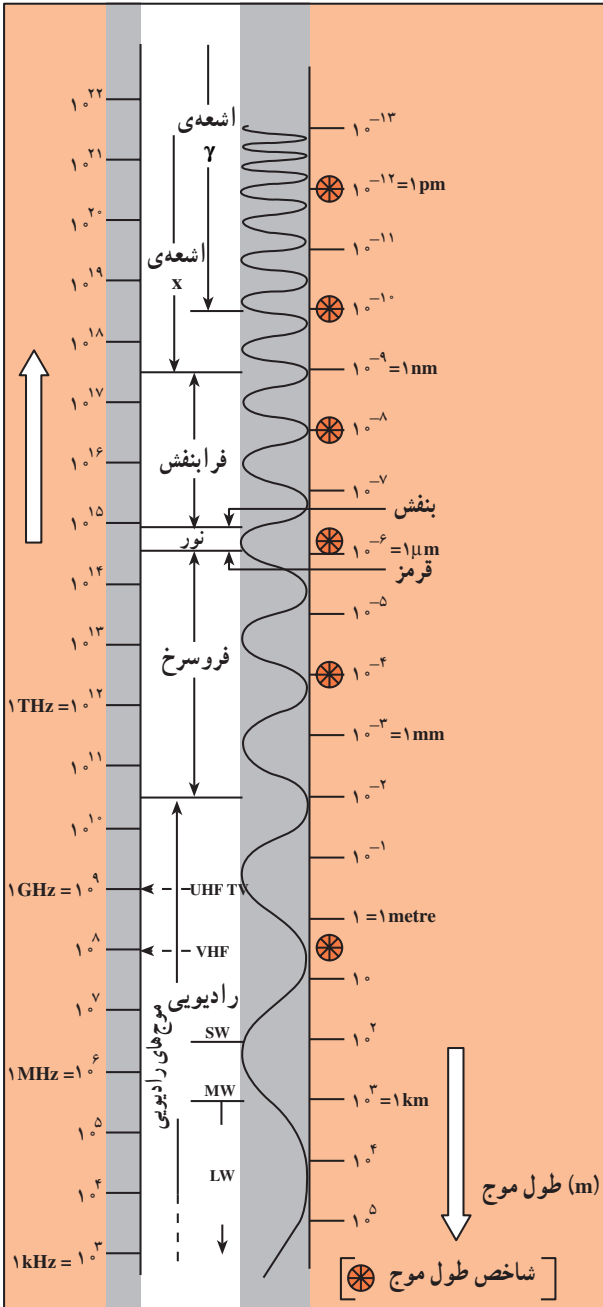
که در آن ϵ_0 ضریب گذردهی الکتریکی در خلأ و μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ است. از فیزیک ۳ و آزمایشگاه به یاد دارید که $C^2/N.m^2 \approx 10^{-12} \times 1/85 \times 10^{-12}$ و $\epsilon_0 \approx 10^{-7} T.m/A$ و $\mu_0 = 4\pi$ است. با قرار دادن مقادیر بالا در رابطه‌ی ۱-۲ سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی در خلأ به دست می‌آید:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{1/85 \times 10^{-12} \times 4\pi \times 10^{-7}}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

که این مقدار برابر سرعت انتشار نور در خلأ است.

۲-۳- طیف موج‌های الکترومغناطیسی

موج‌های الکترومغناطیسی طیف گسترده‌ای از نظر بسامد (و طول موج) دارند. به نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی، نام‌هایی از قبیل: موج‌های رادیویی، نوری، تابش گرمایی، فرابنفش، X ، γ و ... اتلاق می‌شود. در هر یک از این ناحیه‌ها تابش به طریق خاصی تولید و آشکار می‌شود. جدول



۲-۱ نحوه‌ی تولید، کاربرد و آشکارسازی نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد؛ مثلاً، نور که گستره‌ی کوچکی از این طیف است، مستقیماً بر شبکیه‌ی چشم اثر می‌کند و از این طریق آشکار می‌شود اما آشکارسازی موج‌های رادیویی توسط وسیله‌های الکترونیکی خاصی مانند رادیو، تلویزیون و ... صورت می‌گیرد.

شکل ۲-۹ گستره‌ی (طیف) موج‌های الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. این موج‌ها، طیف پیوسته‌ای را تشکیل می‌دهند. با وجود تفاوت بسیار زیاد در بسامد، نحوه‌ی تولید و آشکارسازی آن‌ها، ماهیت و قانون‌های حاکم بر همه‌ی آن‌ها یکسان است.

شکل ۲-۹- طیف موج‌های الکترومغناطیسی

جدول ۱-۲- نحوه تولید، آشکارسازی و کاربرد طیف موج های الکترومغناطیسی

نام و حدود طول موج	چشمه	وسایل آشکارسازی	بعضی از ویژگی های خاص و کاربرد
پرتو گاما (γ) $1\text{Pm} = 10^{-12}\text{ m}$	هسته ی مواد رادیواکتیو و پرتوهای کیهانی	شمارش 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) $100\text{Pm} = 10^{-10}\text{ m}$	لامپ پرتو X	فیلم عکاسی و صفحه ی فلوروسان	فوتون های بسیار پر انرژی و با قدرت نفوذ زیاد، خیلی خطرناک کاربرد : استفاده در پرتو نگاری، استفاده در مطالعه ی ساختار بلورها، معالجه ی بیماری های پوستی، استفاده در پرتودرمانی
فرا بنفش (uv) $10\text{ nm} = 10^{-8}\text{ m}$	خورشید، جسم های خیلی داغ، جرقه ی الکتریکی، لامپ بخار جیوه	فیلم عکاسی، فوتوسل	ویژگی ها : توسط نیشنه جذب می شود، سبب بسیاری از واکنش های شیمیایی می شود، باخنه های زنده را از بین می برد. کاربرد : لامپ های uv در پزشکی
نور مرئی $600\text{ nm} = 6 \times 10^{-7}\text{ m}$ (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) $100\text{ }\mu\text{m} = 10^{-4}\text{ m}$	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 توسط ماهواره ها
رادیویی 3 m (VHF)	اجاق های مایکروویو، آنتن های رادیویی و تلویزیونی	رادیو و تلویزیون	کاربرد : در آشنزی، رادیو، تلویزیون، مخابرات ماهواره ای و در رادارها برای آشکارسازی هواپیما، موشک و کشتی

پرسش ۲-۲

با استفاده از شکل ۹-۲ موج‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی را به ترتیب افزایش طول موج، نام ببرید.

در شکل ۹-۲ 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 ۱-۲

محدوده‌ی طول موج، امواج الکترومغناطیسی مرئی از 400 nm (میکرون 10^{-6} m) تا 700 nm (میکرون) مربوط به طول موج بنفش تا 700 nm میکرون مربوط به طول موج نور قرمز است. محدوده‌ی بسامد نور مرئی را به دست آورید.

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی $c = \lambda f$ 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 گستره‌ی بسامد نور مرئی بین $4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$ تا $7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ است.

فعالیت ۱-۲

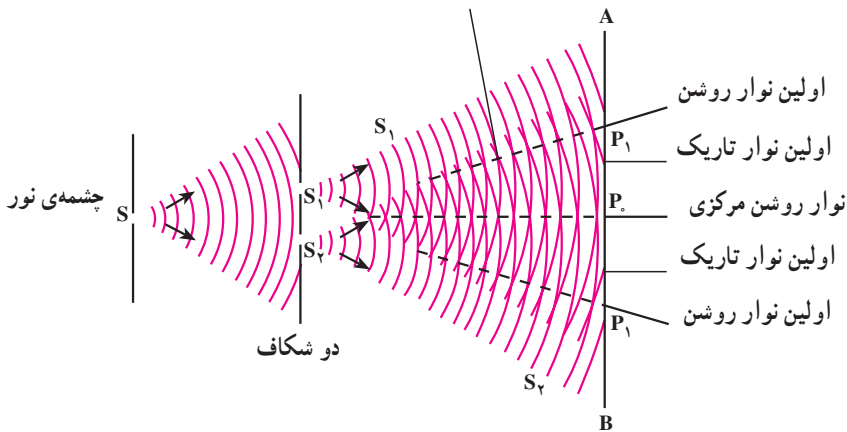
جمله‌های زیر را کامل کنید.

- ۱- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر یک دیگر ...
- ۲- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هر دو بر عمودند. بنابراین موج‌های الکترومغناطیسی از نوع موج‌های
- ۳- نوسان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با یک دیگر
- ۴- موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار نیاز به و انرژی را از محلی به محل دیگر منتقل می‌کنند.
- ۵- همه‌ی موج‌های الکترومغناطیسی با سرعت منتشر می‌شوند.

۲-۴- تداخل موج‌های نوری

در فصل نوسان و موج با تداخل موج‌های مکانیکی آشنا شدیم و در آنجا دیدیم که اگر دو سوزن که به فاصله‌ی 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 همه‌ی 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 پدیده‌ی تداخل در نور هم مشاهده می‌شود.

شکل ۲-۱۰ طرح آزمایش یانگ را نشان می‌دهد. در پشت شکاف باریک S یک چشمه‌ی نور تک‌رنگ (لامپ روشن) قرار می‌دهیم. این شکاف خود مانند یک چشمه‌ی نور عمل می‌کند. در فاصله‌ی 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 چشمه‌ی هم‌بسامد، هم‌دامنه و هم‌فاز عمل می‌کنند و نور را در جهت‌های مختلف گسیل می‌کنند. نورهای گسیل شده از دو چشمه‌ی S_1 و S_2 با یک‌دیگر تداخل کرده و نوارهای تداخلی روشن و تاریک را بر روی پرده‌ی AB که در مقابل شکاف‌ها قرار دارد تشکیل می‌دهند.



شکل ۲-۱۰

دو موجی که به نقطه‌ی P_0 روی محور تقارن دو شکاف می‌رسند، هم‌فازند زیرا آن‌ها دو راه مساوی S_1P_0 و S_2P_0 را تا پرده پیموده‌اند. تداخل این دو موج سازنده است و در نتیجه در محل P_0 روی پرده یک نوار روشن تشکیل می‌شود. این نوار روشن را نوار روشن مرکزی می‌نامیم. برای این که ببینیم در چه شرایطی نوار روشن و در چه شرایطی نوار تاریک تشکیل می‌شود نقطه‌ی P را در شکل ۲-۱۱ 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

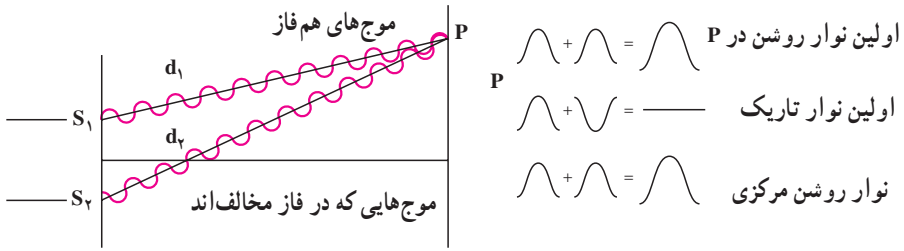
$$\Delta\phi = \pm 2n\pi, \quad n = 0, 1, \dots \quad (2-2)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) = \pm 2n\pi \quad \text{یا:}$$

$$d_2 - d_1 = \pm n\lambda = \pm 2n \frac{\lambda}{2}$$

در این صورت دو پرتویی که به پرده می‌رسند هم‌فازند و تداخل سازنده ایجاد می‌شود و در این نقطه‌ها نوار روشن تشکیل می‌شود. در رابطه‌ی ۲-۲ 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 ۱۱-۲

حال اگر $\Delta\phi$ مضرب فردی از π باشد؛ یعنی:

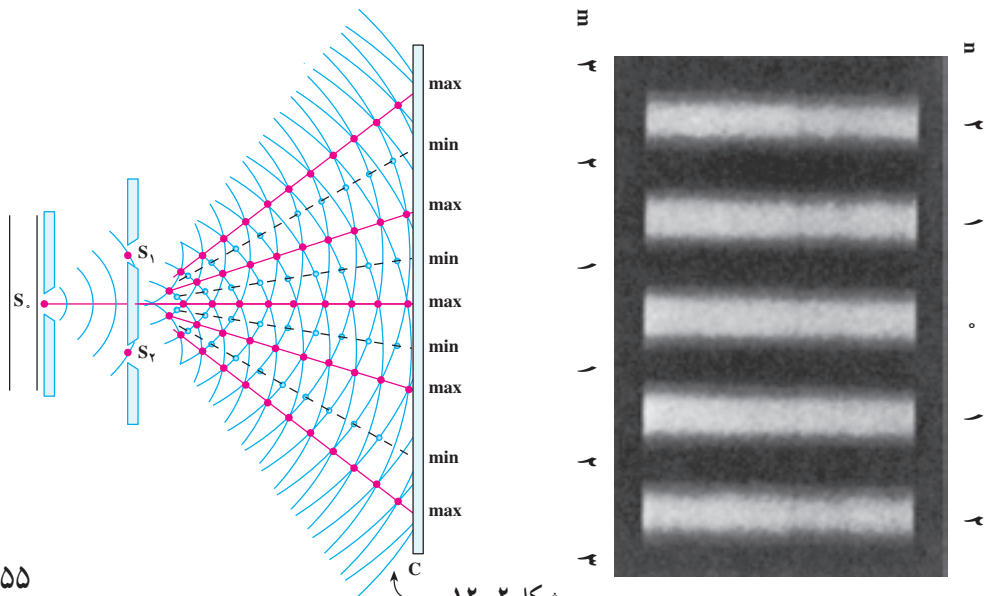
$$\Delta\phi = \pm (2m-1)\pi, \quad m=1,2,\dots \quad (3-2)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda}(d_2-d_1) = \pm(2m-1)\pi \quad \text{یا:}$$

$$d_2-d_1 = \pm(2m-1)\frac{\lambda}{2}$$

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 $m=1, 2, 3, \dots$ 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.

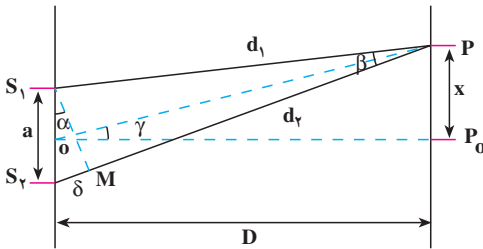
نوارهای روشن و تاریک را که روی پرده تشکیل می‌شوند، طرح تداخلی می‌نامند. شکل ۱۲-۲ طرح تداخلی دو شکاف یانگ را نشان می‌دهد. در دو طرف شکل، شماره‌ی نوارهای روشن که با مقادیر مختلف n و شماره‌ی نوارهای تاریک که با مقادیر مختلف m داده می‌شوند نیز آمده است.



شکل ۱۲-۲

تمرین ۱-۲

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



شکل ۱۳-۲

اندازه‌گیری طول موج: با استفاده

از آزمایش ینگ می‌توان طول موج نور را اندازه‌گیری کرد. در شکل ۱۳-۲ طرحی از این آزمایش رسم شده است. در این شکل، فاصله‌ی دو شکاف از هم a و فاصله‌ی شکاف‌ها از پرده D است. فرض کنید نوار روشن m ام در نقطه‌ی P در فاصله‌ی x از

نوار مرکزی روی پرده تشکیل شده است. دایره‌ای به مرکز P و به شعاع PS_1 رسم می‌کنیم، دایره، PS_2 را در نقطه‌ی 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 فاصله‌ی پرده از صفحه‌ی دو شکاف بسیار بزرگ‌تر از فاصله‌ی دو شکاف، یعنی $D \gg a$ باشد، زاویه‌ی γ و نیز زاویه‌ی β (بین پرتوهایی که به P می‌رسند) بسیار کوچک خواهند بود و می‌توان S_2M 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 زاویه‌ی α کوچک است:

بنابراین:

$$\frac{x}{D} = \frac{\delta}{a}$$

(۴-۲)

برای نور روشن $n\lambda$ م :

$$\frac{x}{D} = \frac{n\lambda}{a} \quad (۵-۲)$$

که از آن رابطه‌ی زیر به دست می‌آید :

$$\lambda = \frac{xa}{nD} \quad (۶-۲)$$

با اندازه‌گیری، فاصله‌ی نور روشن از نور مرکزی می‌توان طول موج را اندازه گرفت.

پرسش ۳-۲

به نظر شما اگر آزمایش ینگ را با نور سفید انجام دهیم، طرح تداخلی چگونه خواهد بود؟

مثال ۲-۲

آزمایش ینگ را با نور زرد سدیم انجام داده‌ایم. فاصله‌ی دو شکاف ینگ از یک دیگر $a = ۱/۲ \text{ mm}$ و فاصله‌ی شکاف تا پرده $۱/۲ \text{ m}$ است؛ اگر فاصله‌ی نور روشن بیستم از وسط نور مرکزی $۱۱/۸ \text{ mm}$ باشد، طول موج نور زرد سدیم چند متر است؟

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی ۶-۲ داریم :

$$\lambda = \frac{a x}{n D} = \frac{۱/۲ \times ۱۰^{-۳} \times ۱۱/۸ \times ۱۰^{-۳}}{۲۰ \times ۱/۲} \approx ۵/۹ \times ۱۰^{-۷} \text{ m} \\ = ۰/۵۹ \mu\text{m}$$

تمرین‌های فصل دوم

۱- شکل ۱۴-۲ طیف موج‌های الکترومغناطیسی را با یک مقیاس تقریبی نشان می‌دهد.

پرتوهای γ	پرتوهای x	P	Q	R	S
------------------	-----------	---	---	---	---

شکل ۱۴-۲

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، کاهش و یا ثابت می‌ماند؟

۲- چهار وجه اشتراک و دو تفاوت برای نور فرورسرخ و امواج رادیویی بیان کنید.
۳- دو دانش‌آموز به نور زرد نگاه می‌کنند. یکی از آن‌ها نور زرد را ترکیب دو نور قرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می‌داند. آزمایش یانگ چگونه می‌تواند ما را قادر سازد تا بین این دو نظر یکی را انتخاب کنیم؟

۴- الف: از یک ایستگاه رادیویی موج الکترومغناطیسی به طول موج 75m گسیل می‌شود. بسامد این موج را حساب کنید.

ب: موج‌های رادیویی با بسامد 12MHz چه طول موجی دارند؟

۵- الف: طول موج نور نارنجی $6/42 \times 10^{-7}\text{m}$ است، بسامد این نور چند هرتز است؟
ب: بسامد نور قرمز در حدود $4/28 \times 10^{14}\text{Hz}$ است، طول موج این نور در هوا و آب را حساب کنید. (سرعت نور در هوا $3 \times 10^8\text{m/s}$ و در آب را $2/25 \times 10^8\text{m/s}$ فرض کنید).
۶- گستره‌ی طول موج‌های رادیویی زیر را به دست آورید.

الف: باند AM در گستره‌ی بسامدی 540 تا 1600 کیلوهرتز

ب: باند FM در گستره‌ی بسامدی 88 تا 108 مگاهرتز

۷- آزمایش یانگ را با نور تک‌رنگ سبز انجام داده و نوارهای تداخلی بر روی پرده‌ی موازی با سطح شکاف‌ها تشکیل داده‌ایم. برای این که فاصله‌ی 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) فاصله‌ی پرده از شکاف‌ها را زیاد کنیم.

(۴) فاصله‌ی دو شکاف را از هم کم کنیم.

۸- اگر آزمایش یانگ عیناً در آب انجام گیرد چه تغییری در وضعیت نوارها نسبت به هوا

حاصل می‌شود؟ توضیح دهید.

