بسم الله الرحمن الرحیم

فیزیک (۱) و (۲)

دورهٔ پیش‌دانشگاهی

رشتهٔ علوم ریاضی

۱۳۹۰

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) ـ ۲۹۳/۲**

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

آماده‌سازی و نظارت بر چاپ و توزیع : **ادارهٔ کلّ چاپ و توزیع کتاب‌های درسی**

تهران: خیابان ایرانشهر شمالی ـ ساختمان شمارهٔ ۴آموزش و پرورش(شهید موسوی)

تلفن: ۹ـ ۸۸۸۳۱۱۶۱ ، دورنگار : ۸۸۳۰۹۲۶۶ ، کد پستی : ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹،

وب‌سایت: **www.chap.sch.ir**

رسام : **فاطمه رئیسیان فیروزآباد**

صفحه‌آرا : **طرفه سهائی**

طراح جلد : **طاهره حسن‌زاده**

ناشر : **شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران: تهران ـ کیلومتر ۱۷ جادّهٔ مخصوص کرج ـ خیابان ۶۱ (داروپخش)**

تلفن: ۵ ـ ۴۴۹۸۵۱۶۱، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۱۳۴۴۵/۶۸۴

چاپخانه : **شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»**

سال انتشار و نوبت چاپ : **چاپ دهم ۱۳۹۰**

حقّ چاپ محفوظ است.