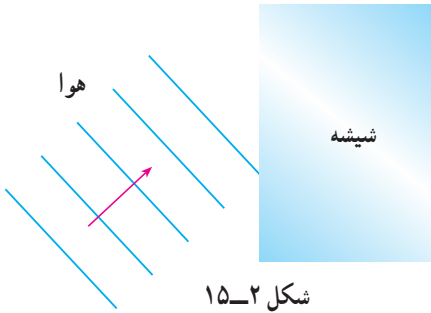
۹- یک صافی مقابل چراغ جیوه قرار می‌دهیم، به طوری که تمام طول موج‌ها به جز ناحیه‌ی

سبز آن جذب می‌شود. با این نور سبز، طرح تداخلی آزمایش یانگ را به فاصله‌ی دو شکاف

$a = 0/6\text{mm}$ روی پرده‌ای به فاصله $D = 2/5\text{m}$ از دو شکاف تشکیل می‌دهیم؛ اگر فاصله‌ی دو

نوار روشن پهلوی هم $2/27\text{mm}$ باشد، طول موج نور سبز را حساب کنید.
 ۱- در آزمایش دو شکاف یانگ، فاصله‌ی دو شکاف 4mm و فاصله‌ی پرده تا دو شکاف 80cm است؛ اگر طول موج نور $6\mu\text{m}$ باشد فاصله‌ی نوار دهم روشن از نوار مرکزی را حساب کنید.

۱۱- در شکل ۱۵-۲ موج‌های نور فرودی



شکل ۱۵-۲

از هوا وارد شیشه می‌شوند. بعضی از آن‌ها در سطح جدایی دو محیط بازتابیده و بعضی شکسته شده وارد شیشه می‌شوند. با استدلال توضیح دهید کدام یک از کمیت‌های زیر برای موج‌های بازتابیده و موج‌های شکسته شده یکسان است؟

- الف : سرعت
 ب : طول موج
 پ : امتداد
 ت : شدت نور
 ث : بسامد

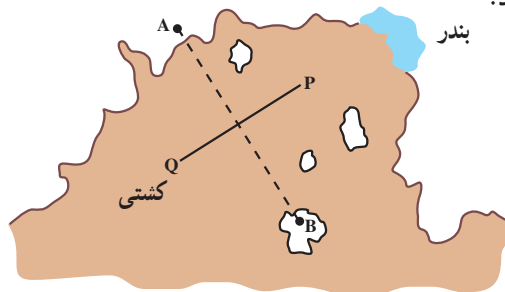
۱۲- در شکل ۱۶-۲ یک خط ساحلی با دو ایستگاه رادیویی دریانوردی زمینی A و B دیده می‌شود که در فاصله‌ی زیادی از هم قرار گرفته‌اند. هر دو ایستگاه پیوسته سیگنال‌های رادیویی گسیل می‌کنند که بسامد آن‌ها $1/5\text{ MHz}$ است.

الف : طول موج این سیگنال‌ها چند متر است؟

ب : یک کشتی از مسیر QP به سوی بندر در حرکت است. هنگامی که این کشتی به نقطه‌ای درست در وسط خط فرضی AB می‌رسد، سیگنالی دریافت می‌کند که دامنه‌ی آن درست دو برابر دامنه‌ی هر موجی است که از یک ایستگاه به تنهایی دریافت می‌کرد. این مشاهده چه موضوعی را درباره‌ی سیگنال‌های گسیل شده از A و B نشان می‌دهد؟

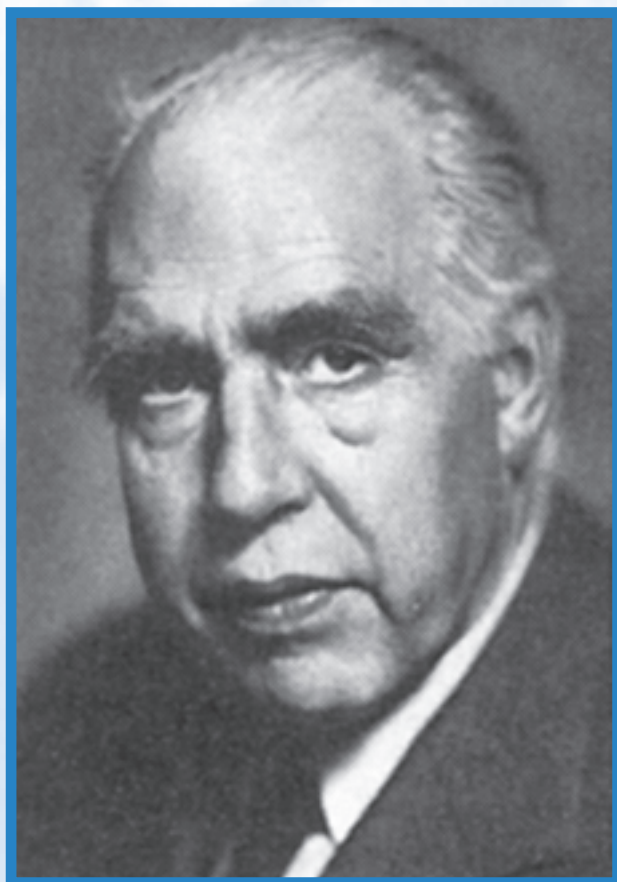
پ : توضیح دهید در شرایط هوای مه‌آلود چگونه می‌توان از این سیگنال‌های رادیویی برای

ادامه‌ی مسیر استفاده کرد؟



شکل ۱۶-۲

آشنایی با فیزیک اتمی



نیلس بور
(۱۸۸۵-۱۹۶۲ م)

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 گرایش، نیروی گراشی 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 سده‌ی نوزدهم میلادی توانسته بودند برای بسیاری از پدیده‌های طبیعی توجیه‌های قانع‌کننده‌ای ارائه کنند. مجموعه‌ی 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 سده‌ی نوزدهم میلادی دانشمندان پدیده‌هایی را مشاهده کردند که دیگر با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند. امروزه به مجموعه‌ی نظریه‌ها و قانون‌هایی که به توجیه این پدیده‌ها می‌پردازد، فیزیک جدید (یا نوین) می‌گویند.

شالوده‌ی فیزیک جدید را نظریه‌های «نسبیت» و «کوانتومی» تشکیل می‌دهد. نظریه‌ی نسبیت مربوط به مطالعه‌ی پدیده‌ها در سرعت‌های بسیار زیاد و نزدیک به سرعت نور است. نظریه‌ی کوانتومی نیز به مطالعه‌ی 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 سده‌ی بیستم مطرح شدند. نظریه‌ی نسبیت را برای نخستین بار آلبرت اینشتین عرضه کرد. نظریه‌ی کوانتومی نیز نتیجه‌ی 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.

۳-۱- نظریه‌ی کوانتومی

در سال ۱۹۰۰ میلادی، پنج سال قبل از آن که اینشتین نظریه‌ی نسبیت را پیشنهاد کند، ماکس پلانک نظریه‌ای ارائه داد که در آن زمان تأثیر شگرف آن بر تحولات بعدی چندان آشکار نبود. نظریه‌ی کوانتومی که توسط پلانک ارائه شد، نخستین نظریه از زنجیره‌ی نظریه‌هایی است که مبانی مکانیک کوانتومی را تشکیل می‌دهد. پلانک نظریه‌ی خود را برای توجیه نتیجه‌های تجربی مربوط به تابش موج‌های الکترومغناطیسی از اجسام ارائه داد. شایان ذکر است که این نتیجه‌ها قابل توجیه با قانون‌های فیزیک کلاسیک نبود. در ادامه به توصیف پدیده‌ی تابش می‌پردازیم.

تابش از سطح اجسام: آیا تاکنون به نوری که از زغال‌افروخته و یا فلز گداخته‌ای گسیل می‌شود توجه کرده‌اید؟ این پدیده نشان می‌دهد که اجسام در دماهای بالا از سطح خود نور مرئی گسیل می‌کنند. آزمایش‌های دقیق فیزیکی نشان می‌دهد که: از سطح همه‌ی اجسام در هر دمایی موج‌های الکترومغناطیسی گسیل می‌شود.

گسیل موج‌های 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.

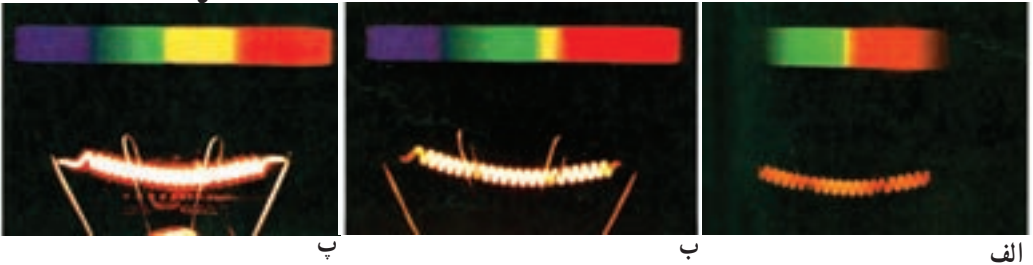
آزمایش نشان می‌دهد که تابش گسیل شده از هر جسم به دمای آن و برخی از خصوصیت‌های سطح آن بستگی دارد و در آن همه‌ی طول موج‌ها از فرسرخ، مرئی و فرابنفش به صورت یک طیف پیوسته وجود دارد.

در دمای پایین، مثلاً در دمای اتاق یا کمی بالاتر، بیش‌تر تابش گسیل شده دارای طول موج‌هایی در ناحیه‌ی 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 اندازه‌ی کافی بالا رود، از آن نور قرمزرنگی گسیل می‌شود، (شکل ۳-۱).



شکل ۱-۳

در دماهای باز هم بالاتر، اجسامی - مانند رشته‌ی تنگستن داغ درون لامپ روشنایی - نور سفید (یعنی نوری با طیف پیوسته که همه‌ی طول موج‌های نور مرئی را در طیف خود دارد) گسیل می‌کنند (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳ - رشته‌ی 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 ۱-۳

آیا می‌توانید بگویید در جایی که نشست‌اید تابش گسیل شده از چه اجسامی بر شما می‌تابد (فرود می‌آید)؟ آیا از خود شما نیز در این حال تابش گسیل می‌شود؟

همان‌گونه که گفتیم از سطح هر جسمی همواره انرژی تابشی گسیل می‌شود و اجسام دیگری که در اطراف آن هستند این تابش را دریافت می‌کنند. هر جسم بخشی از انرژی تابشی فرودی بر سطح خود را جذب می‌کند و بقیه را یا بازمی‌تاباند و یا از خود عبور می‌دهد.

ضریب جذب: نسبت مقدار انرژی تابشی جذب شده توسط هر جسم به انرژی تابش فرودی را ضریب جذب آن جسم می‌نامند و آن را با a نشان می‌دهند.

ضریب جذب هر جسم به ویژگی‌های سطح آن جسم بستگی دارد و مقدار آن برای طول موج‌های متفاوت یکسان نیست. به عبارت دیگر یک جسم برای هر طول موج ضریب جذب خاصی دارد.

$$a_{\lambda} = \frac{\text{انرژی تابشی جذب شده با طول موج } \lambda}{\text{انرژی تابشی فرودی با طول موج } \lambda} \quad (۱-۳)$$

پیداست که a_{λ} نمی‌تواند بزرگ‌تر از یک باشد. اما هر قدر جسم انرژی تابشی بیش‌تری را جذب کند، ضریب جذب آن بالاتر و به یک نزدیک‌تر است. بهترین جذب‌کننده‌ها جسمی است که تمام تابش فرودی را جذب کند، که در آن صورت برای آن $a_{\lambda} = 1$ است.

جسم سیاه: جسمی که بتواند همه‌ی طول موج‌های تابش فرودی را به‌طور کامل جذب کند، یعنی برای آن داشته باشیم:

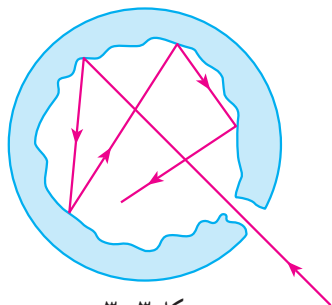
برای همه‌ی طول موج‌ها $a_{\lambda} = 1$

جسم سیاه نام دارد. این نام را به این دلیل برگزیده‌اند که جسم‌های به‌رنگ سیاه همه‌ی نور مرئی‌ای را که بر آن‌ها می‌تابد، جذب می‌کنند. توجه داشته باشید که هر جسم سیاه‌رنگ الزاماً جسم سیاه نیست، زیرا ممکن است ضریب جذب آن برای طول موج‌های غیر مرئی کمتر از یک باشد.

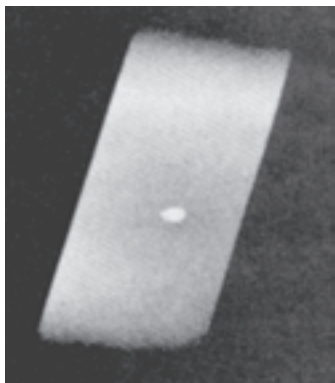
شدت تابشی: دیدیم که هر جسم همواره در حال گسیل تابش است و طول موج و انرژی تابش گسیل شده از آن هم به دما و هم به ویژگی‌های سطح آن جسم بستگی دارد. بنا به تعریف شدت تابشی، یک جسم برابر است با مقدار کل انرژی موج‌های الکترومغناطیسی‌ای که در بازه‌ی زمانی یک ثانیه از واحد سطح آن جسم گسیل می‌شود.

آزمایش‌ها نشان داده‌اند که هرچه ضریب جذب یک جسم بالاتر باشد، شدت تابشی آن نیز بیش‌تر خواهد بود. به این ترتیب جسم سیاه دارای بالاترین شدت تابشی در هر دمایی است. به عبارت دیگر در یک دمای معین جسم سیاه بیش از هر جسم دیگر تابش الکترومغناطیسی گسیل می‌کند. پس می‌توان گفت: **جسم سیاه بهترین گسیلنده‌ی موج‌های الکترومغناطیسی و بهترین جذب‌کننده‌ی این موج‌هاست.**

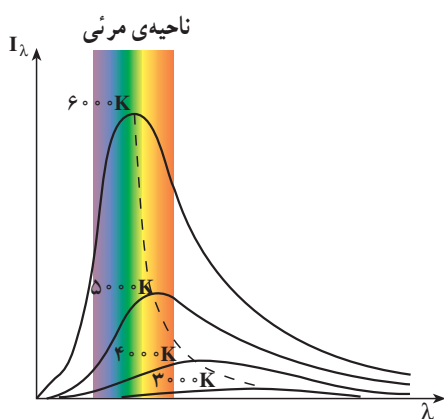
اکنون این سؤال پیش می‌آید که در عمل چه جسمی را می‌توان جسم سیاه دانست؟ فیزیک‌دان‌ها جسم سیاه را به این ترتیب به دست می‌آورند که در سطح یک جسم توخالی مانند شکل ۳-۳ سوراخ ریزی ایجاد می‌کنند. سطح این سوراخ با تقریب بسیار خوبی ویژگی جسم سیاه را دارد؛ یعنی همه‌ی تابش فرودی را جذب می‌کند. به این صورت که همه‌ی تابشی که بر سطح سوراخ فرود می‌آید به درون کاواک (فضای درونی جسم توخالی) وارد می‌شود و در هر فرود بر دیوارهای درونی کاواک بخشی از انرژی خود را از دست می‌دهد (به جسم می‌دهد). در نتیجه پس از فرودهای مکرر بدون آن‌که از کاواک خارج شود کاملاً جذب می‌شود. به این ترتیب، ضریب جذب این سوراخ برای تمام طول موج‌های فرودی برابر یک



شکل ۳-۳



شکل ۳-۴



شکل ۳-۵ تابندگی پرتوی گسیل شده از جسم سیاه بر حسب طول موج

است. حال، از چنین سوراخی می توان به عنوان یک جسم سیاه استفاده کرد. شکل ۳-۴ این را به خوبی نشان می دهد. در این شکل، سوراخ بسیار ریزی که در جدار یک لوله ی توخالی از جنس تنگستن ایجاد شده نشان داده شده است. این لوله آن قدر گرم شده است که از خود نور مرئی گسیل می کند. تفاوت بین شدت تابشی سوراخ و شدت تابشی گسیل شده از بقیه ی قسمت های سطح در شکل به خوبی مشخص شده است.

مقدار تابش گسیل شده را با کمیتی به نام تابندگی مشخص می کنند. تابندگی یک جسم در هر طول موج برابر است با مقدار انرژی موج های الکترومغناطیسی با طول موج های بین λ و $\lambda + \Delta\lambda$ که در واحد زمان از واحد سطح جسم گسیل می شود. تابندگی جسم سیاه (I_λ) در طول موج ها و دماهای مختلف به دقت اندازه گیری شده و نتیجه ی آن در شکل ۳-۵ برای چهار دمای مختلف رسم شده است. گستره ی طول موج های مرئی نیز در این شکل مشخص شده است.

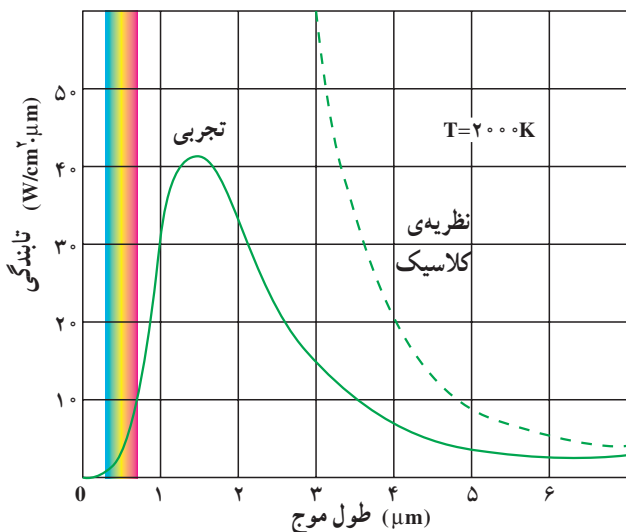
فعالیت ۳-۱

با بررسی شکل ۳-۵ در گروه خود، الف: تابندگی جسم سیاه را برای یک طول موج معین، در دماهای مختلف، با یک دیگر مقایسه کنید. ب: مشخص کنید که آیا در یک دمای معین همه ی طول موج ها با تابندگی یکسان تابش می شوند یا نه؟ پ: اگر نتیجه ی دیگری از این بررسی به دست آورده اید به کلاس گزارش کنید.

همان طور که در شکل ۳-۵ می بینید، هر چه دمای جسم سیاه بیش تر باشد، بیشینه ی منحنی، یعنی طول موجی که با بیش ترین تابندگی گسیل می شود، به طرف طول موج های کوتاه تر می رود، علاوه بر این، شدت تابشی کل گسیل شده نیز با افزایش دما بیش تر می شود.

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. تابش گرمایی که از سطح یک جسم گسیل می‌شود نیز از نوسان‌های ذره‌های باردار می‌گردد. درون جسم و در نزدیکی سطح آن، واقع‌اند سرچشمه می‌گیرند.

تا ابتدای سده بیستم میلادی، فیزیک‌دانان نتوانسته بودند با به‌کار بردن قانون‌ها و مفاهیم فیزیک کلاسیک، از جمله موج‌های الکترومغناطیسی گسیل شده از سطح یک جسم منحنی‌های تجربی



شکل ۳-۶

شکل ۳-۵ را توجیه کنند. به عبارت دیگر از محاسبه‌های آنان منحنی‌هایی به دست می‌آمد که با نتیجه‌های تجربی شکل ۳-۵ سازگاری نداشت. شکل ۳-۶ منحنی حاصل از محاسبه‌های نظری براساس فیزیک کلاسیک (خط چین) همراه با یک منحنی تجربی برای دمای ۲۰۰۰ کلوین نشان داده شده است.

فعالیت ۲-۳

در گروه خود دو منحنی شکل ۳-۶ را مورد بحث قرار دهید و موارد ناسازگاری بین آن دو را مشخص کنید.

همان‌طور که در شکل ۳-۶ پیداست و پیش از این نیز توضیح داده شد، هر چه دمای جسم سیاه بالاتر باشد، λ_m یعنی طول موجی که تابندگی با آن طول موج بیشینه است، کوچک‌تر خواهد بود. آزمایش نشان می‌دهد که میان λ_m و دمای مطلق جسم سیاه، رابطه‌ی زیر برقرار است که قانون جابه‌جایی وین نام دارد.

$$\lambda_m T = \text{ثابت} = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (2-3)$$

واژه‌ی جابه‌جایی در این قانون، مربوط به چگونگی حرکت یا جابه‌جایی بیشینه‌ی تابندگی با

مثال ۳-۱

دمای بدن انسان 37°C است با محاسبه نشان دهید بیشینه‌ی تابندگی بدن انسان در چه ناحیه‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی است.