شابک ۹-۱۱۵۷-۰۵-۹۶۴ ISBN 964-05-1157-9

هر کاری 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

فصل ۱: حرکت‌شناسی در دو بعد ۲

۱ـ۱ـ حرکت در یک بعد ۳

۱ـ۲ـ حرکت در دو بُعد یا حرکت در صفحه ۱۶

تمرین‌های فصل اوّل ۳۳

فصل ۲: دینامیک ۳۷

۲ـ۱ـ قانون‌های نیوتون ۳۸

۲ـ۲ـ چگونگی استفاده از قانون‌های نیوتون در حرکت یک جسم ۴۲

۲ـ۳ـ تکانه (اندازه حرکت) ۵۱

۲ـ۴ـ حرکت دایره‌ای ۵۶

۲ـ۵ـ حرکت دایره‌ای یکنواخت ۵۸

۲ـ۶ـ دینامیک حرکت دایره‌ای یکنواخت ۶۴

۲ـ۷ـ قانون‌های کپلر ۷۰

تمرین‌های فصل دوم ۷۳

فصل ۳: حرکت نوسانی ۷۷

۳ـ۱ـ حرکت هماهنگ ساده ۷۸

۳ـ۲ـ معادله‌ی حرکت هماهنگ ساده ۸۲

۳ـ۳ـ معادله‌های سرعت و شتاب در حرکت هماهنگ ساده ۸۹

۳ـ۴ـ انرژی مکانیکی نوسانگر (دستگاه جرم ـ فنر) ۹۱

۳ـ۵ـ نوسان وزنه ـ فنر در راستای قائم ۹۳

۳ـ۶ـ آونگ ساده ۹۴

۳ـ۷ـ تشدید ۹۷

تمرین‌های فصل سوم ۱۰۰

فصل ۴: موج‌های مکانیکی (۱) ۱۰۳

۴ـ۱ـ موج ۱۰۴

۴ـ۲ـ موج‌های عرضی ـ موج‌های طولی ۱۱۳

۴ـ۳ـ تابع موج ۱۱۴

تمرین‌های فصل چهارم ۱۲۲

فیزیک ۲

فصل ۱: موج‌های مکانیکی (۲) ۱۲۵

۱ـ۱ـ انتشار موج در دو و سه بُعد ۱۲۶

۱ـ۲ـ اصل برهم نهی موج‌ها ۱۳۱

۱ـ۳ـ برهم نهی موج‌ها در دو بُعد ـ تداخل موج‌ها در سطح آب ۱۴۰

۱ـ۴ـ تحلیل ریاضی تداخل موج‌ها ۱۴۲

۱ـ۵ـ موج صوتی ۱۴۴

۱ـ۶ـ سرعت صوت ۱۴۷

۱ـ۷ـ لوله‌های صوتی ۱۵۱

۱ـ۸ـ شدت صوت ۱۵۸

۱ـ۹ـ اثر دوپلر ۱۶۳

تمرین‌های فصل اوّل ۱۶۸

فصل ۲: موج‌های الکترومغناطیسی ۱۷۱

۲ـ۱ـ چگونگی تشکیل موج‌های الکترومغناطیس توسط آنتن ۱۷۳

۲ـ۲ـ سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی ۱۷۷

۲ـ۳ـ طیف موج‌های الکترومغناطیسی ۱۷۸

۲ـ۴ـ تداخل موج‌های نوری ۱۸۱

تمرین‌های فصل دوم ۱۸۶

فصل ۳: آشنایی با فیزیک اتمی ۱۸۸

۳ـ۱ـ نظریه‌ی کوانتومی ۱۹۰

۳ـ۲ـ فوتون و پدیده‌ی فوتوالکتریک ۱۹۷

۳ـ۳ـ طیف اتمی ۲۰۶

۳ـ۴ـ الگوهای اتمی ۲۱۴

۳ـ۵ـ آشنایی با لیزر ۲۲۲

تمرین‌های فصل سوم ۲۲۶

فصل ۴: آشنایی با فیزیک حالت جامد و ساختار هسته ۲۲۹

۴ـ۱ـ موادّ رسانا و نارسانا ۲۳۰

۴ـ۲ـ نظریه‌ی نواری ۲۳۲

۴ـ۳ـ رسانش الکتریکی در مدل ساختار نواری ۲۳۶

۴ـ۴ـ برخی از ویژگی‌های نیمرساناها ۲۳۷

۴ـ۵ـ آلایش نیمرساناها ۲۳۹

۴ـ۶ـ دیود و پیوندگاه p ـ n ۲۴۲

۴ـ۷ـ ابر رساناها ۲۴۶

۴ـ۸ـ ساختار هسته‌ی اتم ۲۵۱

۴ـ۹ـ پرتوزایی ۲۵۹

۴ـ۱۰ـ انرژی هسته‌ای ۲۶۵

تمرین‌های فصل چهارم ۲۷۴

واژه‌نامه‌ی فارسی ــ انگلیسی ۲۸۰

فهرست مراجع ۲۸۸

پیش‌گفتار

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

با توجه به نکات بالا این کتاب براساس روش فعال برنامه‌ریزی و تألیف شده است ؛ یعنی، دانش‌آموز در تولید مفاهیم نقش دارد و نقش دبیران محترم، بیش‌تر طرح مسئله و سپس راهنمایی دانش‌آموزان برای رسیدن به حلّ مسئله است. در این کتاب، هم‌چنین سعی شده است 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 ریاضی انتخاب شده است.

انتظار می‌رود همکاران گرامی، با تکیه بر تجربه‌ها و توانایی‌های خود، فعالیت‌هایی را که

می‌تواند به یادگیری بهتر کمک کند، طراحی کرده و دانش‌آموزان را به‌طور گروهی به انجام‌دادن 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 سنّ دانش‌آموزان و زمان تخصیص داده شده به این درس، تدارک دیده شده است ؛ لذا از همکاران محترم خواهشمندیم از پیرایه‌های اضافی به این مباحث، بپرهیزند.

گروه فیزیک دفتر برنامه‌ریزی و تألیف کتب درسی از شورای دبیران این گروه خانم‌ها: **احترام اسماعیلی، مهرناز طلوع‌شمس** و آقایان : **محمدعلی پزشپور، اسماعیل حیدری‌فرد، علی‌اصغر رسایی، غلامرضا شمسایی‌زفرقندی، حسن قلمی باویل علیایی، شاهرخ لقایی** و **اسفندیار معتمدی** که تمام متن کتاب را به دقت خوانده و پیشنهادهای سازنده‌ای جهت بهبود آن ارائه کرده‌اند، تشکر می‌کند.

گروه فیزیک، هم‌چنین از دریافت نظرهای ارزشمند دبیران محترم، صاحب‌نظران و دانش‌آموزان، جهت رفع نارسایی‌ها و لغزش‌های احتمالی به گرمی استقبال می‌کند. لطفاً نظریات اصلاحی خود را به نشانی : تهران ــ 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 ــ 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 بازنویسی بخش هسته‌ای فصل ۴ کتاب فیزیک ۲ را به عهده داشتند صمیمانه تشکر می‌شود.

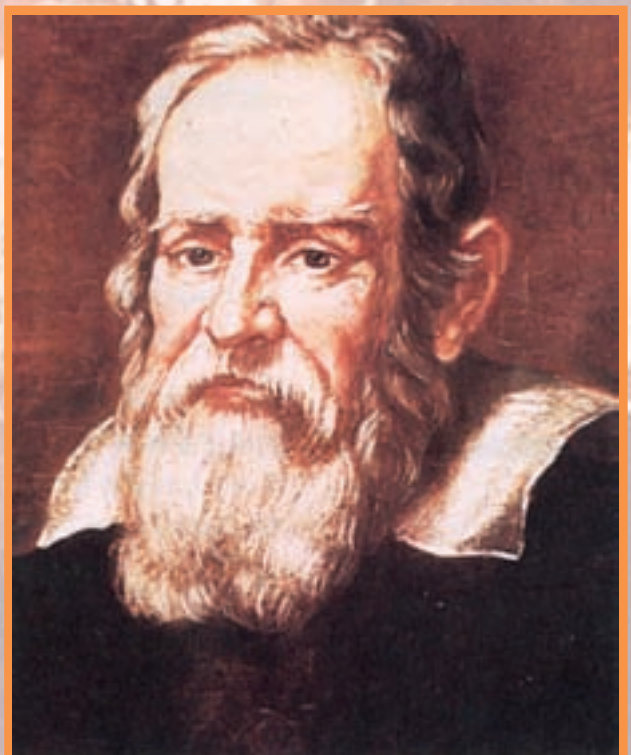
معلمان محترم، صاحب نظران، دانش آموزان عزیز و اولیای آنان می توانند نظرات اصلاحی خود را در بارهٔ مطالب این کتاب از طریق نامه به نشانی تهران - صندوق پستی ۳۶۳ ۱۵۸۵۵ - گروه درسی مربوط و یا پیام نگار (Email) talif@talif.sch.ir ارسال نمایند.

دفتر برنامه ریزی و تألیف کتاب های درسی

فیزیک ۱

۱

حرکت شناسی در دو بعد



گالیلئو گالیله

(۱۵۶۴ـ۱۶۴۲م)

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؟ و... پاسخ این پرسش‌ها را باید در علم مکانیک جست‌وجو کرد. علمی که در آن حرکت اجسام مورد بررسی قرار می‌گیرد. هنگامی که چگونگی حرکت را توصیف می‌کنیم، با بخشی از علم مکانیک که **حرکت‌شناسی** نامیده می‌شود، سروکار داریم. بخش دیگری از علم مکانیک، **دینامیک** است که به بررسی رابطه‌ی بین حرکت و نیرو می‌پردازد.

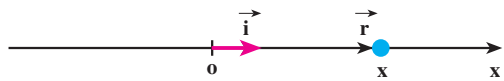
در فیزیک (۲) و آزمایشگاه تا اندازه‌ای حرکت‌شناسی در یک بعد را مورد بررسی قرار دادیم، با کمیت‌های مکان، جابه‌جایی سرعت متوسط و ... آشنا شدیم، و حرکت یکنواخت و حرکت با شتاب ثابت برروی یک خط راست را نیز بررسی کردیم. ما در زندگی روزمره بیش‌تر با حرکت‌هایی که در دو بعد و سه بعد انجام می‌شوند سروکار داریم،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

۱ــ۱ــ حرکت در یک بعد

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

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

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



شکل ۱ــ۱

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

$$x = f(t) \qquad (۲ــ۱)$$

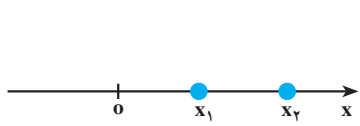
این رابطه، **معادله‌ی حرکت** جسم نامیده می‌شود.

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

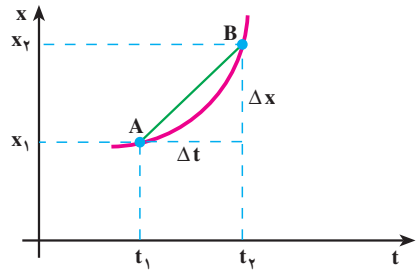
تمرین ۱ــ۱

معادله‌ی حرکت جسمی در یک بعد در SI با رابطه‌ی $x = -t^۲ + ۶t - ۸$ بیان شده است. الف : نمودار مکان ــ زمان آن را رسم کنید. ب : بردار مکان جسم را در زمان‌های (s) ۳ ، ۱ ، $t = ۰$ روی محور x نمایش دهید.

سرعت متوسط: نمودار مکان ــ زمان جسمی در شکل ۱ــ۲ــ الف نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ــ۲ــ ب نشان داده شده است، متحرک در لحظه‌ی $t_۱$ در مکان $x_۱$ (نقطه‌ی A) روی نمودار مکان ــ زمان و در لحظه‌ی $t_۲$ در مکان $x_۲$ (نقطه‌ی B) قرار دارد.



شکل ۱ــ۲ــ ب



شکل ۱ــ۲ــ الف

در این شکل، $\Delta x = x_۲ - x_۱$ مقدار جابه‌جایی متحرک در بازه‌ی زمانی $\Delta t = t_۲ - t_۱$ ، و نسبت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ ، که شیب خط AB در دستگاه مکان ــ زمان است، سرعت متوسط متحرک نامیده می‌شود. این کمیت را با $\bar{v}_x$ نشان دادیم :

$$\bar{v}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad (۳ــ۱)$$

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

مثال ۱ــ۱

معادله‌ی حرکت جسمی در SI با رابطه‌ی $x = ۲t^۲ + ۱$ بیان شده است. سرعت متوسط آن را در بازه‌های زمانی (الف) ۱ تا ۲ ثانیه، (ب) ۱ تا ۱/۱ ثانیه، (پ) ۱ تا ۱/۰۱ ثانیه و (ت) ۱ تا ۱/۰۰۱ ثانیه به دست آورید.