پاسخ

$$\lambda_m T = 2/9 \times 10^{-3} \text{ m.K}$$

$$\lambda_m = \frac{2/9 \times 10^{-3}}{273 + 37}$$

$$\lambda_m \approx 9/35 \times 10^{-6} \text{ m}$$

با استفاده از شکل ۲-۹، این طول موج در محدوده‌ی فروسرخ است.

یکی از ناسازگاری‌های بین نتایج محاسبات مبتنی بر فیزیک کلاسیک و نتیجه‌های تجربی، آن است که محاسبه‌های کلاسیکی پیش‌بینی می‌کنند که مقدار انرژی تابشی گسیل‌شده با طول موج بسیار کوتاه باید نامتناهی باشد. اما همان‌طور که در نمودار تجربی می‌بینید مقدار این انرژی بسیار کوچک است.

در سال ۱۹۰۰ میلادی پلانک با ارائه‌ی نظریه‌ی کوانتومی خود درباره‌ی تابش توانست نتیجه‌های تجربی به دست آمده را توجیه کند. اساس نظریه‌ی پلانک بر این فرض استوار بود که **انرژی تابشی جسم کوانتومی** است. در ادامه، نخست واژه‌ی کوانتوم و مفهوم کمیت کوانتومی را معرفی می‌کنیم. سپس سعی می‌کنیم با بیان بسیار ساده شده‌ای به شرح نظریه‌ی پلانک پردازیم. **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 می خوانند.

برای مثال، در مبحث الکتروسیسته دیده ایم که مقدار بار الکتریکی موجود در یک جسم باردار مضرب درستی از بار یک الکترون ($e = 1/6 \times 10^{-19} C$) است. به این ترتیب می گوئیم که بار الکتریکی هر جسم باردار یک کمیت کوانتومی است و هر کوانتوم آن برابر بار الکتریکی یک الکترون است. نظریه ی پلانک درباره ی تابش: بنابر نظریه ی پلانک مقدار انرژی ای که جسم به صورت موج های الکترومغناطیسی گسیل می کند همواره مضرب درستی از یک مقدار پایه است و این مقدار پایه به بسامد موج الکترومغناطیسی بستگی دارد. مطابق این نظریه، انرژی یک موج الکترومغناطیسی با بسامد f برابر است با:

$$E = nhf \quad (3-3)$$

در این رابطه n یک عدد صحیح مثبت است و ضریب h مقدار ثابتی است که ثابت پلانک نام دارد. نخستین برآورد این ثابت توسط پلانک به کمک تطبیق نتیجه ی محاسبه با منحنی های تجربی مربوط به تابش جسم سیاه صورت گرفت. هم اکنون مقدار پذیرفته شده برای این ثابت برابر با $h = 6/63 \times 10^{-34} Js$ است.

hf کوانتوم انرژی تابشی گسیل شده با بسامد f است و n که تعداد کوانتومها را مشخص می کند، عدد کوانتومی نام دارد.

در رابطه ی ۳-۳ اگر ثابت پلانک را برحسب ژول ثانیه قرار دهیم، انرژی برحسب ژول به دست می آید؛ ولی در بحث درباره ی اجزای سازنده ی اتمها، ژول به دلیل آن که یکای بزرگی است مناسب نیست و معمولاً از یکای دیگری برای انرژی به نام الکترون ولت (eV) استفاده می شود. یک الکترون ولت بنا به تعریف برابر تغییر مقدار انرژی یک الکترون تحت ولتاژ یک ولت است. در حالی که یک ژول برابر است با مقدار انرژی بار الکتریکی برابر یک کولن تحت ولتاژ یک ولت است. در نتیجه رابطه ی بین الکترون ولت و ژول به صورت زیر است:

$$1eV = (1/6 \times 10^{-19} C) \times (1V) = 1/6 \times 10^{-19} J = 1eV$$

تمرین ۱-۳

ثابت پلانک را برحسب eVs به دست آورید.

تمرین ۲-۳

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 برحسب eV چه مقدار است؟

تمرین ۳-۳

انرژی یک کوانتوم رنگ معینی از نور مرئی، برابر $5 \times 10^{-19} \text{ J}$ است. رنگ این نور را مشخص کنید.

تمرین ۴-۳

بیش‌ترین طول موج گسیلی که از بدن انسان تابش می‌شود برابر $940 \mu\text{m}$ است.

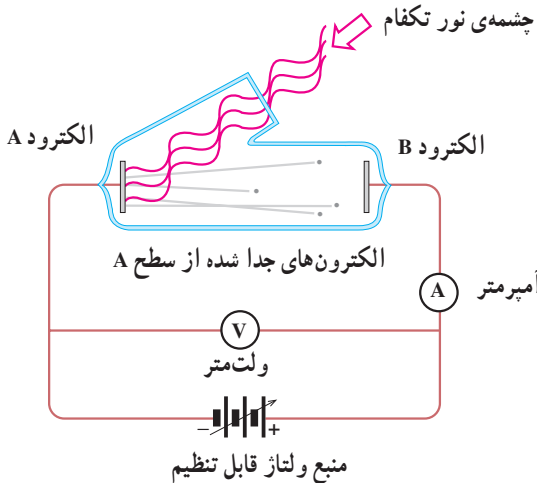
الف: بسامد این تابش چه مقدار است؟

ب: نوع موج الکترومغناطیسی را تعیین کنید.

پ: انرژی‌ای که توسط هر کوانتوم این موج الکترومغناطیسی حمل می‌شود برحسب eV چه مقدار است؟

۲-۳- فوتون و پدیده‌ی فوتوالکتریک

در سال ۱۸۸۷ میلادی، هانریش هرتز دانشمند آلمانی، مشاهده کرد که وقتی نوری با طول موج بسیار کوتاه - مانند نور فرابنفش - به کلاهک فلزی یک برق‌نمای باردار منفی می‌تابد، باعث تخلیه‌ی برق‌نما می‌شود. آزمایش‌های دیگر نشان دادند که این تخلیه‌ی الکتریکی، به دلیل جدا شدن الکترون‌ها از سطح کلاهک فلزی روی داده است. این پدیده، یعنی جدا کردن الکترون‌ها از سطح یک فلز توسط تاباندن نور بر آن را پدیده‌ی فوتوالکتریک و الکترون‌های گسیل شده از سطح فلز را فوتوالکترون می‌نامند.



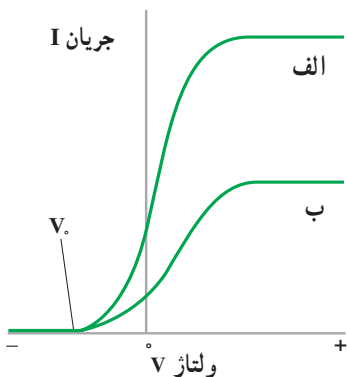
شکل ۳-۷

برای بررسی پدیده‌ی فوتوالکتریک از دستگاهی مطابق شکل ۳-۷ 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 چشمه‌ی نور تکفام (تک بسامد) قرار دارد.

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 تابد جریان در مدار برقرار می‌شود.

وجود این جریان را می‌توانیم به این صورت تفسیر کنیم که تاباندن نور باعث جدا شدن فوتوالکترودها از سطح الکتروود A و گسیل آنها شده است. اگر این الکترون‌ها انرژی جنبشی کافی داشته باشند، به الکتروود B می‌رسند و جریان برقرار می‌شود.

با تغییر دادن ولتاژ V می‌توانیم منحنی تغییرات جریان I را برحسب V به دست آوریم. در شکل ۳-۸ منحنی تغییرات جریان برحسب ولتاژ برای دو مقدار مختلف شدت نور فرودی بر الکتروود A نشان داده شده است. بسامد نور فرودی در هر دو حالت، یکسان است. مقدارهای مثبت V مربوط به شرایطی است که الکتروود B به پایانه‌ی مثبت منبع ولتاژ متصل است.



شکل ۳-۸

همان‌گونه که منحنی (الف) نشان می‌دهد برای مقادیر مثبت V ، با افزایش ولتاژ V ، نخست جریان افزایش می‌یابد و سپس به یک مقدار ثابت می‌رسد که افزایش ولتاژ V دیگر اثری بر مقدار آن ندارد.

این موضوع را می‌توان به این صورت توضیح داد که ولتاژ V مثبت باعث می‌شود که فوتوالکترون‌ها به سمت الکتروود B کشیده شوند و با افزایش ولتاژ V تعداد بیش‌تری از فوتوالکترون‌ها به سمت B کشیده می‌شوند و جریان زیاد می‌شود. ولی پس از آن که ولتاژ V به حدی رسید که الکتروود B بتواند تمام فوتوالکترون‌ها را جمع کند، دیگر با افزایش ولتاژ V ، جریان زیاد نمی‌شود.

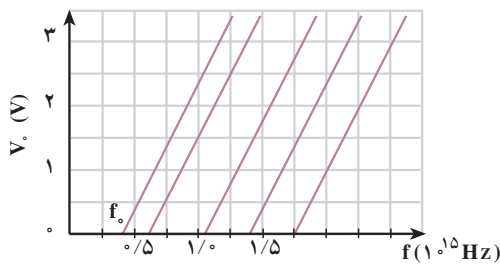
نکته‌ی جالب توجه دیگری که در این منحنی دیده می‌شود آن است که برای مقادیر منفی V (یعنی وقتی که الکتروود B به پایانه‌ی منفی منبع ولتاژ متصل شده است) جهت جریان عوض نمی‌شود. با کاهش ولتاژ V ، جریان (مثبت) کاهش می‌یابد، تا این‌که به ازای یک ولتاژ $-V_0$ که ولتاژ متوقف‌کننده نامیده می‌شود، جریان صفر می‌شود و به ازای مقادیر کم‌تر از $-V_0$ ، جریان هم‌چنان صفر می‌ماند.

برای بیان این وضعیت می‌توان گفت که برای مقادیر منفی V ، الکتروود A ، که اکنون به پایانه‌ی مثبت متصل است، فوتوالکترون‌ها را به سوی خود می‌کشد و از انرژی جنبشی آن‌ها می‌کاهد. در نتیجه تعداد کم‌تری از آن‌ها می‌توانند به B برسند. در ولتاژ $-V_0$ هیچ فوتوالکترونی به B نمی‌رسد. منحنی (ب) مربوط به آزمایشی است که در آن شدت نور فرودی را نصف کرده‌ایم (بسامد نور همان مقدار قبل را دارد). همان‌گونه که از منحنی پیداست مقدار V_0 برای هر دو منحنی یکی است یعنی،

مقدار ولتاژ متوقف‌کننده به شدت پرتوی فرودی بستگی ندارد.

اگر این آزمایش را با نور تکفام با بسامد دیگری تکرار کنیم، منحنی‌های تغییرات جریان برحسب ولتاژ را به همان صورت منحنی‌های شکل ۳-۸ به دست می‌آوریم تنها با این تفاوت که ولتاژ متوقف‌کننده مقدار دیگری خواهد داشت؛ یعنی، **مقدار ولتاژ متوقف‌کننده به بسامد نور فرودی بستگی دارد.** اگر در دستگاه شکل ۳-۷ جنس الکتروود فلزی A را تغییر دهیم، باز هم همین نتیجه‌ها را به دست می‌آوریم، ولی در این مورد نیز مقدار ولتاژ متوقف‌کننده تغییر می‌کند، به عبارت دیگر مقدار ولتاژ متوقف‌کننده به جنس الکتروود فلزی A بستگی دارد.

رابرت میلیکان با آزمایش‌های دقیقی که در طول ۱۰ سال انجام داد مقدار ولتاژ متوقف‌کننده را برای فلزهای متفاوت و برای بسامدهای متفاوت پرتوی فرودی اندازه گرفت.



شکل ۳-۹

در شکل ۳-۹ منحنی تغییرات ولتاژ

متوقف کننده بر حسب بسامد پرتوی نور فرودی، برای چند فلز مختلف، نشان داده شده است. این منحنی ها نشان می دهند که هر قدر بسامد پرتوی فرودی بر الکتروود A کم تر باشد، ولتاژ قطع کننده نیز کم تر خواهد بود. مقدارهای ولتاژ قطع کننده برای هر

فلز بر روی یک خط راست قرار دارد. همان گونه که در شکل می بینید هر خط، محور بسامد را، در بسامد معینی که آن را با f_0 نشان می دهیم قطع می کند. تجربه نشان می دهد که اگر بسامد پرتوی تابیده بر الکتروود فلزی A از f_0 مربوط به آن فلز کم تر باشد، پدیده ی فوتوالکتریک رخ نمی دهد. از این رو f_0 را بسامد قطع می نامند.

ناتوانی فیزیکی کلاسیک در تفسیر پدیده ی فوتوالکتریک: این پدیده که تاباندن نور بر یک فلز باعث جدا شدن الکترون های آن می شود، با برداشت های فیزیکی کلاسیک کاملاً قابل قبول است؛ زیرا با توجه به آن که نور نیز از جنس موج های الکترومغناطیسی است، می توان نتیجه گرفت که میدان الکتریکی آن موج ها، بر الکترون نیروی $-e\vec{E}$ وارد می کند؛ در نتیجه الکترون ها شتاب پیدا می کنند و انرژی جنبشی آن ها افزایش می یابد و تعدادی از آن ها که انرژی کافی کسب می کنند می توانند از فلز خارج شوند. حال اگر انرژی جنبشی فوتوالکتریک به هنگام خروج از سطح الکتروود K_A برابر K_B و به هنگام رسیدن به الکتروود B برابر K_B باشد، و بین دو الکتروود ولتاژ V برقرار باشد، بنا بر قضیه ی کار - انرژی داریم:

$$eV = K_B - K_A \quad (۳-۴)$$

که در آن eV کار نیروی وارد بر الکترون از سوی میدان الکتریکی بین الکتروودها در تغییر مکان از A به B است. اگر ولتاژ V منفی باشد (یعنی الکتروود B به پایانه ی منفی منبع ولتاژ متصل شده باشد) K_B کمتر از K_A خواهد بود.

اگر این ولتاژ منفی برابر ولتاژ متوقف کننده باشد ($V = -V_0$)، تنها آن الکترون هایی که بیشترین انرژی جنبشی را دارند می توانند تا نزدیکی الکتروود B برسند. برای این الکترون ها داریم $K_A = K_B$ ، این الکترون ها جذب الکتروود B نمی شوند و برمی گردند؛ لذا برای آن ها داریم $K_B = 0$ در نتیجه از رابطه ی ۳-۴ داریم:

$$-eV_0 = -K \text{ بیشینه} \Rightarrow eV_0 = K \text{ بیشینه} \quad (5-3)$$

بنابراین با داشتن ولتاژ متوقف کننده، بیشینه‌ی انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها به هنگام خروج از الکتروود A مشخص می‌شود.

فیزیک کلاسیک در تفسیر نتیجه‌های تجربی مربوط به پدیده‌ی فوتوالکترونیک با دو مشکل روبه‌رو شد.

۱- بنابر قانون‌های فیزیک کلاسیک، با افزایش شدت نور فرودی بر الکتروود A، و در نتیجه افزایش میدان الکتریکی مربوط به موج الکترومغناطیسی، می‌توانیم بیشینه‌ی K را افزایش دهیم؛ در حالی که در منحنی شکل ۳-۸ دیدیم که V_0 و در نتیجه بیشینه‌ی K مستقل از شدت نوری است که بر الکتروود A می‌تابد.

۲- اگر شدت نور برای گسیل فوتوالکترون‌ها از الکتروود A کافی باشد، اثر فوتوالکترونیک باید در هر بسامدی رخ دهد؛ در حالی که دیدیم اگر بسامد نوری که بر A فرود می‌آید کم‌تر از بسامد قطع باشد، اثر فوتوالکترونیک رخ نمی‌دهد.

تفسیر کوانتومی پدیده‌ی فوتوالکترونیک: پیش از این دیدیم که بنا بر فرضیه‌ی 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 پدیده‌ی فوتوالکترونیک، با استفاده از فرضیه‌ی پلانک فرض کرد که هر موج الکترومغناطیسی با بسامد f از بسته‌های متمرکز یا کوانتوم‌های انرژی تشکیل شده است که آن‌ها را فوتون می‌نامند. فوتون‌های نور با رنگ‌های مختلف انرژی یکسان ندارند. فوتون بنفش انرژی بیش‌تر و فوتون قرمز انرژی کم‌تری دارد. اگر بسامد یک موج الکترومغناطیسی برابر f باشد، انرژی فوتون آن برابر خواهد بود با

$$E = hf \quad (6-3)$$

براساس پیشنهاد اینشتین انرژی یک موج الکترومغناطیسی با بسامد f تنها می‌تواند مضرب درستی از انرژی یک فوتون باشد؛ یعنی:

$$E = nhf \quad (7-3)$$

در این صورت می‌گوییم این موج از n فوتون تشکیل شده است.

مثال ۲-۳

الف: انرژی فوتون نور زرد با طول موج 589 nm را برحسب الکترون ولت 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:

$$E_T = Pt = 60 \times 1 = 60 \text{ J} = 37/5 \times 10^{19} \text{ eV}$$

$$E_T = nhf = nE$$

$$37/5 \times 10^{19} = n \times 2/11$$

$$n \approx 1/8 \times 10^{20}$$

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 اثر فوتوالکتریک، یک فوتون (hf انرژی) به‌طور کامل توسط الکترون جذب می‌شود و انرژی خود را به الکترون می‌دهد. در نتیجه انرژی جنبشی فوتوالکترون گسیل شده به‌هنگام خروج از سطح فلز برابر است با:

$$K = hf - W \quad (۸-۳)$$

که در آن W برابر است با کار لازم برای غلبه بر نیروهای داخلی وارد بر الکترون در فلز. 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 باشد، انرژی جنبشی سریع‌ترین فوتوالکترون‌های گسیل‌شده از آن برابر خواهد بود با:

$$K_{\text{بیشینه}} = hf - W. \quad (9-3)$$

W را تابع کار فلز می‌نامند و همان‌گونه که گفتیم حداقل کار لازم برای خارج کردن یک الکترون از فلز است.

با استفاده از رابطه‌ی ۳-۵ می‌توانیم رابطه‌ی ۳-۹ را به صورت زیر بنویسیم:

$$eV_0 = hf - W. \quad (10-3)$$

فعالیت ۳-۳

با بحث و بررسی در گروه خود، نشان دهید که دو مشکلی که در تفسیر کلاسیکی نتیجه‌های تجربی پدیده‌ی فوتوالکتریک وجود داشت در رابطه‌ی ۳-۱۰ وجود ندارد.

رابطه‌ی ۳-۱۰، بین ولتاژ متوقف‌کننده‌ی V_0 و بسامد فوتون فرودی بر الکتروده A ، یک رابطه‌ی خطی است و منحنی آن یک خط راست است که کاملاً با منحنی‌های تجربی در شکل ۳-۹ سازگار است.