پاسخ

الف :

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

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

ب :

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

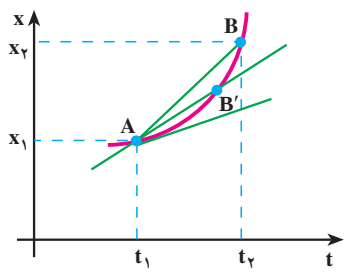
پ :

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

ت :

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

سرعت لحظه‌ای: در فیزیک(۲) و آزمایشگاه دیدیم که اگر بازه‌ی زمانی Δt کوچک و کوچک‌تر شود، نقطه‌ی B به نقطه‌ی A نزدیک و نزدیک‌تر شده و سرانجام، خط AB در نقطه‌ی A بر نمودار مماس می‌شود (شکل ۱ــ۳). شیب خط مماس را در این حالت، سرعت لحظه‌ای جسم در لحظه‌ی $t_۱$ می‌نامیم.



شکل ۱ــ۳

به‌عبارت دیگر، هنگامی که $t_۲$ به $t_۱$ 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 $t_۱$ 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 :

$$v_x = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad (۴ــ۱)$$

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

$$v_x = \frac{dx}{dt} \qquad (۵ــ۱)$$

اگر $x = f(t)$ معلوم باشد، از رابطه‌ی ۱ــ۵ 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 ــ زمان مماس می‌شود. این همان تعبیر هندسی **مشتق** است که در درس ریاضی خوانده‌اید. از این پس، سرعت لحظه‌ای را ــ برای اختصار ــ سرعت می‌نامیم.

مثال ۱ــ۲

در مثال ۱ــ۱، معادله‌ی حرکت متحرک به صورت $x = ۲t^۲ + ۱$ است.

الف : معادله‌ی سرعت آن را به دست آورید.

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

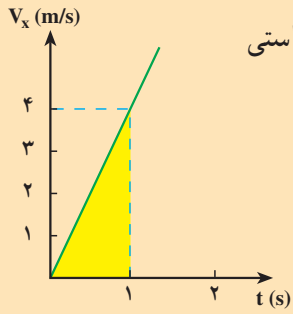
پ : سرعت متحرک را در لحظه‌ی $t = ۱s$ به دست آورید.

پاسخ

الف : با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۵ داریم :

$$v_x = \frac{dx}{dt} = ۴t$$

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



شکل ۱ــ۴

پ :

$$v_x = 4t$$

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

این نتیجه را می‌توانستیم از مثال ۱ــ۱ حدس بزنیم ؛ زیرا در آن مثال با نزدیک شدن t_2 به t_1 ، سرعت متوسط جسم نیز به مقدار $4\,m/s$ (سرعت جسم در لحظه‌ی $t = 1s$) نزدیک می‌شود.

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

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

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

مثال ۱ــ۳

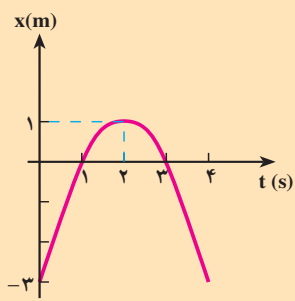
معادله‌ی حرکت جسمی در SI با رابطه‌ی $x = -t^2 + 4t - 3$ بیان شده است.
الف : معادله‌ی سرعت آن را به دست آورید. ب : نمودارهای مکان ــ زمان و سرعت ــ زمان متحرک را در ۴ ثانیه‌ی اول رسم کنید. پ : نمودار مسیر حرکت جسم را رسم و چگونگی حرکت را توصیف کنید.

پاسخ

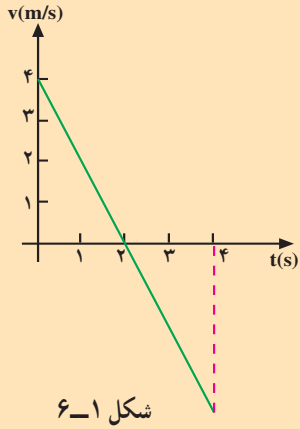
الف : با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۵ داریم :

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

ب : نمودار مکان ــ زمان متحرک به صورت یک سهمی (شکل ۱ــ۵) است که بیشینه‌ی آن در لحظه‌ی $t = 2s$ است (چرا؟). هم‌چنین، جسم در لحظه‌های $t = 1s$ و $t = 3s$ در مبدأ و در لحظه‌ی $t = 0$ ، در نقطه‌ی $x = -3\,m$ قرار دارد.



شکل ۱ــ۵

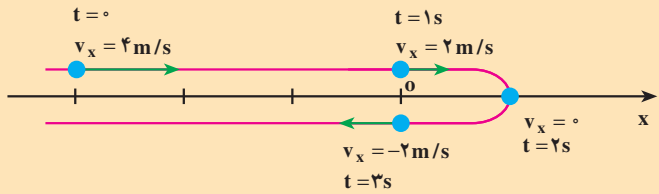


شکل ۱ــ۶

نمودار سرعت ــ زمان متحرک به صورت یک خط راست است (شکل ۱ــ۶) که در بند (الف) معادله‌ی آن را به دست آوردیم.

پ : با توجه به این نمودارها ملاحظه می‌شود که متحرک در لحظه‌ی $t = ۰$ در مکان $x = -۳\,m$ قرار دارد و با سرعت $۴\,m/s$ در جهت محور xحرکت می‌کند. سپس سرعت آن به تدریج کاهش می‌یابد (شیب مماس بر نمودار مکان ــ زمان در شکل ۱ــ۵ به تدریج کم می‌شود) تا در لحظه‌ی $t = ۲\,s$ که سرعت آن صفر می‌شود. می‌توان گفت شیب مماس بر نمودار مکان ــ زمان در این لحظه صفر می‌شود.

از لحظه‌ی $t = ۲\,s$ به بعد متحرک برمی‌گردد و در خلاف جهت محور x شروع به‌حرکت می‌کند و v_x منفی می‌شود. در برگشت، اندازه‌ی سرعت افزایش می‌یابد و در لحظه‌ی $t = ۳\,s$ دوباره از مبدأ می‌گذرد. در این لحظه، سرعت آن $-۲\,m/s$ است. مسیر حرکت جسم در شکل ۱ــ۷ رسم شده و بردار سرعت آن نیز روی شکل نمایش داده شده است.



شکل ۱ــ۷

در شکل ۱ــ۷ 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 :

$$x = -t^۲ + ۴t - ۳$$

$$v_x = -۲t + ۴$$

مثال ۱ــ۴

متحرکی با سرعت ثابت $5\,m/s$ ، در خلاف جهت محور x حرکت می‌کند. این متحرک در لحظه‌ی $t=0$ از نقطه‌ی $x=10\,m$ 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

$$x = v_x t + x_0 \qquad (۷ــ۱)$$

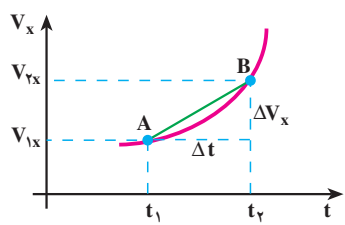
بیان می‌شود که در آن v_x سرعت (ثابت) جسم و x_0 مکان جسم در لحظه‌ی $t=0$ است ؛ در نتیجه، چون در این مثال $x_0 = +10\,m$ و $v_x = -5\,m/s$ است، معادله‌ی حرکت جسم به‌صورت زیر خواهد بود.

ب :

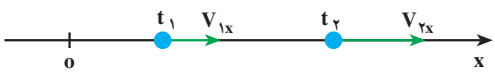
$$x = -5t + 10$$

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

شتاب متوسط و شتاب لحظه‌ای: می‌دانید هنگامی که سرعت جسم تغییر می‌کند، حرکت را **شتابدار** می‌نامند. در شکل ۱ــ۸ــ الف نمودار سرعت ــ زمان یک حرکت شتابدار و در شکل ۱ــ۸ــ ب بردار سرعت متحرک، در زمان‌های t_1 و t_2 ، نشان داده شده است.



شکل ۱ــ۸ــ الف



شکل ۱ــ۸ــ ب

هم‌چنین، 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 ــ زمان است، شتاب متوسط متحرک در این

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

$$\bar{a}_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} \qquad (۸ــ۱)$$

در این‌جا هم هنگامی که Δt بسیار کوچک و کوچک‌تر می‌شود، نقطه‌ی B، در شکل ۱ــ۸ــالف، به نقطه‌ی A نزدیک و نزدیک‌تر شده و سرانجام خط AB در نقطه‌ی A بر نمودار سرعت ــ زمان مماس می‌شود. 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، به‌طور دقیق این‌گونه تعریف کرد : 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 :

$$a_x = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{dv_x}{dt} \qquad (۹ــ۱)$$

به بیان ریاضی، شتاب لحظه‌ای مشتق سرعت نسبت به زمان است ؛ از این پس، شتاب لحظه‌ای را ــ برای اختصار ــ شتاب می‌نامیم. اکنون با استفاده از رابطه‌های ۱ــ۵ و ۱ــ۹ شتاب را می‌توان به صورت زیر نوشت :

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

مثال ۱ــ۵

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

پاسخ

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

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

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

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

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 $t = 1s$ چنین به دست می‌آید :