فعالیت ۴-۳

منحنی تغییرات V_0 بر حسب بسامد f را با استفاده از رابطه‌ی ۳-۱۰ رسم کنید. با بحث و بررسی در گروه خود مشخص کنید که شیب این خط و طول از مبدأ آن، هر یک چه کمیت‌هایی را مشخص می‌کنند؟

در رابطه‌ی ۳-۱۰ اگر hf از W کوچک‌تر باشد، هیچ الکترونی از فلز خارج نمی‌شود. در نتیجه hf حداقل می‌تواند برابر W باشد. به این ترتیب، بسامد قطع از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$f_0 = \frac{W_0}{h} \quad (11-3)$$

مثال ۳-۳

تابع کار تنگستن $4/52 \text{ eV}$ 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. ولتاژ متوقف‌کننده در این حالت چه مقدار است؟

پاسخ

الف: بسامد قطع برابر است با

$$f_0 = \frac{W_0}{h} = \frac{4/52 \times 1/6 \times 10^{-19} \text{ J}}{6/63 \times 10^{-34} \text{ J.s}}$$

$$= 1/09 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

با توجه به رابطه $\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$ ، طول موج قطع برابر است با

$$\lambda_0 = \frac{3 \times 10^8}{1/09 \times 10^{15}} = 2/7 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$= 270 \text{ nm}$$

$$K_{\text{بیشینه}} = hf - W_0 \quad \text{ب:}$$

$$= \frac{hc}{\lambda} - W_0$$

$$= \frac{1240 \text{ eV.nm}}{198 \text{ nm}} - 4/52 \text{ eV}$$

$$= 1/74 \text{ eV} \approx 2/7 \times 10^{-19} \text{ J}$$

ولتاژ متوقف‌کننده متناظر با بیشینه K است؛ بنابراین:

$$V_0 = \frac{K_{\text{بیشینه}}}{e} = \frac{1/74 \text{ eV}}{e} = 1/74 \text{ V}$$

تمرین ۳-۵

طول موج قطع برای اثر فوتوالکتریک در یک فلز معین برابر 254 nm است.

الف: تابع کار این فلز برحسب الکترون-ولت چه مقدار است؟

ب: آیا اثر فوتوالکتریک به ازای 254 nm مشاهده خواهد شد یا به ازای 254 nm چرا؟

تمرین ۳-۶

تابع کار فلز روی $4/31 \text{ eV}$ است. هرگاه نور بر سطحی از جنس روی بتابد و فوتوالکترون‌ها مشاهده شوند،
الف: بلندترین طول موجی که سبب گسیل فوتوالکترون‌ها می‌شود چه مقدار است؟
ب: وقتی نور به طول موج 220 nm به کار گرفته شود ولتاژ متوقف‌کننده چه مقدار است؟

۳-۳- طیف اتمی

علاوه بر آن‌چه تا این‌جا به آن‌ها اشاره کردیم، پدیده‌های دیگری نیز هستند که فیزیک کلاسیک قادر به تفسیر آن‌ها نبود. لذا فیزیک‌دانان با فرض‌های غیر کلاسیکی - مانند فرضیه‌های پلانک و اینشتین که در بالا 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.



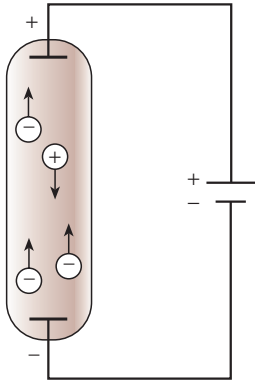
در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه پاشیدگی نور در منشور آشنا شدید و دیدید که نیوتون برای نخستین بار با گذراندن نور خورشید از منشور «طیف نور سفید» را تشکیل داد. نیوتون نشان داد که نور سفید آمیزه‌ای از رنگ‌های مختلف است. اکنون می‌دانیم نور سفید از طول موج‌های مختلفی، از نور بنفش با طول موج حدود 400 nm تا نور قرمز با طول موج حدود 700 nm ، تشکیل شده است. طیف نور سفید که یک طیف پیوسته است در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است.

شکل ۳-۱۰

به همین ترتیب می‌توان طیف هر نوری را که از رنگ‌های مختلف تشکیل شده باشد، توسط

پاشیدگی در منشور شناسایی کرد. پیش از این با تابش گرمایی که از سطح جسم‌های جامد گسیل می‌شود، آشنا شدیم و دیدیم که این تابش دارای طیف پیوسته است.

اکنون به بررسی نوع دیگری از تابش می‌پردازیم. این تابش توسط لامپ‌های حاوی بخار بسیار رقیق عنصرها گسیل می‌شود. این لامپ‌ها مطابق شکل ۱۱-۳ الف به صورت لوله‌های باریک شیشه‌ای هستند که درون آن‌ها یک گاز رقیق در فشار کم وجود دارد. دو الکتروود به نام‌های کاتد و آند در دو انتهای لوله قرار دارند. اگر بین این دو الکتروود ولتاژ بالایی برقرار شود، اتم‌های گاز درون لامپ مطابق شکل ۱۱-۳ ب و پ شروع به گسیل نور می‌کنند. نوری که از لامپ‌های حاوی بخار عنصرهای متفاوت گسیل می‌شود، با یک دیگر تفاوت دارد. برای مثال نوری که اتم‌های بخار جیوه گسیل می‌کنند، همان‌گونه که در شکل ۱۱-۳ نشان داده شده است به رنگ نیلی-آبی است. اگر این نور را مطابق شکل ۱۲-۳ از منشور بگذرانیم و طیف آن را تشکیل دهیم، می‌بینیم که این طیف پیوسته نیست، بلکه تنها از چند خط رنگی جدا از هم با طول موج‌های معین تشکیل شده است.



الف



ب



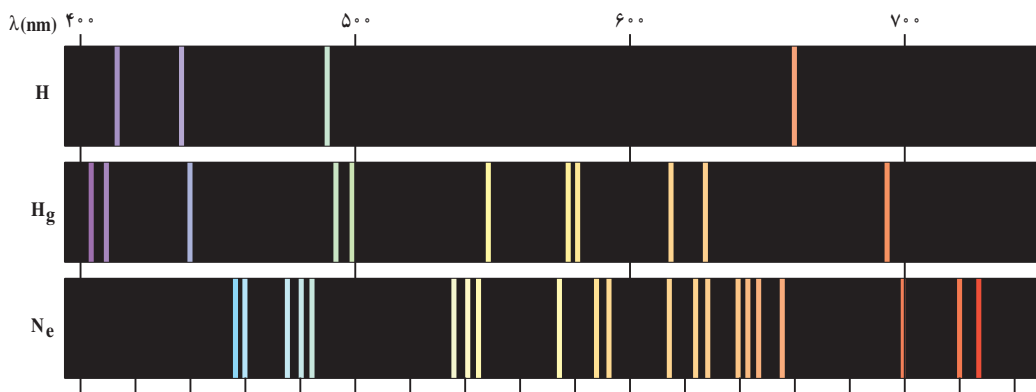
پ

شکل ۱۱-۳

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 با هم تفاوت دارد. طیف اتمی چند عنصر در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است. طیف اتمی حاصل از نور گسیل شده از بخار عنصرها را *طیف گسیلی* (یا *نشری*) آن اتم‌ها می‌نامند.



شکل ۳-۱۲



شکل ۳-۱۳

طیف اتمی جیوه، خط‌هایی در ناحیه‌ی 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 دیواره‌ی درونی این لامپ‌ها با پوشش نازکی از یک ماده‌ی 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 ناحیه‌ی 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 جیوه‌ی بدون پوشش فلورسان به‌عنوان لامپ روشنایی استفاده نمی‌شود.

طیف جذبی: در سال ۱۸۱۴ میلادی فرانیهوفر، فیزیک‌دان آلمانی، کشف کرد که اگر به‌دقت به طیف خورشید بنگریم، خط‌های تاریکی در طیف پیوسته‌ی آن مشاهده خواهیم کرد (شکل ۳-۱۴). این مطلب نشان می‌دهد که بعضی از طول موج‌ها در نوری که از خورشید به‌زمین می‌رسد، وجود ندارد و به‌جای آن‌ها، در طیف پیوسته‌ی 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 پیوسته‌ی خورشید به‌صورت خط‌های تاریک ظاهر می‌شود. طیف نور سفیدی را که بعضی از خط‌ها با طول موج‌های آن جذب شده باشد، **طیف جذبی** می‌نامیم.

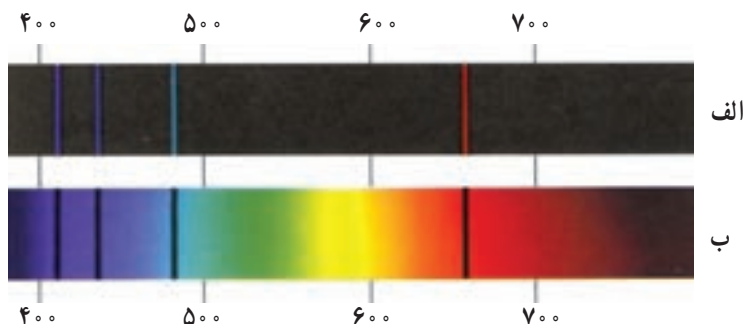
در اواسط سده‌ی نوزدهم، معلوم شد که اگر نور سفید از داخل بخار عنصری عبور کند و سپس طیف آن تشکیل شود، در طیف آن، خط‌های تاریکی ظاهر می‌شود. این خط‌ها (طول موج‌ها) توسط اتم‌های بخار عنصر جذب شده‌اند. مطالعه‌ی طیف‌های گسیلی و جذبی عنصرهای مختلف نشان می‌دهد که:

۱- در طیف گسیلی و هم در طیف جذبی هر عنصر طول موج‌های معینی وجود دارد که از ویژگی‌های مشخصه‌ی 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 اندازه‌ی کافی بالا رود و یا به هر صورت دیگر برانگیخته شود، آن‌ها را تابش می‌کند.

شکل ۳-۱۴- 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 ۳-۱۵ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳-۱۵

الف - طیف گسیلی، خط‌های روشن معرف طول موج‌های گسیلی هستند.

ب - طیف جذبی، خط‌های تاریک در زمینه‌ی روشن معرف طول موج‌های جذب شده هستند.

از آن‌چه گفته شد، نتیجه می‌گیریم که طیف اتمی هر عنصر خط‌ها یا طول موج‌های ویژه‌ی خود را دارد، و طیف‌های گسیلی و جذبی هر عنصر مانند اثر انگشت افراد می‌تواند برای شناسایی اتم‌ها از یک‌دیگر به کار رود.

فعالیت ۳-۵

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 سده‌ی نوزدهم میلادی چند عنصر ناشناخته، تنها به کمک طیف‌نمایی کشف شد، ولی علی‌رغم این کاربردهای موفق تجربی، در قرن نوزدهم نظریه‌ی قابل قبولی برای تفسیر طیف اتمی وجود نداشت. به عبارت دیگر، این که چرا هر عنصر طیف مخصوص به خود را دارد، سؤالی بود که در فیزیک کلاسیک پاسخی برای آن یافت نمی‌شد.

درک ساز و کار جذب و گسیل نور به وسیله‌ی 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 می کنند و موج های الکترومغناطیسی به وجود می آورند؛ یعنی، نور گسیل می کنند. اما این که چرا اتم های همه ی عنصرها موج های الکترومغناطیسی با طول موج های یکسان گسیل نمی کنند 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، می توان گفت که وقتی نور به یک اتم می تابد، نوسان میدان الکتریکی ناشی از نور فرودی، باعث می شود که الکترون های اتم شروع به ارتعاش کنند و نور فرودی را جذب کنند. ولی باز هم در این دیدگاه هیچ توجیه قانع کننده ای برای این که «چرا هر عنصر تنها طول موج های خاصی را که مشخصه ی آن عنصر است جذب می کند و بقیه ی طول موج ها را جذب نمی کند؟» وجود ندارد.

نیلس بور، فیزیک دان دانمارکی، در سال ۱۹۱۳ میلادی با بیان فرضیه هایی درباره ی اتم ها، طیف اتمی را توجیه کرد و بار دیگر نشان داد که تجدید نظر اساسی در فیزیک کلاسیک ضروری است. رابطه ی ریدبرگ — بالمر: اتم هیدروژن ساده ترین اتم هاست 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 موج ها در شکل ۳-۱۵ نشان داده شده اند. بالمر که یک معلم سوئسی بود، این اندازه گیری ها را مطالعه کرد و نشان داد که طول موج خط های این طیف را می توان با دقت بسیار زیاد از رابطه ی زیر به دست آورد:

$$\lambda = 364/56 \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad (12-3)$$

که در آن λ طول موج خط های 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 رابطه های ریاضی مختلف و بدون هیچ گونه تجربه ی فیزیکی به دست آورد.

مثال ۳-۴

طول موج خط های طیفی شکل ۳-۱۵ را به کمک رابطه ی بالمر به دست آورید.

پاسخ

$$\lambda = 364/56 \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

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

$$n = 5 \Rightarrow \lambda_3 = 434 / 0 \text{ nm}$$

$$n = 6 \Rightarrow \lambda_4 = 410 / 13 \text{ nm}$$

توفیق بالمر در خصوص یافتن رابطه‌ای برای خط‌های طیف اتم هیدروژن در ناحیه‌ی مرئی موجب شد که تلاش‌های بیش‌تری در جهت یافتن خط‌های دیگر طیف اتم هیدروژن صورت گیرد. بالمر پیش‌گویی کرد که اتم هیدروژن ممکن است دارای خط‌های طیفی دیگری نیز باشد که از رابطه‌هایی به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\lambda = 364 / 56 \frac{n^2}{n^2 - 9} \quad (13-3)$$

و یا

$$\lambda = 364 / 56 \frac{n^2}{n^2 - 16} \quad (14-3)$$

کار عمده در زمینه‌ی جست‌وجو برای طیف کامل اتم هیدروژن توسط ری‌دبرگ در حدود سال ۱۸۹۰ میلادی انجام شد. وی توانست برخی از خط‌های مربوط به رابطه‌های (۱۱-۳) و (۱۲-۳) را نیز مشاهده کند. ری‌دبرگ کار کردن با عکس طول موج را مناسب‌تر تشخیص داد؛ لذا رابطه‌ی بالمر (معادله‌ی ۱۲-۳) را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (15-3)$$

که در آن R_H ثابت ری‌دبرگ برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود و مقدار آن برابر است با

$$R_H = 109677.58 \text{ (nm)}^{-1}$$

طول موج تمامی خط‌های طیف اتم هیدروژن را می‌توان از رابطه‌ی زیر که به رابطه‌ی ریذبرگ معروف است به دست آورد.

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n > n' \quad (16-3)$$

با قرار دادن $n' = 2$ رابطه‌ی بالمر (3-15) 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 «رشته‌ی 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 «رشته‌ی پاشن» می‌نامند. در جدول 3-1 رشته‌های طیف اتم هیدروژن داده شده‌اند.

جدول 3-1

نام رشته	مقدار n'	رابطه‌ی ریذبرگ مربوط	مقدارهای n	گسترده‌ی طول موج
لیمان	1	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 2, 3, 4, \dots$	فرابنفش
بالمر	2	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 3, 4, 5, \dots$	فرابنفش و مرئی
پاشن	3	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 4, 5, 6, \dots$	فروسرخ
براکت	4	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 5, 6, 7, \dots$	فروسرخ
پفوند	5	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 6, 7, 8, \dots$	فروسرخ

مثال ۳-۵

طول موج اولین خط طیفی اتم هیدروژن در رشته‌ی لیمان را که برای آن $n' = 1$ و $n = 2$ است به دست آورید و تعیین کنید که این خط در کدام گستره‌ی موج‌های الکترومغناطیسی واقع است.

پاسخ

برای $n' = 1$ و $n = 2$ طبق رابطه‌ی 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 ناحیه‌ی فرابنفش واقع است.

وجود خط‌های طیفی متفاوت برای اتم‌ها و رابطه‌ی ساده و دقیقی مثل رابطه‌ی 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.

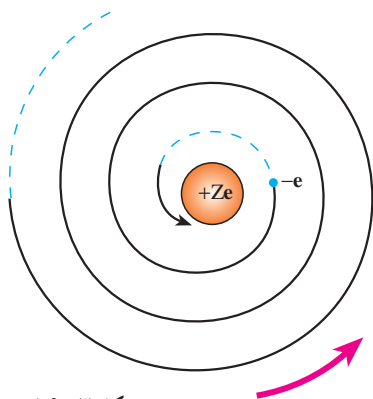
۳-۴_ الگوهای اتمی

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 براساس الگوی کیک کشمش‌ی توانست برخی از ویژگی‌های اتم‌ها را توجیه کند، ولی رادرفورد با آزمایش‌هایی که به منظور تأیید و تکمیل الگوی کیک کشمش‌ی تامسون انجام داد، به نتیجه‌هایی دست یافت که با چنین الگویی سازگار نبود. آزمایش‌های وی نشان دادند که بار مثبت اتم باید در بخش کوچکی در مرکز اتم متمرکز باشد. رادرفورد براساس این نتیجه‌ها در سال ۱۹۱۲ میلادی الگوی دیگری برای ساختار اتم ارائه کرد.

الگوی اتمی رادرفورد: در الگوی اتمی رادرفورد همه‌ی بار مثبت اتم در یک ناحیه‌ی 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 منظومه‌ی 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 نظریه‌ی 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 بیفتند (شکل ۳-۱۶).



شکل ۳-۱۶

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 گسسته‌ی اتمی نیست.

الگوی اتمی بور: نیلس بور، فیزیکدان دانمارکی، در سال ۱۹۱۳ میلادی برای حل مشکل ناپایداری الگوی

اتمی رادرفورد و با توجه به طیف گسسته‌ی تابش گسیل شده از اتم‌ها و رابطه‌ی تجربی ریدبرگ - بالمر برای طیف اتم هیدروژن، با الهام گرفتن از نظریه‌های کوانتومی پلانک و اینشتین الگویی برای اتم هیدروژن که یک الکترون دارد ارائه کرد. در این الگو، بور پیشنهاد کرد که قانون‌های مکانیک و قانون‌های الکترومغناطیسی کلاسیک، در مقیاس‌های اتمی باید همراه با فرضیه‌هایی در نظر گرفته شوند. این فرضیه‌ها را می‌توان به صورت ساده در چهار اصل زیر بیان کرد:

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 هسته‌ی با بار $+e$ در شکل ۱۷-۳ نشان داده شده است. نیروی مرکزگرا این حرکت از ربایش الکتریکی بین

الکترون و هسته است و برابر است با $\frac{ke^2}{r^2}$ (با $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2$). 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:

$$\frac{ke^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (17-3)$$

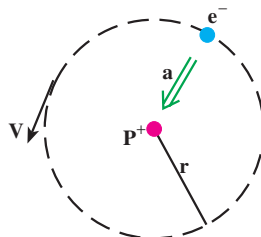
از آن جا که انرژی پتانسیل الکترون در میدان الکتریکی هسته برابر $\frac{-ke^2}{r}$ است در نتیجه

انرژی کل (پتانسیل + جنبشی) الکترون در این مدار برابر است با:

$$E = K + U = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{ke^2}{r} \quad (18-3)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱۷-۳ به دست می‌آوریم:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = + \frac{ke^2}{2r} \quad (19-3)$$



شکل ۱۷-۳

در نتیجه انرژی کل الکترون روی یک مدار مانا با شعاع r برابر است با :

$$E = -\frac{ke^2}{2r} \quad (20-3)$$

۲- الکترون در حین حرکت روی یک مدار مانا، برخلاف نظریه‌ی 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 رابطه‌ی زیر به دست می‌آیند.

$$r_n = a_0 n^2 \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (21-3)$$

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 :

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2} \quad (22-3)$$

که در آن h ثابت پلانک، k ثابت کولن، e بار الکترون و m جرم الکترون است.

مثال ۳-۶

شعاع اتم بور را محاسبه کنید.

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2} \quad \text{پاسخ}$$

$$= \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})^2}{4(3.14)^2 (9 \times 10^{-31} \text{ kg})(9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}$$

$$= 0.529 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.529 \text{ nm}$$

اکنون اگر به کمک رابطه‌ی ۳-۲ مقدار انرژی الکترون در مدار مجاز n ام را محاسبه کنیم،

به دست می‌آوریم :

$$E_n = -\frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{h^2} \times \frac{1}{n^2} \quad n=1,2,\dots \quad (23-3)$$

بدین ترتیب الکترون تنها مجاز است انرژی‌ای برابر با یکی از مقدارهایی که از رابطه‌ی ۲۳-۳ 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:

$$hf = E_{n_1} - E_{n_2} \quad (24-3)$$

رابطه‌ی ۲۳-۳ را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم:

$$E_n = -\frac{E_R}{n^2} \quad (25-3)$$

که در آن با استفاده از مقدار کمیت‌های ثابت m, k, e و h 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 ریذبرگ می‌نامند. یک ریذبرگ برابر $13/6$ الکترون ولت یا $2/17 \times 10^{-18}$ ژول است.