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

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

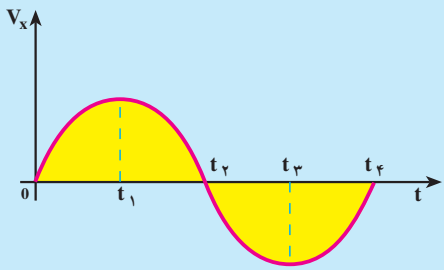
بردار شتاب را می‌توان به صورت زیر نمایش داد :

$$\vec{a} = a_x \vec{i} \qquad (۱۰ـ۱)$$

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 ۱ـ۲

نمودار سرعت، زمان متحرکی در شکل ۱ـ۹ نشان داده شده است. تعیین کنید در چه بازه‌ی زمانی بردار شتاب در جهت محورx و درکدام بازه‌ی زمانی در خلاف جهت محور x است.



شکل ۱ـ۹

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

فعالیت ۱ــ۱

در تمرین ۱ــ۲، سرعت متحرک در بازه‌ی زمانی ۰ 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. حاصل‌ضرب $a_x v_x$ نیز مثبت است. اکنون جاهای خالی را در گزاره‌های زیر پرکنید.

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

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

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

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

مثال ۱ــ۶

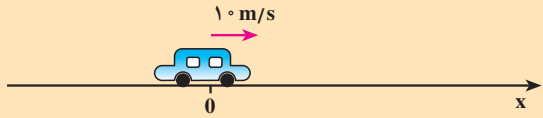
خودرویی با سرعت $10\,m/s$ در حال حرکت است. راننده ترمز می‌کند و سرعت خودرو با شتاب $2\,m/s^2$ کاهش می‌یابد. الف : چه زمانی طول می‌کشد تا خودرو متوقف شود؟ ب : در این بازه‌ی زمانی خودرو چه مسافتی را می‌پیماید؟

پاسخ

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

$$v_x = a_x t + v_{0x} \qquad (۱ــ۱۱)$$

که در آن a_x شتاب (ثابت) جسم و v_{0x} سرعت جسم در لحظه‌ی $t = 0$ است. در شکل ۱ــ۱۰ حرکت خودرو را در جهت محور x در نظر گرفته‌ایم.



شکل ۱ــ۱۰

بنابراین، $v_{\circ x} = +۱۰ m/s$ و چون حرکت کندشونده است، علامت a_x مخالف علامت $v_{\circ x}$ است ؛ در نتیجه، $a_x = -۲ m/s^۲$. با استفاده از معادله‌ی سرعت داریم :

$$v_x = -۲t + ۱۰$$

هنگامی که خودرو متوقف می‌شود، $v_x = ۰$ است ؛ در نتیجه :

$$۰ = -۲t + ۱۰ \Rightarrow t = ۵s$$

ب : می‌دانیم که در حرکت با شتاب ثابت معادله‌ی حرکت به صورت زیر است :

$$\Delta x = \frac{۱}{۲} a_x t^۲ + v_{\circ x} t \qquad (۱۲ــ۱)$$

$$\Delta x = \frac{۱}{۲}(-۲)(۵)^۲ + ۱۰(۵) + ۰ = ۲۵m$$

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

$$v_x^۲ - v_{\circ x}^۲ = ۲a_x(x - x_\circ) \qquad (۱۳ــ۱)$$

$$۰ - (۱۰)^۲ = ۲(-۲)(\Delta x) \Rightarrow \Delta x = ۲۵m$$

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 برروی مسیر مستقیم است. شتاب این حرکت در خلأ برابر شتاب گرانش (g) وجهت آن روبه پایین است.

مثال ۱ــ۷

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؟ ($g = ۱۰ m/s^۲$)

پاسخ

الف : با توجه به آن‌چه 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 ۱ــ۱۲ به صورت زیر به دست می‌آید :

$$y = \frac{۱}{۲} g t^۲$$

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

ب : با استفاده از معادله‌ی سرعت (۱ــ۱۱) داریم :

$$v = gt$$

$$v = ۱۰ \times ۳ = ۳۰ m/s = ۱۰۸ km/h$$

فعالیت ۱ــ۲

از دوست خود بخواهید که مطابق شکل ۱ــ۱۱، خط‌کش مدرّج بلندی را بین انگشتان شما نگه دارد و در یک لحظه، آن را رها کند. چگونه می‌توانید زمان واکنش خود را (یعنی زمانی که طول می‌کشد تا پس از مشاهده‌ی رها شدن خط‌کش، آن را بگیرید) اندازه‌گیری کنید.