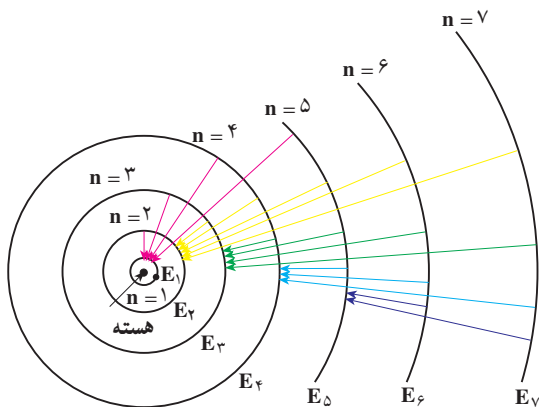
اگر الکترون اتم هیدروژن، در مدار اول ($n=1$) باشد، می‌گوییم در حالت پایه قرار دارد. مدارهای با انرژی بالاتر از E_1 را حالت‌های برانگیخته می‌خوانند. انرژی این حالت‌ها از رابطه‌ی (۲۵-۳) به‌ازای $n=2,3,\dots$ به دست می‌آید:

$$n=2 \Rightarrow E_2 = -\frac{E_R}{4} = -3/4 \text{ eV} = -\frac{1}{4} \text{ ریذبرگ}$$

و

$$n=3 \Rightarrow E_3 = -\frac{E_R}{9} = -1/9 \text{ eV} = -\frac{1}{9} \text{ ریذبرگ}$$

و به همین ترتیب برای بقیه‌ی مقدارهای n . این مقدارها، مقدارهای مجاز انرژی الکترون در اتم هیدروژن‌اند. هر مقدار مجاز انرژی را یک تراز انرژی الکترون در اتم هیدروژن می‌نامیم.



شکل ۳-۱۸

مدارهای الکترون در الگوی بور

برای اتم هیدروژن در شکل ۳-۱۸ نشان داده شده است.

الگوی بور برای اتم هیدروژن نه تنها مشکل ناپایداری الگوی اتمی رادرفورد را نداشت، بلکه به کمک این الگو طیف گسیلی اتم هیدروژن و رابطه‌ی تجربی ریذبرگ - بالمر نیز به درستی توضیح داده شد.

مثال ۳-۷

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 رابطه‌ی ریذبرگ مقایسه کنید.

پاسخ

الف: با استفاده از رابطه‌های ۳-۲۴ و ۳-۲۵ داریم:

$$f = \frac{E_{n_1} - E_{n_2}}{h} = \frac{E_R}{h} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

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

ب: داریم:

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 ریذبرگ است.

در نتیجه با فرضیه‌های بور می‌توانیم رابطه‌ی تجربی ریذبرگ 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 رشته‌ی بالمر را گسیل می‌کند.

تمرین ۳-۷

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 آن‌که الکترونی را از تراز انرژی n_1 به تراز انرژی n_2 ($n_2 > n_1$) منتقل کنیم، باید به آن مقداری انرژی درست برابر اختلاف انرژی دو تراز بدهیم. هر چه اختلاف n_1 با n_2 بیش‌تر باشد، انرژی داده شده به الکترون نیز باید بیش‌تر باشد. این مقدار انرژی را الکترون با جذب فوتونی که درست همین مقدار انرژی دارد به دست می‌آورد.

فعالیت ۳-۶

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 رابطه‌ی ۳-۲۳ 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 پایه‌ی اتم هیدروژن است کاملاً از قید هسته رها کنیم، باید به آن $13/6\text{eV}$ انرژی بدهیم. این مقدار انرژی را **انرژی بستگی الکترون** در تراز اول اتم هیدروژن

می‌نامیم. این مقدار با تجربه به خوبی سازگار است.

تمرین ۳-۸

انرژی بستگی الکترون را در هر یک از حالت‌های برانگیخته‌ی E_3 و E_2 اتم هیدروژن به دست آورید.

نظریه‌ی 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؛ مثلاً، می‌توانیم ترازهای انرژی هلیوم یک بار یونیده (هلیومی که یک الکترون از دست داده باشد)، لیتیم دوبار یونیده، و الی آخر را محاسبه کنیم. در این صورت انرژی‌های مجاز از رابطه‌ی ۳-۲۶ به دست می‌آید.

$$E_n = -E_R \frac{Z^2}{n^2} \quad (۳-۲۶)$$

که در آن Z تعداد پروتون‌های هسته‌ی اتم می‌باشد.

مثال ۳-۸

دو تا از بلندترین طول موج‌های رشته‌ی بالمر بریلیم سه بار یونیده ($Z = 4$) را محاسبه کنید.

پاسخ

چون تابش‌های رشته‌ی بالمر به تراز $n = 2$ ختم می‌شوند، دو تا از بلندترین طول موج‌ها عبارت‌اند از: تابش‌های متناظر با $n = 3 \rightarrow n = 2$ و $n = 4 \rightarrow n = 2$. انرژی این تابش‌ها و طول موج‌های متناظر با آن‌ها عبارت‌اند از:

$$E_3 - E_2 = -(13/6 \text{ eV})(4^2)\left(\frac{1}{9} - \frac{1}{4}\right) = 30/2 \text{ eV}$$

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{30/2 \text{ eV}} = 41 \text{ nm}$$

$$E_4 - E_2 = -(13/6 \text{ eV})(4^2)\left(\frac{1}{16} - \frac{1}{4}\right) = 40/8 \text{ eV}$$

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{40/8 \text{ eV}} = 30/4 \text{ nm}$$

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 درباره‌ی 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.



الف



ب

شکل ۳-۱۹

۳-۵- آشنایی با لیزر

پیش از ۴۰ سال از ساخت نخستین لیزر^۱ یا فوتی توسط مایمن^۲ و نخستین لیزر گازی هلیوم - 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 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 استفاده‌ی ما در زندگی و صنعت، از قبیل دستگاه‌های بازخوانی اطلاعات از روی لوح‌های فشرده، چاپگرها، شبکه‌های مخابرات کابل نوری، دستگاه‌های برش فلزات (شکل ۳-۱۹-الف) و ... کاربرد زیادی پیدا کرده است. در حرفه‌ی پزشکی نیز جهت انجام پاره‌ای امور هم چون جراحی، بخیه‌ی بافت‌های بدن، اصلاح دید چشم (شکل ۳-۱۹-ب) و ... کاربرد زیادی دارد.

۱- کلمه‌ی لیزر از سر حرف واژه‌های انگلیسی در عبارت زیر گرفته شده و به معنای «تقویت نور به روش گسیل القایی تابش» است.

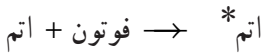
Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)

۲- T.H.Maiman

فعالیت ۳-۷

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:

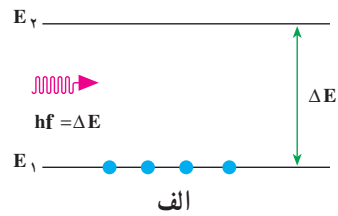
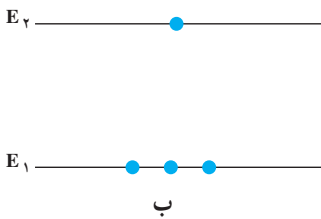


علامت ستاره حاکی از حالت برانگیخته است. برهم کنش فوتون با اتم را جذب می‌نامیم که در نمودارهای شکل ۳-۲ نشان داده شده است. شکل ۳-۲ الف اتم را قبل از دریافت تابش و شکل ۳-۲ ب اتم را پس از دریافت تابش نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینید یکی از الکترون‌هایی که در تراز E_1 قرار دارد با جذب انرژی hf به تراز E_2 می‌رود؛ به عبارت دیگر:

$$E_1 + hf = E_2$$

یا

$$\Delta E = E_2 - E_1 = hf$$



شکل ۳-۲

لازم به ذکر است که اتم تنها فوتون‌هایی را جذب می‌کند که انرژی آن‌ها، hf ، با اختلاف انرژی بین ترازهای اتمی، ΔE ، برابر باشد. هم‌چنین دیدیم که هرگاه اتم در حالت برانگیخته باشد با گسیل یک فوتون به حالت پایین‌تر می‌رود. این برهم کنش گسیل خودبه‌خود نامیده می‌شود و آن را به صورت زیر نمایش می‌دهیم:

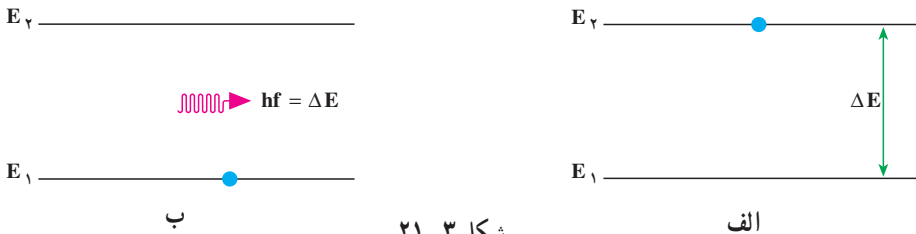
فوتون + اتم \rightarrow اتم*

این برهم کنش در نمودارهای شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است. شکل ۳-۲۱ الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۳-۲۱ ب اتم را در حالت پایه نشان می‌دهد. توجه کنید الکترون با گسیل تابش از حالت برانگیخته به حالت پایه می‌رود. در این مورد نیز انرژی فوتون گسیل شده برابر اختلاف انرژی بین دو تراز اتمی است؛ یعنی:

$$hf = E_2 - E_1 = \Delta E$$

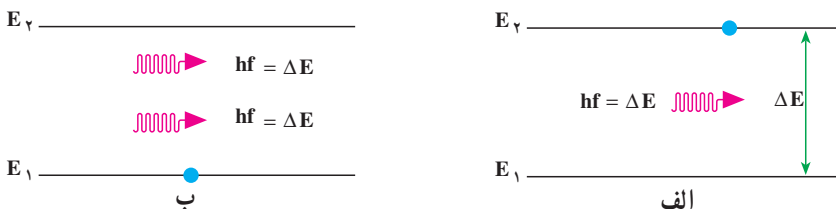
نوع دیگری از برهم کنش فوتون با اتم، که اساس کار لیزر به‌شمار می‌آید، گسیل القایی (یا تحریک شده) است. در این برهم کنش، اتم ابتدا در حالت برانگیخته است. آن‌گاه یک فوتون با انرژی hf که برابر اختلاف انرژی دو تراز اتمی است، اتم برانگیخته را وامی‌دارد تا با گسیل یک فوتون دیگر با همین بسامد، به حالت پایین‌تر یا حالت پایه برود. این برهم کنش را به‌صورت زیر نمایش می‌دهیم:

۲ فوتون + اتم \rightarrow فوتون + اتم*



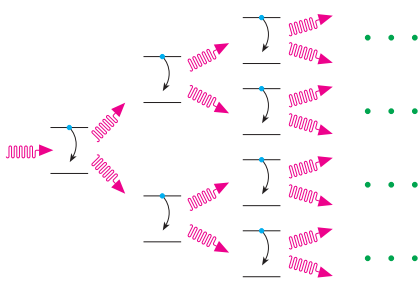
شکل ۳-۲۱

این برهم کنش در نمودارهای شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است. شکل ۳-۲۲ الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۳-۲۲ ب اتم را در حالت پایه نشان می‌دهد. توجه به این نکته ضروری است که اگر اتم در حالتی که در شکل ۳-۲۲ الف نشان داده شده است به حال خود هم گذاشته می‌شود، سرانجام الکترون با تابش یک فوتون به حالت پایین‌تر یا پایه می‌رود، در حالی که با تابش یک فوتون به آن، نه تنها این فرایند سریع‌تر انجام می‌شود، بلکه همان‌طور که در شکل ۳-۲۲ ب نیز دیده می‌شود، فوتون گسیل شده از اتم، با فوتون فرودی هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی است.



شکل ۳-۲۲

اکنون فرض کنید مجموعه‌ای از اتم‌های یکسان که همگی در یک حالت برانگیخته‌اند، در اختیار داریم (شکل ۳-۲۳). فوتونی با انرژی مناسب به اتم اول فرود می‌آید و سبب گسیل القایی یک فوتون هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی با فوتون فرودی می‌شود. به این ترتیب دو فوتون که به لحاظ ویژگی‌های فیزیکی کاملاً مشابه‌اند به وجود می‌آید. اینک هر یک از این دو فوتون باعث فرایند گسیل القایی دیگری می‌شوند، و به این ترتیب چهار فوتون هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی تولید می‌شود. این فرایند، یعنی دو برابر شدن تعداد فوتون‌ها در هر مرحله ادامه می‌یابد تا باریکه‌ی شدیدی از فوتون‌ها که



همگی هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی‌اند، ایجاد شود. این باریکه را یک باریکه‌ی لیزری می‌نامند. این پدیده که به ساده‌ترین شکل بیان شد، اساس کار لیزر را تشکیل می‌دهد. توجه داشته باشید که شکل ۳-۲۳ صرفاً طرح‌واره‌ای از فرایند گسیل القایی را نشان می‌دهد.

شکل ۳-۲۳

تمرین‌های فصل سوم

- 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- طول موج قطع فوتوالکتریک یک سطح فلزی برابر $325/6\text{nm}$ است. به ازای چه طول موجی، ولتاژ متوقف کننده برابر 97V است؟
- ۵- فوتون‌هایی به سطح یک قطعه سدیم که تابع کار آن $2/2\text{eV}$ است فرود می‌آید و موجب گسیل فوتوالکترون‌هایی از سطح این فلز می‌شود. هرگاه ولتاژ متوقف کننده‌ای برابر 5V اعمال شود، جریان ناشی از فوتوالکترون‌ها قطع می‌شود. طول موج فوتون‌های فرودی چه قدر است؟
- ۶- 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 680nm 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؟

۷- در چه مواردی یک جسم، طیف پیوسته یا ناپیوسته گسیل می‌کند؟

۸- آیا ممکن است به کمک طیف گسیلی پیوسته‌ی یک جسم، به جنس آن پی برد؟ به کمک چه طیفی می‌توان این کار را انجام داد؟

۹- آیا ممکن است به کمک طیف خورشید، عناصر موجود در خورشید را شناسایی کرد؟ توضیح دهید.

۱۰- ضعف مدل اتمی رادرفورد را در مورد پایداری اتم توضیح دهید. بور چگونه پایداری اتم هیدروژن را توضیح داد؟

۱۱- ناپیوسته بودن طیف گسیلی اتم هیدروژن را براساس مدل اتمی بور توضیح دهید.

۱۲- در پدیده‌ی شفق قطبی مولکول‌های اکسیژن و نیتروژن جو در اثر برخورد با زبانه‌های خورشیدی یونیده یا برانگیخته می‌شوند. اتم‌های برانگیخته در بازگشت به حالت پایه‌ی خود، فوتون‌هایی گسیل می‌کنند که برخی از رنگ‌های شفق قطبی ناشی از چنین گسیل‌هایی است. در گسیل فوتون از اتم نیتروژن، طول موج فوتون‌ها 630 nm است. رنگ و انرژی این فوتون‌ها را تعیین کنید.

۱۳- طول موج رشته‌ی لیمان مربوط به اتم هیدروژن را با استفاده از رابطه‌ی ریذبرگ حساب کنید. مکان این خطوط را در طیف موج‌های الکترومغناطیسی مشخص کنید.

۱۴- چه جنبه‌هایی از مدل بور در مورد اتم هیدروژن الف: کلاسیکی، و ب: غیر کلاسیکی است؟

۱۵- اگر الکترون در اتم هیدروژن در تراز $n = 4$ باشد، چه طول موج‌هایی را می‌تواند تابش کند؟

۱۶- شکل ۳-۲۴ تعدادی از ترازهای انرژی

اتم هیدروژن را نشان می‌دهد.

الف: چرا تراز $13/6\text{ eV}$ ، تراز پایه نامیده

می‌شود؟

ب: نشان دهید که کم‌ترین طول موج تابش

شکل ۳-۲۴

الکترومغناطیس گسیل شده از اتم هیدروژن تقریباً 90 nm است.

پ: کدام گذار (بین دو تراز) می‌تواند به گسیل فوتونی با طول موج 660 nm منجر شود؟

۱۷- یک لامپ بخار سدیم، فوتون‌هایی با طول موج 589 nm گسیل می‌کند؛ اگر توان تابشی

لامپ 6 W باشد، در هر ثانیه چند فوتون از این لامپ گسیل می‌شود؟

۱۸- طول موج فوتون‌های گسیلی از یک لامپ نارنجی رنگ برابر 600 nm است. بسامد و انرژی فوتون‌های گسیلی را حساب کنید. انرژی را بر حسب ژول و هم‌چنین الکترون-ولت بیان کنید.

۱۹- انرژی یونس، انرژی لازم برای خارج کردن یک الکترون از اتم است. انرژی یونس را در موارد زیر حساب کنید.

الف: حالت پایه‌ی اتم هیدروژن ($n=1$)

ب: تراز $n=3$ اتم هیدروژن.

۲۰- با استفاده از رابطه‌ی بور اختلاف انرژی $\Delta E(n_1 \rightarrow n_2) = E_{n_1} - E_{n_2}$ را حساب کنید و نشان دهید که:

$$\Delta E(4 \rightarrow 2) = \Delta E(4 \rightarrow 3) + \Delta E(3 \rightarrow 2) \quad \text{الف:}$$

$$\Delta E(4 \rightarrow 1) = \Delta E(4 \rightarrow 2) + \Delta E(2 \rightarrow 1) \quad \text{ب:}$$

۲۱- 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؟

۲۲- یکی از مشکلاتی که نازک شدن لایه‌ی 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؟

۲۳- توان باریکه‌ی نور خروجی از یک لیزر گازی هلیم نئون برابر $5/5$ میلی‌وات است. اگر توان ورودی این لیزر 50 W باشد،

الف: بازده این لیزر را حساب کنید.

ب: اگر طول موج باریکه‌ی نور خروجی 633 nm باشد، در هر ثانیه چند فوتون از این لیزر گسیل می‌شود؟

۲۴- کوتاه‌ترین و بلندترین طول موج‌های سری لیمان هلیم یک مرتبه یونیده را حساب کنید.

۲۵- انرژی حالت پایه‌ی لیتیم دو مرتبه یونیده ($Z=3$) را حساب کنید.

۲۶- پایین‌ترین 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 $10^{21} \times 10^7 \text{ Hz}$

است. بسامدهای پایین تر و بالاتر نیز وجود دارند. اما نسبتاً کمیاب اند.

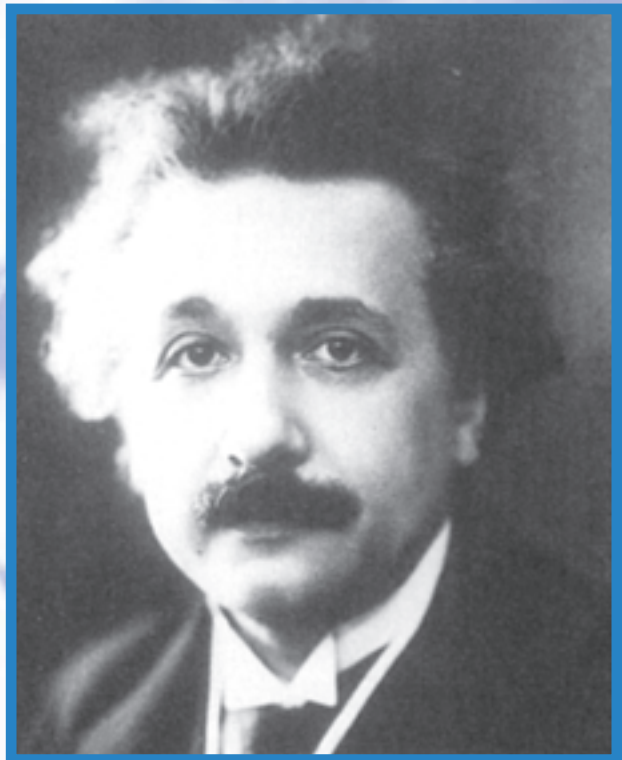
الف: انرژی یک فوتون را در هر یک از این بسامدها برحسب الکترون ولت حساب کنید.