شکل ۱ــ۱۱

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 :

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_{0y}t + y_0 \qquad (۱-۱۴)$$

$$v_y = -gt + v_{0y} \qquad (۱-۱۵)$$

و معادله‌ی مستقل از زمان آن به صورت زیر است :

$$v_y^2 - v_{0y}^2 = -2g(y - y_0) \qquad (۱-۱۶)$$

مثال ۱ــ۸

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 مقدار است؟ ($g = 10\,m/s^2$)

پاسخ

الف : محور y را روبه بالا و مبدأ آن را در نقطه‌ی پرتاب فرض می‌کنیم ؛ درنتیجه، در لحظه‌ی پرتاب داریم : $v_{0y} = +20\,m/s$ و $y_0 = 0$. در شروع حرکت، جسم در جهت محور y حرکت می‌کند، با استفاده از رابطه‌های ۱ــ۱۴ و ۱ــ۱۵ داریم :

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

$$v_y = -10t + 20$$

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

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

$$t = 2s$$

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

$$y = -5(2)^2 + 20(2) = 20m$$

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

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

یا

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

پاسخ‌های این معادله $t = ۰s$ و $t = ۴s$ است. $t = ۰s$ مربوط به لحظه‌ی پرتاب است و $t = ۴s$ زمانی است که طول می‌کشد تا سنگ به نقطه‌ی پرتاب برگردد.

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

$$v_y = -۱۰(۴) + ۲۰ = -۲۰ m/s$$

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 ۱ــ۹

از بالای ساختمانی به ارتفاع $۵۰m$ سنگی را در راستای قائم با سرعت $۱۵ m/s$، به بالا پرتاب می‌کنیم. چه مدت زمانی طول می‌کشد تا سنگ به زمین برسد؟ $(g = ۱۰ m/s^۲)$

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 :

$$y = -۵t^۲ + ۱۵t$$

در پایین ساختمان، $y = -۵۰m$ ؛ در نتیجه :

$$-۵۰ = -۵t^۲ + ۱۵t$$

با حل این معادله، دو مقدار $t = -۲s$ و $t = ۵s$ به دست می‌آید. چون حرکت از لحظه‌ی $t = ۰$ شروع شده است، پاسخ اول قابل قبول نیست ؛ در نتیجه، زمان رسیدن سنگ به زمین $۵s$ است.

۱ــ۲ــ حرکت در دو بُعد یا حرکت در صفحه

در بخش ۱ــ۱ 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 یا حرکت یک سیاره به دور خورشید یا حرکت اتومبیل در پیچ جاده و ... مثال‌هایی از حرکت دو بعدی‌اند.

در شکل ۱ــ۱۳ مسیر حرکت جسمی در صفحه‌ی xoy نشان داده شده است. در فیزیک (۲) و آزمایشگاه دیدیم که مکان جسم در این صفحه، با بردار $\vec{r}$ نمایش داده می‌شود. این بردار را می‌توان به صورت زیر نوشت :

شکل ۱ــ۱۲

$$\vec{r} = x\,\vec{i} + y\,\vec{j} \qquad (۱۷ــ۱)$$

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

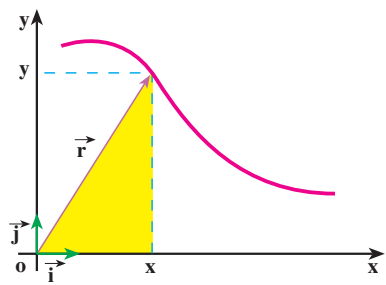
چون هنگام حرکت جسم، در هر لحظه بردار مکان آن تغییر می‌کند، برای مشخص کردن مکان جسم در حین حرکت، کافی است که مؤلفه‌های x و y را به صورت تابع‌هایی از زمان داشته باشیم :

$$x = f(t) \quad و \quad y = g(t) \qquad (۱۸ــ۱)$$

رابطه‌های ۱ــ۱۸ معادله‌های حرکت یک جسم را در دو بُعد نشان می‌دهند. واضح است که در حرکت دو بعدی، بردار مکان نیز تابعی از زمان است :

$$\vec{r} = f(t)\,\vec{i} + g(t)\,\vec{j} \qquad (۱۹ــ۱)$$

بنابراین، می‌توان گفت که حرکت در صفحه، ترکیب دو حرکت یک بعدی در امتدادهای x و y است که با داشتن معادله‌های مربوط به آن، مکان جسم در هر لحظه معلوم و در نتیجه، **مسیر حرکت** آن مشخص می‌شود.



شکل ۱ــ۱۳

فعالیت ۱ــ۳

فرض کنید در یک مدت کوتاه، معادله‌های حرکت یک خرگوش در سطح زمین، برحسب یکاهای SI، به‌صورت $x = ۱۰t$ و $y = -۵t^۲$ است. مسیر حرکت این خرگوش را به کمک نقطه‌یابی، در بازه‌ی زمانی ۰ تا ۵ ثانیه، روی کاغذ شطرنجی رسم کنید.