ب: برای آسیب رساندن به یک مولکول DNA چه تعداد از فوتون‌های کم بسامد لازم است؟ (برای آسیب رساندن به مولکول DNA تقریباً 1eV انرژی لازم است.)

پ: چند مولکول DNA توسط یکی از فوتون‌های پرتو گاما منهدم می‌شوند؟



آشنایی با ساختار هسته



آلبرت اینشتین
(۱۸۷۹-۱۹۵۵ م)

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 به‌طور 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 هسته‌ی اتم و برخی از ویژگی‌ها و واکنش‌های مربوط به آن را بررسی می‌کنیم.

۴-۱- ساختار هسته‌ی اتم

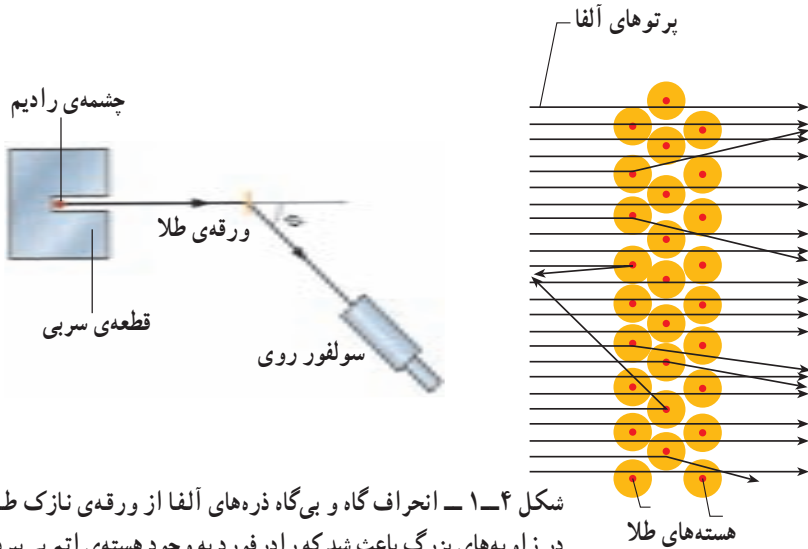
کشف پرتوزایی در سال ۱۸۹۶ میلادی (۱۲۷۵ ه.ش) آغازی برای پی‌بردن به وجود هسته‌ی اتم بود. این کشف به شناخت کنونی ما از اتم انجامید و اطلاعاتی را در اختیار ما قرار داد که پیامدهای آن تأثیری ژرف بر جامعه‌ی بشری داشت.

کشف هسته‌ی اتم: چند سال پس از آن که 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 ورقه‌ی طلا بگذرند. در عمل نیز اغلب این ذره‌ها بدون انحراف یا با انحراف مختصر از ورقه می‌گذشتند و در برخورد با صفحه‌ی فلواتورسان، 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 گلوله‌ی تویی را به ورقه‌ی نازکی از کاغذ شلیک کنید و با شگفتی مشاهده کنید که پس از برخورد گلوله، توپ بازگردد.»

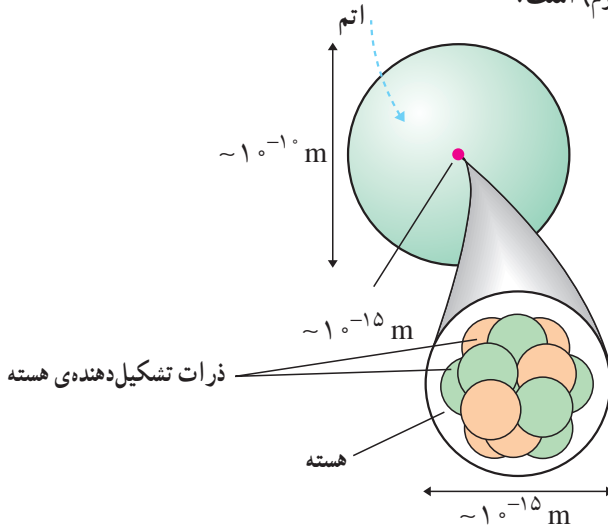
این ذره‌ها باید با چیز پرجرمی برخورد کرده باشند؛ اما با چه چیزی؟ رادرفورد استدلال کرد

که ذره‌های بدون انحراف باید از قسمت‌هایی از ورقه گذشته باشند که تهی بوده باشند، در حالی که ذره‌های با انحراف شدید از مرکزهایی بسیار چگال و دارای بار مثبت منحرف شده بودند. او نتیجه گرفت که هر اتم باید دارای هسته‌ای چگال و دارای بار مثبت باشد.



شکل ۴-۱- انحراف گاه و بی‌گاه ذره‌های آلفا از ورقه‌ی نازک طلا در زاویه‌های بزرگ باعث شد که رادرفورد به وجود هسته‌ی اتم پی‌ببرد.

بررسی‌های رادرفورد نشان داد که ابعاد هسته‌ی اتم در حدود 10^{-15} m (۱ فرمی یا ۱ فمتومتر) و ابعاد اتم 10^{-10} m (۱ آنگستروم) است.



شکل ۴-۲- مقایسه‌ی ابعاد هسته‌ی اتم و اتم

فعالیت ۴-۱

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 هسته‌ی اتم فقط ذره‌های شناخته شده‌ی زیر اتمی الکترون و هسته‌ی هیدروژن معمولی (پروتون) بودند. بعدها با کشف نوترون معلوم شد که هسته از پروتون و نوترون ساخته شده است. جدول ۴-۱، 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.

$$A = Z + N \quad (۴-۱)$$

در فیزیک هسته‌ای هر هسته را با نماد شیمیایی مربوط به آن و A و Z را به صورت زیر مشخص می‌کنند.

$$X = {}_Z^A X$$

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:

$${}^1\text{H} \text{ یا } {}_1^1\text{H} = \text{هسته‌ی اتم هیدروژن}$$

$${}^{16}\text{O} \text{ یا } {}_8^{16}\text{O} = \text{هسته‌ی اتم اکسیژن}$$

$${}^{56}\text{Fe} \text{ یا } {}_{26}^{56}\text{Fe} = \text{هسته‌ی اتم آهن}$$

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 ردیاب در موارد مختلف پزشکی، کشاورزی و صنعت استفاده می‌کنند. چون این ایزوتوپ‌های پرتوزا از نظر شیمیایی تفاوتی با ایزوتوپ‌های پایدار ندارند، پس رفتار آن‌ها هنگام جذب در بدن یا گیاهان مانند ایزوتوپ‌های پایدار است و چون پرتوهایی را از خود گسیل می‌دارند، می‌توان محل و تراکم آن‌ها را به دقت مشخص کرد.

جدول ۴-۱

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 محاسبه‌ی آن به مقدار تقریباً 10^{14} g/cm³ می‌رسیم که به صورتی باورنکردنی بزرگ است (چگالی آب 1 g/cm³). 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 هم‌نام پایدار باشد تا چه رسد به این که 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 شده‌ی کولنی و گرانشی تفاوت بسیار دارد؛ زیرا اولاً، بسیار

قوی تر از این نیروهاست؛ چون اجزای هسته را به رغم نیروی رانشی بین پروتون‌های آن به صورت بسیار فشرده در کنار هم نگه می‌دارد. دوم این که، 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 هسته‌ی دارای بار مثبت و الکترون دارای بار منفی بررسی می‌شود.

فعالیت ۲-۴

با مراجعه به کتاب‌های فیزیک ۲ و ۳ و با استفاده از جدول ۳-۴ نیروهای گرانشی و الکتریکی بین دو پروتون را که به فاصله‌ی r از یک‌دیگر قرار دارند، محاسبه کنید.

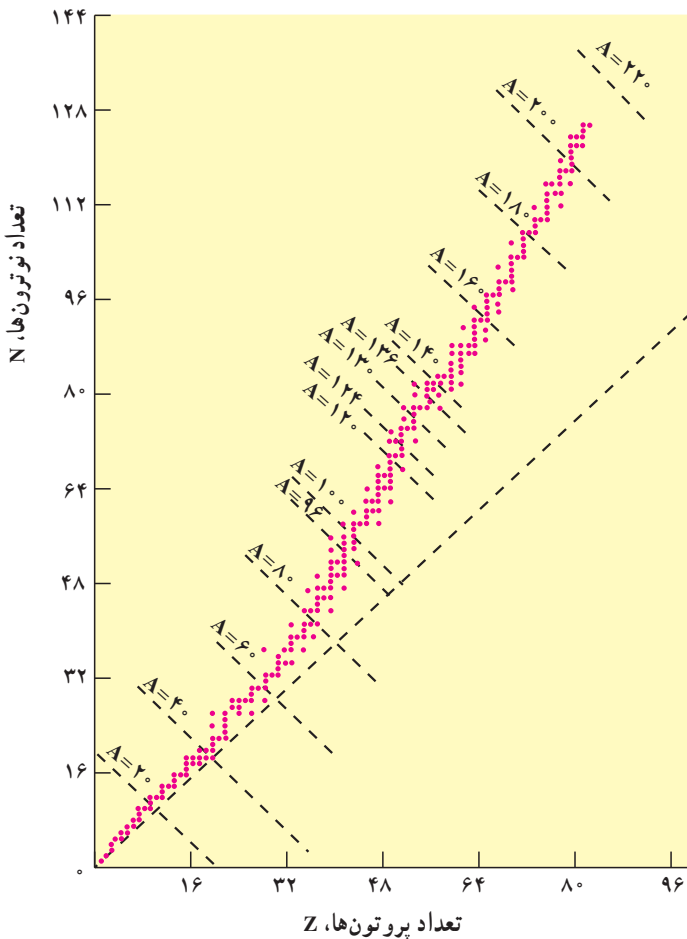
پایداری هسته‌ها: دیدیم که در هسته علاوه بر نیروی رانش کولنی بین پروتون‌ها، نیروی ربایش هسته‌ای بین کلیه اجزاء هسته اعم از پروتون‌ها و نوترون‌ها نیز حکمفرماست. از دید نیروی هسته‌ای، تفاوتی بین پروتون و نوترون وجود ندارد. از این رو آن‌ها را با نام عام «نوکلئون» نیز می‌نامند. پس وقتی می‌گوییم نوکلئون منظورمان 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 ۳-۴ نشان داده شده است. 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 رایش هسته‌ای اضافه می‌کند بدون این که رانش کولنی داشته باشد.



شکل ۳-۴

فعالیت ۳-۴

با توجه به شکل ۳-۴ و با بحث در گروه خود به پرسش‌های زیر پاسخ دهید؛
 الف) خط راست خط‌چین 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 تشکیل دهنده‌اش 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 هسته‌ی X را با M_x و جرم پروتون را با M_p و جرم نوترون را با M_n نشان دهیم، خواهیم داشت:

$$M_x < ZM_p + NM_n \quad (۲-۴)$$

اگر اختلاف جرم دو طرف رابطه‌ی بالا را با ΔM نشان دهیم، خواهیم داشت:

$$\Delta M = ZM_p + NM_n - M_x \quad (۳-۴)$$

این اختلاف جرم طبق رابطه‌ی معروف اینشتین:

$$E = mc^2 \quad (۴-۴)$$

به انرژی تبدیل می‌شود. این انرژی را «انرژی بستگی» می‌نامند و آن را با B نشان می‌دهند. پس داریم:

$$B = \Delta mc^2 = [ZM_p + NM_n - M_x] c^2 \quad (۵-۴)$$

در موقع تشکیل هسته‌ی X از Z پروتون و N نوترون این انرژی آزاد می‌شود و برای جدا کردن هسته به اجزاء تشکیل دهنده‌اش، 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 رابطه‌ی ۴-۵ 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 یکاهای متداول جرم چون کیلوگرم و گرم استفاده کرد. یکای مورد استفاده در فیزیک هسته‌ای یکای جرم اتمی است که آن را با «u» نشان می‌دهند و عبارت است از $\frac{1}{12}$ جرم اتم کربن ۱۲ که آن را طبق تعریف $12/000000000000$ u در نظر می‌گیرند. برحسب این یکا، جرم پروتون $1/007276$ u و جرم نوترون $1/008665$ u است.

مثال ۴-۱

الف: یکای جرم اتمی را برحسب کیلوگرم محاسبه کنید.

ب: اگر $1u$ تبدیل به انرژی شود، این انرژی معادل چند الکترون است؟

پاسخ

می‌دانیم که یک مول از هر ماده حاوی تعداد ذرات (اتم، مولکول یا هر چیز دیگر) مساوی زیر است:

$$N_A = 6/022137 \times 10^{23} \text{ به ازای هر مول}$$

پس یک مول کربن یعنی 12 kg نیز حاوی همین تعداد اتم کربن است؛ پس:

$$1u = \frac{1}{12} (12 \text{ kg}) \frac{1}{6/022137 \times 10^{23}} = 1/6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

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.

مثال ۲-۴

هسته‌ی 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 هسته‌ی دوتریوم را حساب می‌کنیم.

جرم یک الکترون - جرم اتم دوتریوم = جرم هسته‌ی دوتریوم

$$\begin{aligned} m({}^2\text{H}) &= M({}^2\text{H}) - M(e) \\ &= 2/014102u - 0/000549u \\ &= 2/013553u \end{aligned}$$

به این ترتیب انرژی بستگی هسته‌ی دوتریم برابر است با

$$\begin{aligned} B &= [m_n + m_p - m({}^2\text{H})] c^2 \\ &= [1/008665u + 1/007276u - 2/013553u] \times 931/5 = 2/22 \text{ MeV} \end{aligned}$$

تمرین ۱-۴

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. هسته‌ی برانگیخته را با گذاشتن ستاره روی نماد A_ZX به صورت ${}^A_ZX^*$ مشخص می‌کنند.

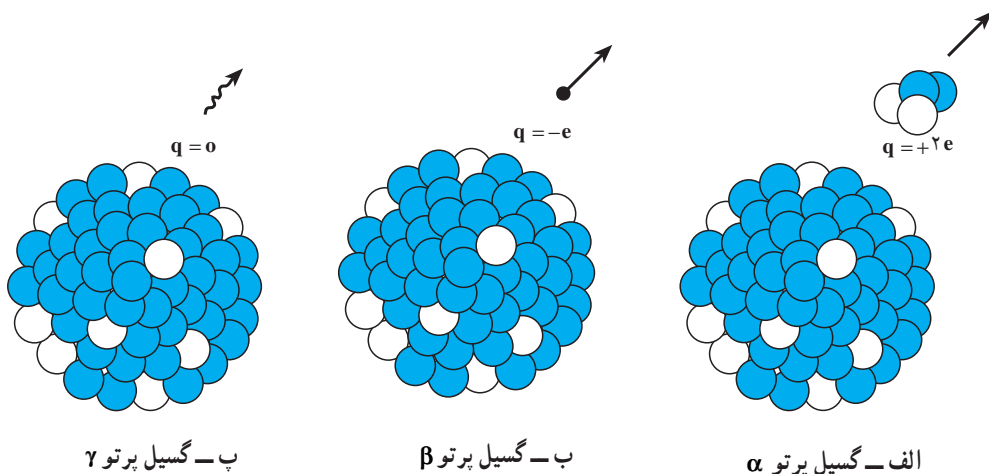
همان‌گونه که دیدیم، انرژی واکنش شیمیایی در حدود چند الکترون‌ولت و انرژی لازم برای برانگیختگی هسته‌ها معمولاً در محدوده‌ی کیلو الکترون‌ولت تا میلیون الکترون‌ولت است؛ از این‌رو، هسته‌ها در واکنش‌های شیمیایی برانگیخته نمی‌شوند.

۴-۲- پرتوزایی

همان‌طور که قبلاً گفتیم، تحولاتی در فیزیک که به پیدایش فیزیک جدید و گسترش فیزیک هسته‌ای انجامید با کشف پدیده‌ی پرتوزایی شکل گرفت. در سال ۱۸۹۶ میلادی، هانری بکرل به صورت کاملاً تصادفی متوجه شد که سنگ معدن اورانیم پرتوهای نافذی را از خود گسیل می‌دارد. هسته‌های پرتوزا ناپایدارند و با گذشت زمان خود به خود و بدون تأثیرپذیری از شرایط خارجی، پرتوهایی را گسیل می‌دارند و به تدریج به هسته‌های پایدار تبدیل می‌شوند. همان‌گونه که در شکل ۴-۴ نشان داده شده است، هسته‌های پرتوزا با گسیل یکی از پرتوهای زیر واپاشیده می‌شوند.

۱- واپاشی آلفا: در این نوع واپاشی که در هسته‌های سنگین صورت می‌گیرد، هسته‌ی A_ZX با گسیل ذره‌ی α (${}^4_2\text{He}$) متشکل از دو پروتون و دو نوترون و می‌باشد (شکل ۴-۴ الف).





شکل ۴-۴

هسته‌ی X را «هسته‌ی مادر» و هسته‌ی Y را «هسته‌ی دختر» می‌نامند؛ هسته‌ی Y محصول واپاشی دارای عددجرمی $A-4$ و عدد اتمی $Z-2$ است. این واپاشی با آزاد شدن انرژی همراه است که این انرژی بین محصولات واپاشی تقسیم می‌شود و بخش عمده‌ی آن را ذره‌ی α به همراه می‌برد. ذره‌های آلفا سنگین و دارای دو بار مثبت‌اند. بُرد این ذره‌ها بسیار کوتاه است و به سرعت جذب می‌شوند ولی اگر این ذره‌ها از راه تنفس یا دستگاه گوارش وارد بدن شوند، باعث آسیب شدید به بافت‌های بدن می‌شوند، بنابراین، باید مواظب بود که مواد آلفا گسیل هرگز وارد بدن نشوند.

۲- واپاشی بتا: این متداول‌ترین نوع واپاشی در هسته‌هاست. در این واپاشی هسته‌ی ناپایدار با گسیل الکترون یا پوزیترون (ذره‌ای دارای جرم برابر جرم الکترون و بار مخالف آن) به هسته‌ی جدیدی تبدیل می‌شود (شکل ۴-۴ ب).

این نوع واپاشی بسیار شگفت‌انگیز است؛ زیرا الکترون قبلاً در هسته وجود ندارد و در حین واپاشی به وجود می‌آید. در فرایند واپاشی همراه با گسیل الکترون یک نوترون در هسته تبدیل به پروتون و الکترون می‌شود. فرایند را می‌توان به صورت زیر نوشت:



در فرایند گسیل پوزیترون یک پروتون به نوترون و پوزیترون تبدیل می‌شود که می‌توان آن را به

صورت زیر نوشت:



محصول این نوع واپاشی هسته‌ی جدیدی است که عدد اتمی آن برخلاف مورد گسیل الکترون که عدد اتمی هسته‌ی دختر یک واحد بیش‌تر از هسته‌ی مادر است، یک واحد از هسته‌ی مادر کم‌تر است.

۳- واپاشی گاما: در این نوع واپاشی، هیچ یک از عددهای جرمی و اتمی هسته تغییر نمی‌کند بلکه هسته‌ای که در حالت برانگیخته است، با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسد. (شکل ۴-۴ پ) این فرایند را می‌توان به صورت زیر نشان داد:



اغلب هسته‌ها پس از گسیل ذره‌های آلفا و بتا در حالت برانگیخته هستند و با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسند؛ بنابراین، گسیل پرتو گاما اغلب با گسیل آلفا و بتا همراه است. پرتو گاما همان ویژگی‌های پرتو X را دارد ولی از آن پراثری‌تر 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 (۴-۷ تا ۱۰) یکسان است.

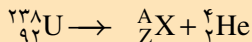
۲- مجموع عددهای جرمی در دو طرف رابطه‌های بالا یکسان است.

مثال ۴-۳

در واپاشی هسته‌ی اورانیم - ۲۳۸ $[{}^{238}_{92}\text{U}]$ یک ذره‌ی آلفا گسیل می‌شود. معادله‌ی این واپاشی را بنویسید و تعیین کنید که بر اثر این واپاشی چه عنصری تولید می‌شود.

پاسخ

معادله‌ی واپاشی به صورت زیر است:



با استفاده از پایستگی عدد جرمی داریم:

$$238 = A + 4$$

$$A = 234$$

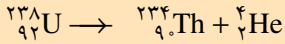
و با بهره‌گیری از عدد اتمی دو طرف داریم:

$$92 = 2 + Z$$

$$Z = 90$$

با مراجعه به جدول تناوبی معلوم می‌شود که عنصر با $Z = 90$ توریم است؛ پس

داریم:



تمرین ۴-۲

فسفر - ۳۲ $[{}_{15}^{32}\text{P}]$ با گسیل الکترون و امی باشد. معادله‌ی این واپاشی را بنویسید و تعیین کنید که در آن چه عنصری تولید می‌شود.

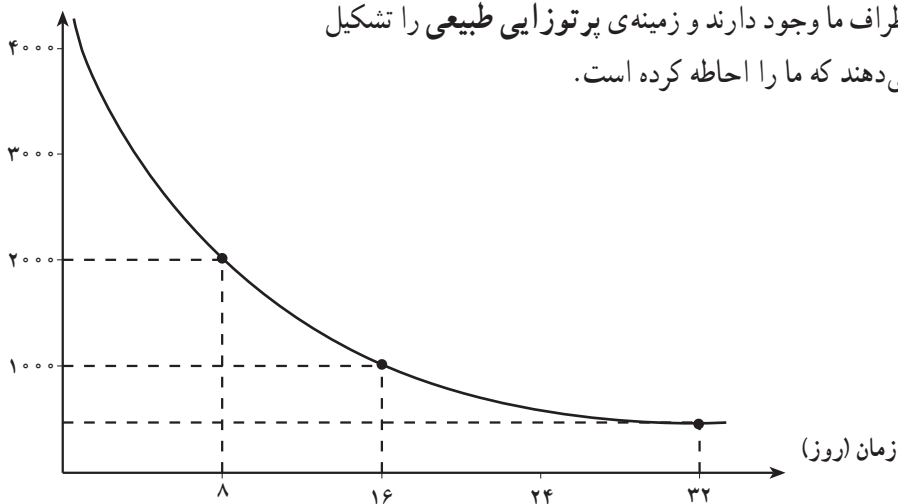
تمرین ۴-۳

آلمونیم - ۲۵ $[{}_{13}^{25}\text{Al}]$ با گسیل پوزیترون و امی باشد. معادله‌ی واپاشی را بنویسید و عنصر محصول آن را مشخص کنید.

نیمه عمر ماده‌ی 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 ۴-۵ 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 ($4/5 \times 10^9$ 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

تعداد هسته‌های ^{131}I



اطراف ما وجود دارند و زمینه‌ی پرتوزایی طبیعی را تشکیل می‌دهند که ما را احاطه کرده است.

شکل ۴-۵- نمودار واپاشی ایزوتوپ ^{131}I

مثال ۴-۴

در حادثه‌ی چرنوبیل یکی از ایزوتوپ‌هایی که مشکل آلودگی مواد غذایی را به وجود آورد ^{131}I بود. این ایزوتوپ، فرآر است و همراه با جریان‌های جوّی تا نقطه‌های دوردست حرکت کرد و با نشستن بر روی برگ گیاهان سبب آلودگی گوشت و شیر دام‌هایی که این گیاهان را می‌خوردند، شد. نیمه عمر این ایزوتوپ $8/0$ 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.

تعداد نیمه عمرهای سپری شده	۰	۱	۲	۳	۴	۵
هسته‌های باقیمانده	N_0	$\frac{N_0}{2}$	$\frac{1}{2} \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4}$	$\frac{1}{2} \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{8}$	$\frac{1}{2} \frac{N_0}{8} = \frac{N_0}{16}$	$\frac{1}{2} \frac{N_0}{16} = \frac{N_0}{32}$

بنابراین، پس از گذشت 40 روز تعداد هسته‌های پرتوزای موجود در نتیجه،

فعالیت آن‌ها به $\frac{1}{33}$ 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 باقی مانده را می‌توانیم از رابطه‌ی $\frac{N_0}{2^n}$ به دست آوریم که در آن n از رابطه‌ی $n = \frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$ به دست می‌آید. t زمان مورد نظر برای واپاشی و $T_{\frac{1}{2}}$ نیمه عمر ایزوتوپ است.

مطالعه‌ی آزاد

نکته‌های ایمنی

حفاظت در برابر پرتوها: یکی از ویژگی‌های مهم ذرات و پرتوهایی که از مواد پرتوزا گسیل می‌شود این است که حواس معمولی ما به آن‌ها حساس نیستند؛ مثلاً، وقتی دستمان را به آتش نزدیک می‌کنیم سوزش ناشی از آن باعث می‌شود که آن را عقب بکشیم ولی این موضوع در مورد پرتوهای کیهانی و آنچه از مواد پرتوزا خارج می‌شود، صادق نیست؛ بنابراین باید به کمک دستگاه‌هایی آن‌ها را آشکار ساخت و به وجود آن‌ها پی برد. ذره‌های دارای بار الکتریکی مانند ذره‌های آلفا و بتا هنگام عبور از ماده به واسطه‌ی بار الکتریکی خود باعث برانگیختگی و یونش اتم‌های محیط می‌شوند و می‌توان از این موضوع برای آشکارسازی آن‌ها استفاده کرد. البته، این برانگیختگی و یونش تغییرهای شیمیایی را در بدن به وجود می‌آورد که باعث آسیب رساندن به بافت‌های زنده می‌شود. البته هر چه این ذره‌ها انرژی خود را در مسافت کوتاه‌تری از بافت از دست بدهند، آسیب وارده شدیدتر و ترمیم آن دشوارتر خواهد بود؛ بدین سبب، آسیب ذره‌های آلفا بسیار شدیدتر از ذره‌های بتا خواهد بود.

پرتوهای بدون باری چون پرتوهای X و γ نیز بر اثر برهم کنش با ماده، ذره‌های باردار ثانویه به وجود می‌آورند و این ذره‌های ثانویه به بافت‌های زنده آسیب می‌رسانند. از این ویژگی پرتوها برای از بین بردن غده‌های سرطانی بهره می‌گیرند؛ بدین ترتیب که با تمرکز این پرتوها بر روی غده‌ها آن‌ها را نابود می‌سازند. این کار را «پرتودرمانی» می‌نامند. نوترون‌ها نیز گرچه بدون بارند ولی در هنگام ورود به بدن بر اثر برخورد با هیدروژن‌های آب - که بخش اعظم بدن را تشکیل می‌دهد - انرژی خود را به آن منتقل می‌کنند و

باعث به حرکت در آمدن یک پروتون پراثرزی در بدن می‌شوند که اثر زیان بار آن بسیار شدید است؛ بنابراین، نوترون‌ها مخصوصاً وقتی سریع باشند، بسیار خطرناک‌اند. آسیب وارد از تابش بر بدن ممکن است، یا بافت زنده را کاملاً از بین ببرد یا بدون از بین بردن آن باعث جهش در ژن‌های آن شود. یاخته‌هایی که از این یاخته‌های جهش یافته به وجود می‌آیند، با آن تفاوت خواهند داشت. این جهش‌ها می‌تواند به تولید بافت‌های سرطانی یا نوزادان ناقص الخلقه بینجامد. البته در مواردی نیز از این جهش‌ها برای تولید گیاهانی استفاده می‌شود که از گیاهان معمولی مقاوم‌ترند یا ویژگی بهتری دارند. به این ترتیب، در برخورد با مواد پرتوزا بایستی همواره احتیاط کرد تا پرتوگیری از این مواد به کم‌ترین مقدار ممکن برسد. چشمه‌های پرتوزا باید حفاظ داشته باشند و در هنگام کار باید آن‌ها را به کمک وسیله‌هایی در فاصله‌ی دور از بدن نگه داشت.

فعالیت ۴-۴

فضانوردان در معرض انواع گوناگونی از تابش‌ها، از جمله تابش‌های کیهانی و بادهای خورشیدی قرار دارند. تحقیق کنید فضانوردان چگونه خود را در برابر بخشی از این تابش‌ها مصون می‌دارند؟

۴-۳- 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 وجود آوردن عناصر جدید، در نهایت تعجب متوجه تولید باریوم شدند که جرمش در حدود نصف اورانیم بود. این دو تمایلی به باور نتیجه‌ی آزمایش خود نداشتند. اوتوهان خبر این کشف را برای همکار سابق خود لیزمیتنر^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، هسته‌ی 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 جاذبه‌ی هسته‌ای بر دافعه‌ی کولنی غلبه می‌کنند. در

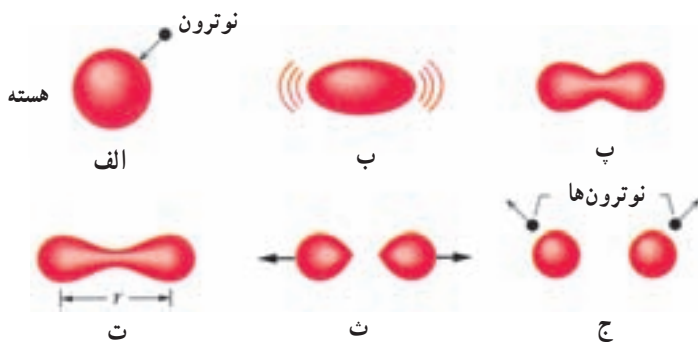
۱- Otto Hahn

۲- Fritz Strassman

۳- Lise Meitner

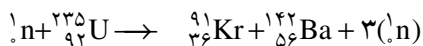
۴- Otto Frisch

هسته‌ی اورانیم غلبه‌ی 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 هسته‌ی اورانیم اندکی کشیده شود (شکل ۴-۶)، نیروهای الکتریکی می‌توانند آن را کشیده‌تر کنند. اگر این کشیدگی از مرحله‌ی بحرانی بگذرد، نیروهای هسته‌ای تسلیم نیروهای الکتریکی می‌شوند و هسته به دو بخش تقسیم می‌شود. جذب نوترون در هسته‌ی اورانیم انرژی لازم جهت این کشیده شدن را تأمین می‌کند و هسته شکافته می‌شود.

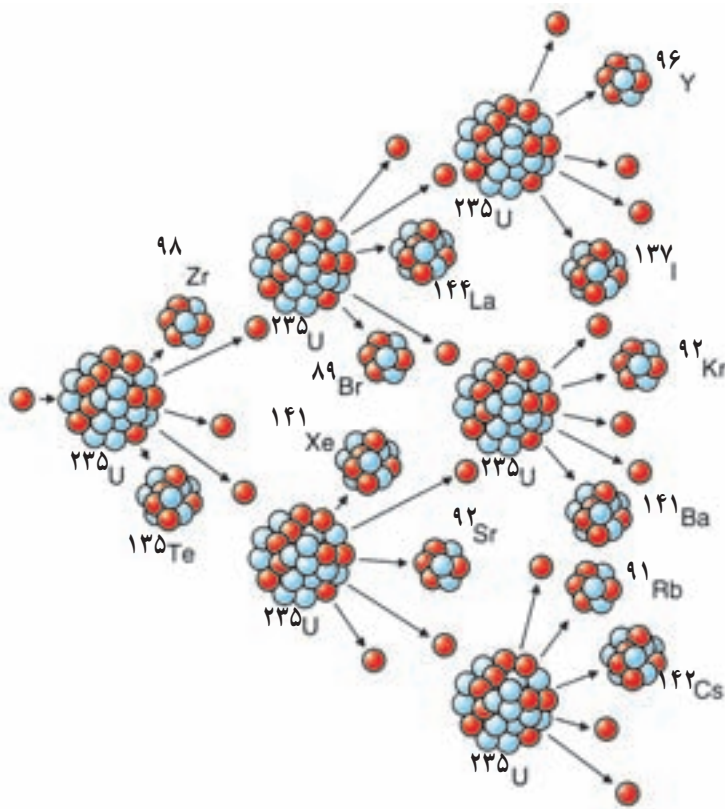


شکل ۴-۶— تغییر شکل هسته‌ای وقتی به وجود می‌آید که نیروی دافعه‌ی الکتریکی بر نیروی جاذبه‌ی هسته‌ای غلبه کند (شکل ت)، که در این صورت شکافت صورت می‌گیرد.

در فرایند شکافت، ترکیب‌های مختلفی از هسته‌های کوچک‌تر به وجود می‌آیند که یک نمونه‌ی 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 هسته‌ی 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 ۴-۷). در هر واکنش شکافت $200/000/000$ الکترون ولت (200MeV) انرژی آزاد می‌شود (برای مقایسه، در هر انفجار مولکول TNT فقط 30 الکترون ولت انرژی آزاد می‌شود). مجموع جرم پاره‌های شکافت و نوترون‌های تولید شده در واکنش از جرم اورانیم اولیه اندکی کم‌تر است. این اختلاف جرم مختصر طبق رابطه‌ی $E = mc^2$ اینشتین به انرژی تبدیل می‌شود. بد نیست بدانید که بیش‌تر این انرژی به صورت انرژی جنبشی محصولات شکافت در می‌آید که همراه نوترون‌ها از محل واکنش خارج می‌شوند. بخش اندکی از این انرژی نیز به صورت پرتوهای مختلف در می‌آید. شاید این پرسش مطرح شود که چرا واکنش زنجیره‌ای هم‌اکنون به طور طبیعی در معدن‌های اورانیم رخ نمی‌دهد؟



شکل ۴-۷- 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.

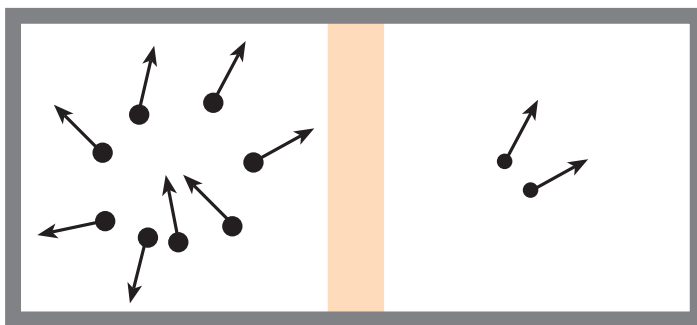
اگر واکنش زنجیره‌ای در قطعه‌ای از اورانیم به اندازه‌ی کافی بزرگ رخ دهد، به احتمال زیاد انفجاری به وقوع می‌پیوندد؛ اما واکنش زنجیره‌ای در قطعه‌ای کوچک از اورانیم، انفجاری را به وجود نمی‌آورد؛ زیرا نوترون‌های تولید شده در فرایند شکافت در اورانیم، پیش از برخورد با هسته‌ی اورانیم باید مسافتی را طی کنند. اگر اندازه‌ی قطعه‌ی اورانیمی که در آن شکافت صورت می‌گیرد کوچک باشد، نوترون‌ها پیش از برخورد با هسته‌ی اورانیم دیگر، از قطعه فرار می‌کند.

جرم بحرانی: جرمی است که برای آن هر شکافت به طور میانگین شکافت دیگری را به وجود می‌آورد. جرم زیر بحرانی، جرمی است که در آن واکنش زنجیره‌ای ادامه نمی‌یابد. جرم فوق بحرانی،

جرمی است که در آن واکنش زنجیره‌ای به صورت انفجاری رشد می‌کند.

غنی‌سازی اورانیم: واکنش زنجیره‌ای معمولاً در اورانیم طبیعی خالص به وقوع نمی‌پیوندد؛ زیرا بخش اعظم آن (۳/۹۹ درصد) از ^{238}U تشکیل شده است. برای انفجارهای هسته‌ای به ^{235}U خالص نیاز داریم و برای استفاده در نیروگاه‌های هسته‌ای نیز باید فراوانی ^{235}U را به صورت مصنوعی زیاد کرد که این کار را «غنی‌سازی» می‌نامند. جداساختن ایزوتوپ کمیاب ^{235}U از ایزوتوپ فراوان ^{238}U بسیار دشوار است؛ زیرا هر دو ایزوتوپ به لحاظ شیمیایی یکسان‌اند و نمی‌توان از واکنش‌های شیمیایی استفاده کرد. جداسازی این دو ایزوتوپ براساس اختلاف جرم آن‌ها صورت می‌گیرد.

یکی از روش‌های انجام این عمل استفاده از فرایند پخش است. در این روش، اورانیم در ترکیب با فلورین به صورت گاز هگزا فلورید اورانیم (UF_6) در می‌آید. چون ایزوتوپ سبک‌تر ^{235}U در دمای مساوی، سرعت متوسط آن کمی بیش از ایزوتوپ ^{238}U است و با آهنگ بیش‌تری از غشایی نازک می‌گذرد. پخش از هزاران مرحله، سرانجام باعث تولید نمونه‌ی اورانیم با غنای مناسب می‌شود. این مقدار برای نیروگاه‌های تولید برق در حدود ۳ درصد است.



شکل ۴-۸- 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 سانتریفوژ گازی راحت‌تر صورت می‌گیرد. گاز هگزا فلورید اورانیم در یک استوانه با سرعت‌های فوق‌العاده زیاد از مرتبه‌ی 1500 کیلومتر در ساعت چرخانده می‌شود. مولکول‌های گاز حاوی ^{238}U سنگین، مانند شیر در جداکننده‌های لبنیات، به خارج رانده می‌شوند و مولکول‌های گاز حاوی ^{235}U سبک‌تر، از مرکز استخراج می‌شوند. مشکلات مهندسی این روش در سال‌های اخیر برطرف شده است.

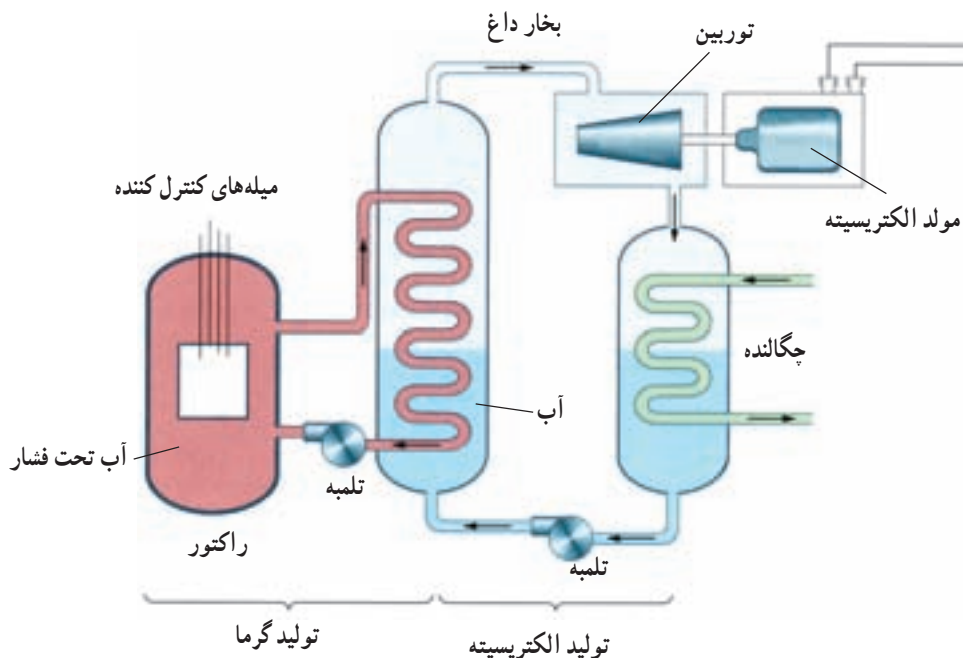
راکتورهای شکافت هسته‌ای: دیدیم که واکنش شکافت زنجیره‌ای معمولاً در اورانیم طبیعی خالص صورت نمی‌گیرد، زیرا بخش اعظم آن ^{238}U است، و نوترون‌های آزاد شده در شکافت ^{235}U که نوترون‌های سریع هستند را اتم‌های ^{238}U جذب می‌کنند بدون این که باعث شکافت شوند. این واقعیت تجربی مهم که نوترون‌های کند را ^{235}U با احتمال بیش‌تر از ^{238}U جذب می‌کند اهمیت بسیار دارد. اگر نوترون‌ها را بتوان کُند ساخت، احتمال جذب نوترون ناشی از شکافت در یک اتم ^{235}U دیگر، حتی در حضور ^{238}U ، افزایش می‌یابد. این افزایش احتمال می‌تواند برای به‌وجود آوردن واکنش زنجیره‌ای کافی باشد.

در کمتر از یک سال پس از کشف شکافت هسته‌ای، دانشمندان متوجه شدند که اگر اورانیم به قطعه‌های کوچک‌تر تقسیم شود و در بین این قطعه‌ها ماده‌ای قرار گیرد که نوترون‌های حاصل از شکافت* را کند و احتمال جذب آن‌ها در اورانیم را زیاد سازد، می‌توان با استفاده از اورانیم طبیعی واکنش زنجیره‌ای به‌وجود آورد.

این روش را اولین بار ارنیکورفرمی در سال ۱۹۴۲ میلادی (۱۳۲۱ ه.ش) در دانشگاه شیکاگو انجام داد. در اولین واکنش زنجیره‌ای کنترل شده، از گرافیت برای کُند کردن نوترون‌ها استفاده شده بود. دلیل استفاده از گرافیت این بود که نوترون در برخورد با آن، بخش قابل ملاحظه‌ای از انرژی خود را از دست می‌داد. اگر نوترون از هسته‌ای سنگین پس زده شود، سرعت و انرژی آن تغییر چندانی نخواهد کرد اما در برگشت از هسته‌ی سبک کربن، سرعتش به طور قابل ملاحظه‌ای کم می‌شود. می‌گویند گرافیت «کُند کننده‌ی» نوترون است. کل این دستگاه را «راکتور» می‌نامند.

راکتورهای هسته‌ای کنونی علاوه بر سوخت هسته‌ای دارای کُند کننده، میله‌های کنترل، و شاره‌ای (معمولاً آب) برای خارج ساختن گرما از راکتورند. سوخت هسته‌ای در درجه‌ی اول ^{238}U به علاوه ۳ درصد ^{235}U است. چون ^{235}U با ^{238}U بسیار رقیق شده است، امکان انفجار هسته‌ای مانند بمب در آن وجود ندارد. با وارد کردن میله‌های کنترل به داخل راکتور، آهنگ واکنش یعنی تعداد نوترون‌های موجود برای به‌وجود آوردن شکافت، تنظیم می‌شود. میله‌های کنترل معمولاً از مواد جذب‌کننده نوترون، مانند کادمیم یا بور، ساخته می‌شوند. آبی که سوخت هسته‌ای را احاطه کرده است معمولاً تحت فشار زیاد قرار می‌دهند تا بدون جوشیدن به دماهای زیاد برسد. آبی که بر اثر واکنش شکافت هسته‌ای گرم شده است، به دستگاهی با فشار آب کم‌تر منتقل می‌شود که با تولید بخار، توربین و ژنراتور الکتریسیته را به کار می‌اندازد؛ از این‌رو، از دو دستگاه آب، به طور جداگانه، استفاده

* - انرژی جنبشی متوسط این نوترون‌ها ۲ MeV است.

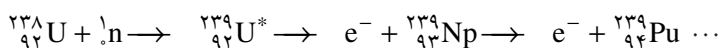


شکل ۴-۹- نمودار یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

می‌شود تا مواد پرتوزا وارد توربین نشوند.

تولید پلوتونیم: وقتی ^{238}U نوترونی را جذب می‌کند، شکافتی صورت نمی‌گیرد. هسته‌ی حاصل از جذب نوترون، ^{239}U ، پرتوزاست. این هسته با نیمه عمر ۲۳ دقیقه، یک ذره‌ی بتا گسیل می‌کند و به اولین عنصر فرا اورانیمی به نام نپتونیم (Np)؛ نام اولین سیاره‌ای که از طریق قانون گرانش نیوتون کشف شد تبدیل می‌شود. این ایزوتوپ ^{239}Np نیز پرتوزاست و با نیمه عمر ۲/۳ روز و گسیل ذره‌ی بتا به پلوتونیم تبدیل می‌شود (Pu)؛ نام پلوتون، دومین سیاره‌ای که به کمک قانون گرانش نیوتون کشف شد).

نیمه عمر ایزوتوپ ^{239}Pu برابر ۲۴۰۰۰ سال است. ^{239}Pu نیز مانند ^{235}U با جذب نوترون شکافته می‌شود. جالب توجه آن که ^{239}Pu از ^{235}U شکافت پذیرتر است.



^{238}U با جذب نوترون به ^{239}U تبدیل می‌شود. این ایزوتوپ با گسیل ذره‌ی بتا به ^{239}Np تبدیل می‌شود که آن هم با گسیل یک ذره‌ی بتای دیگر به ^{239}Pu تبدیل می‌شود. استفاده از شکافت در تولید انرژی: انرژی حاصل از شکافت هسته‌ای با انفجار بمب‌های

هیروشیما و ناکازاکی به جهانیان معرفی شد. این تصویر هولناک هنوز از تفکری که در مورد انرژی هسته‌ای وجود دارد، رخت برنسته است. فاجعه‌ی 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 ۴-۱۰- نمونه‌ای از یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

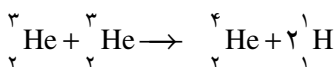
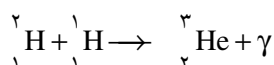
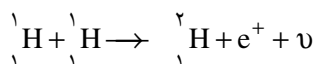
نقطه ضعف اصلی استفاده از شکافت هسته‌ای تولید پسماندهای پرتوزاست. همان‌طور که قبلاً گفتیم، برای پایدار ماندن هسته باید با زیاد شدن عدد اتمی، نسبت نوترون به پروتون افزایش یابد. این نسبت برای هسته‌های سبک برابر ۱، در هسته‌های متوسط $1/2$ و در هسته‌ی سنگینی چون سرب $1/5$ است. وقتی هسته‌ی سنگینی چون اورانیم 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 همین‌طور گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن، که هر سال با سوزاندن سوخت‌های فسیلی وارد جو می‌شود و با به‌وجود آوردن مسئله‌ی گرم‌شدن گلخانه‌ای تهدیدی عظیم برای محیط زیست انسان است.

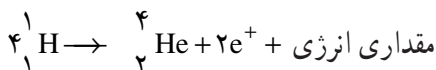
مطالعه‌ی آزاد

همجوشی هسته‌ای

در واکنش شکافت هسته‌ای، دیدیم که هسته‌ی سنگین با جذب یک نوترون به دو هسته‌ی 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 هسته‌ی سبک با یک‌دیگر ترکیب می‌شوند و هسته‌ی سنگین‌تری تولید می‌کنند. در این واکنش نیز جرم هسته‌ی تولید شده کم‌تر از جرم هسته‌های اولیه است و در نتیجه مقداری انرژی آزاد می‌شود.



کل فرآیند را می‌توان به صورت زیر نوشت:



در این واکنش چهار هسته‌ی اتم هیدروژن (یعنی چهار پروتون) با هم ترکیب می‌شوند و یک هسته‌ی هلیم ۴ (یعنی یک ذره‌ی آلفا) به اضافه‌ی یک پوزیترون (e^+) تولید می‌کنند و مقداری انرژی نیز آزاد می‌نمایند. پوزیترون پاد ذره‌ی 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 این که ذره‌هایی که در این واکنش باید با هم ترکیب شوند بار مثبت دارند و برای آن که 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 این که دو پروتون را به اندازه‌ی کافی به هم نزدیک کنیم باید آن‌ها را با انرژی حدود $1\text{MeV}/10^7$ 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 $10^7\text{ }^\circ\text{C}$ 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 $10^7 \times 2\text{ }^\circ\text{C}$ است، در نتیجه واکنش همجوشی هسته‌ای در خورشید و ستارگان به‌طور عادی صورت می‌گیرد.

بخش عمده‌ی انرژی خورشیدی از طریق واکنش همجوشی تأمین می‌شود. این انرژی به‌اندازه‌ای است که هم خورشید را داغ نگه می‌دارد و هم انرژی لازم را برای منظومه‌ی خورشیدی و از آن جمله سیاره‌ی زمین فراهم می‌کند.

تمرین‌های فصل چهارم

۱- استرانسیوم $^{90}_{38}\text{Sr}$ در اثر انفجارهای هسته‌ای تولید می‌شود و نیم‌عمر آن ۲۸ سال است. این ایزوتوپ را گیاهان جذب می‌کنند و از طریق غذا وارد بدن انسان می‌شود. تعداد پروتون‌ها،

نوترون‌ها و الکترون‌های موجود در هر اتم با هسته‌ی $^{90}_{38}\text{Sr}$ چقدر است؟

۲- آیا ایزوتوپ $^{61}_{25}\text{X}$ را می‌توان با روش شیمیایی از ایزوتوپ $^{59}_{25}\text{Y}$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ

$^{61}_{26}\text{Z}$ چطور؟

۳- هنگامی که از ایزوتوبی یک ذره‌ی آلفا گسیل می‌شود، چه تغییری در هسته رخ می‌دهد؟

هنگام گسیل یک ذره‌ی بتا چطور؟ هنگام گسیل پرتو گاما چطور؟

۴- گاهی گفته می‌شود که «جرم را نمی‌توان تولید و نابود کرد» این گفته را تحلیل کنید.

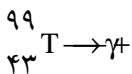
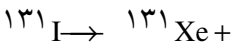
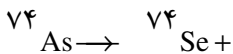
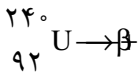
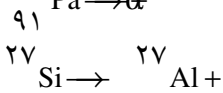
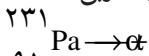
۵- گاهی گفته می‌شود که تمام منابع انرژی از انرژی هسته‌ای حاصل شده‌اند. آیا سوخت‌هایی مانند زغال‌سنگ و نفت هم از انرژی هسته‌ای به دست آمده‌اند؟ توضیح دهید.

۶- هریک از اتم‌های زیر چند الکترون، چند پروتون و چند نوترون دارند؟

الف: بریلیم 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- نیم‌عمر بیسموت ۲۱۲ در حدود ۶۰ دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری

از ماده‌ی اولیه باقی مانده است؟

۹- آلومینیوم تنها یک ایزوتوپ پایدار ${}_{13}^{27}\text{Al}$ به جرم اتمی $26/981541u$ دارد. جرم اتمی

دو ایزوتوپ ناپایدار ${}_{13}^{26}\text{Al}$ و ${}_{13}^{28}\text{Al}$ به ترتیب برابر $25/986982u$ و $27/981905u$ است. انرژی

بستگی هر یک از سه 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، ۱/۵۶ درصد (معادل $\frac{1}{64}$) مقدار عادی کربن ۱۴ است. سن تقریبی زغال

چه مقدار است؟ (نیمه عمر کربن ۱۴ برابر ۵۷۳۰ سال است).

H
هیدروژن
۱

H
هیدروژن
۱

نام عنصر →
← تعداد شیبهای
← عدد اتمی

Li لیتیم ۳	Be بریلیم ۴
Na سدیم ۱۱	Mg منیزیم ۱۲
K پتاسیم ۱۹	Ca کلسیم ۲۰
Rb روبییدیم ۳۷	Sr استرانسیم ۳۸
Cs سزیم ۵۵	Ba باریم ۵۶
Fr فرانسیسم ۸۷	Ra رادیوم ۸۸

Sc اسکاندیم ۲۱	Ti تیتانیم ۲۲	V وانادیم ۲۳	Cr کروم ۲۴	Mn منگنز ۲۵	Fe آهن ۲۶	Co کوبالت ۲۷	Ni نیکل ۲۸	Cu مس ۲۹	Zn روی ۳۰
Y ایتروم ۳۹	Zr زیروکونیم ۴۰	Nb نیوبیم ۴۱	Mo مولیبدن ۴۲	Tc تکنسیم ۴۳	Ru روتنم ۴۴	Rh رودیم ۴۵	Pd پالادیم ۴۶	Ag نقره ۴۷	Cd کادمیم ۴۸
La لاانتان 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
Ac اکتیئم ۸۹	Rf رادرفوردیوم ۱۰۴	Db دانبیم ۱۰۵	Sg سیبورگیوم ۱۰۶	Bh بوریم ۱۰۷	Hs هاسیم ۱۰۸	Mt مایتنریم ۱۰۹			

B بور ۵	C کربن ۶	N نیتروژن ۷	O اکسیژن ۸	F فلور ۹	He هلیوم ۲
Al آلومینیم ۱۳	Si سیلیسیم ۱۴	P فسفر ۱۵	S گوگرد ۱۶	Cl کلر ۱۷	Ne نون ۱۰
Ga گالیم ۳۱	Ge ژرمانیم ۳۲	As آرسنیک ۳۳	Se سلنیم ۳۴	Br برم ۳۵	Kr کریپتون ۳۶
In ایندم ۴۹	Sn فلج ۵۰	Sb آنتیمون ۵۱	Te تلوریم ۵۲	I ید ۵۳	Xe زنون ۵۴
Tl تالیم ۸۱	Pb سرب ۸۲	Bi بیسموت ۸۳	Po پولونیم ۸۴	At استاتین ۸۵	Rn رادون ۸۶

Ce سرم ۵۸	Pr پرازئودیوم ۵۹	Nd نئودیم ۶۰	Pm پرومتیم ۶۱	Sm ساماریوم ۶۲	Eu یورپیم ۶۳	Gd گادولینیم ۶۴	Tb تریم ۶۵	Dy دیسپروزیم ۶۶	Ho هولم ۶۷	Er اریتم ۶۸	Tm تولیم ۶۹	Yb ایتربیم ۷۰	Lu لوئسیوم ۷۱
Th توریم ۹۰	Pa پروتکتینیم ۹۱	U اورانیم ۹۲	Np نپتونیوم ۹۳	Pu پلوتونیوم ۹۴	Am امرسیم ۹۵	Cm کوریوم ۹۶	Bk برکلیم ۹۷	Cf کالیفرنیم ۹۸	Es ایشتنیم ۹۹	Fm فرمیوم ۱۰۰	Md مندیلیفیم ۱۰۱	No نوبلیوم ۱۰۲	Lr لارنسیوم ۱۰۳

ناهنر

شبه فلز

فلز

واژه‌نامه‌ی فارسی – انگلیسی

ا - ا

Threshold of pain	آستانه‌ی دردناکی
Threshold of hearing	آستانه‌ی 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
Electromagnetic 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
Kinetic energy	انرژی جنبشی
Ionization energy	انرژی یونش
Isotope	ایزوتوپ

ب

Charge	بار
Resultant	برآیند
Vector	بردار
Position vector	بردار مکان

Unit vector	بردارهای یکه
Interaction	برهم کنش
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
Conservation of mechanical energy	پایستگی انرژی مکانیکی
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	تجزیه‌ی 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 ریدبرگ
Constant of spring	ثابت فنر

ج

Displacement	جابہ جایی (تغییر مکان)
Wave front	جبهه ی موج
Black body	جسم سیاه
Addition of vectors	جمع بردارها
Nuclear fusion	جوش هسته ای (همجوشی هسته ای)
Direction	جهت

چ

Source	چشمه، منبع
--------	------------

ح

Volume	حجم
Motion with constant acceleration	حرکت با شتاب ثابت
Projectile	حرکت پرتابی
Accelerating motion	حرکت تند شونده
Circular motion	حرکت دایره ای
Uniform circular motion	حرکت دایره ای یکنواخت
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 ی موج

Period	دوره
Tuning fork	دیاپازون
Dynamics	دینامیک
Diode	دیود

ذ

Beta particle	ذره ی بتا
---------------	-----------

ر

Radioactive	رادیاوکتیو
Radioactivity	رادیاوکتیویته
Conductor	رسانا
Series of lines	رشته ی 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
Nuclear fission	شکافت هسته

Antinode		شکم (موج)
Slope		شیب خط
	ص	
Sound		صوت
	ض	
Static coefficient of friction		ضریب اصطکاک حالت سکون
Kinematic coefficient of friction		ضریب اصطکاک لغزشی
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		فرا بنفش
Ultrasound		فراصوت
Disintegration		فروپاشی
Infrared		فروسرخ
Subsonic		فروصوت
Spring		فنر
Atomic physics		فیزیک اتمی
Nuclear physics		فیزیک هسته ای
	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 ناپیوسته
Scalar quantity	کمیت زده‌ای

گ

Transition	گذار
Emission	گسیل

ل

Lyman	لیمان
-------	-------

م

Satelite	ماهواره
Horizontal axis	محور افقی
Vertical axis	محور قائم
Bohr's model	مدل بوهر
Path	مسیر
Maxwell equations	معادله‌های ماکسول
Wave	موج
Standing wave	موج ایستاده
Plane wave	موج تخت
Sinusoidal wave	موج سینوسی
Longitudinal wave	موج طولی
Sound wave	موج صوتی
Transverse wave	موج عرضی
Spherical wave	موج کروی
Mechanical wave	موج مکانیکی
Components of a vector	مؤلفه‌های یک بردار

ن

Discrete	ناپیوسته
Observer	ناظر
Relativity	نسبیت
Heliocentric theory	نظریه‌ی خورشید مرکزی
Geocentric theory	نظریه‌ی 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
Dynamometer	نیروسنج
Restoring force	نیروی بازگرداننده
Gravitational force	نیروی گرانشی
Centripetal force	نیروی مرکزگرا
Nuclear force	نیروی هسته‌ای
Half life	نیمه عمر

و

Decay	واپاشی
Reaction	واکنش
Chain reaction	واکنش زنجیره‌ای
Equilibrium state	وضع تعادل
Stopping potential	ولتاژ متوقف‌کننده

ه

Fusion	همجوشی
Nucleus	هسته (اتم)
Stable nucleus	هسته‌ی پایدار
Unstable nucleus	هسته‌ی ناپایدار
Homogeneous	همگن

ی

Unit	یکا
------	-----

فهرست منابع

- 1- Physics Raymond A. Serway Jerry S. Faughn 1999 by Holt Rinehart and Winston.
- 2- Physics for Scientists and Engineers Paul A. Tipler 1999 by W. H. Freedman and Company.
- 3- College Physics Raymond A. Serway Jerry S. Faughn 1999,2000, Sauners College Publishing.
- 4 - Fundamentals of Physics.
David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker 2001 John Wiley & Sons, Inc.
- 5 - Physics. principles with Applications Douglas C. Gioncoli 1991 Prentice - Hall International Editions.
- 6 - Understanding Physics Robin Millar 1994 Collins Educational.
- 7 - Physics Classical and Modern, Frederick J. Keller W. Edward Gettys, Malcolm J. Skove 1993 Mc Graw Hill.
- 8 - University Physics, Hugh D. Young, Roger A. Freedman, 2000 Addison Wesley Longman, Inc.
- 9- Contemporary College Physics. Jones / Childers 1999 by Mc Graw Hill Companies.
- 10 - Physics 2 David Sanq 2001 Cambridge University Press.
- 11 - The Physical Universe, Krauskopf / Beiser, 1993 Mc Graw Hill, Inc.
- 12 - Physics, Hugh D.Young, Eight Edition, 1992, Addison Wesley Publishing Company.
- ۱۳- پرسش‌ها و مسئله‌های تکمیلی فیزیک ۲و۱ پیش‌دانشگاهی، انتشارات فاطمی، ۱۳۸۷
- ۱۴- دانش‌نامه‌ی جهان اسلام، بنیاد دایرة المعارف اسلامی، گروه نویسندگان
- ۱۵- دایرة المعارف اسلامی، مرکز دایرة المعارف بزرگ اسلامی، گروه نویسندگان