باید دانست که مسیر را می‌توان، علاوه بر روش نقطه‌یابی، به کمک **معادله‌ی مسیر** هم مشخص کرد. برای یافتن معادله‌ی مسیر کافی است که با حذف زمان (t) بین معادله‌های حرکت برای x و y رابطه‌ای بین آن‌ها، به دست آورد.

مثال ۱ــ۱۰

معادله‌ی مسیر را برای خرگوش در فعالیت ۱ــ۳ به دست آورید و آن را رسم کنید.

پاسخ

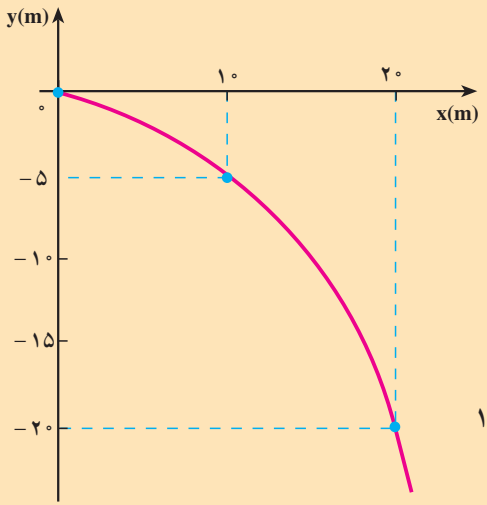
t را بین مؤلفه‌های بردار مکان حذف می‌کنیم :

$$x = ۱۰t \rightarrow t = \frac{x}{۱۰}$$

و

$$y = -۵t^۲ \rightarrow y = -۵\left(\frac{x}{۱۰}\right)^۲$$

$$y = -\frac{x^۲}{۲۰}$$



شکل ۱ــ۱۴

معادله‌ی مسیر در این مثال، یک سهمی است که بیشینه‌ی آن در $x = ۰$ ، است و از نقطه‌های (۱۰,−۵) و (۲۰,−۲۰) می‌گذرد (شکل ۱ــ۱۴).

فعالیت ۱ــ۴

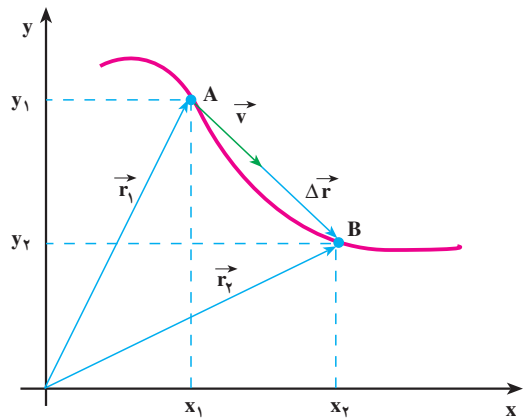
معادله‌های حرکت در SI برای خودروی A در صفحه‌ی افقی به صورت $x_A = ۳t^۲$ و $y_A = ۸$ و برای خودروی B در همان صفحه به صورت $x_B = ۶t$ و $y_B = ۴t$ داده شده است. از طریق نقطه‌یابی تحقیق کنید که آیا مسیر این دو خودرو تلاقی دارند یا نه؟ چه شرطی باید برقرار باشد تا بین خودروها برخورد رُخ دهد؟

جابه‌جایی و سرعت متوسط: برای بررسی حرکت جسم روی مسیری مطابق شکل ۱ــ۱۵، فرض کنید متحرکی در لحظه‌ی $t_۱$ در نقطه‌ی A (مکان $\vec{r}_۱$) و در لحظه‌ی $t_۲$ در نقطه‌ی B (مکان $\vec{r}_۲$) باشد. در فیزیک (۲) و آزمایشگاه دیدیم، برداری که از A به B رسم می‌شود جابه‌جایی (تغییر مکان) جسم را در بازه‌ی زمانی $\Delta t = t_۲ - t_۱$ نمایش می‌دهد. این بردار که در شکل ۱ــ۱۵ رسم شده است، از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_۲ - \vec{r}_۱ \qquad (۲۰ــ۱)$$

$$\Delta \vec{r} = (x_۲ \vec{i} + y_۲ \vec{j}) - (x_۱ \vec{i} + y_۱ \vec{j})$$

$$\Delta \vec{r} = (\Delta x) \vec{i} + (\Delta y) \vec{j} \qquad (۲۱ــ۱)$$



شکل ۱ــ۱۵ــ بردار سرعت متوسط و بردار تغییر مکان هم‌جهت‌اند.

سرعت متوسط جسم در یک بازه‌ی زمانی معین، همانند حالت یک بعدی، به‌این صورت تعریف می‌شود :

$$\vec{\bar{v}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \qquad (۲۲_۱)$$

و با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۲۱ داریم :

$$\vec{\bar{v}} = \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)\vec{i} + \left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)\vec{j} \qquad (۲۳_۱)$$

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

$$\vec{\bar{v}} = \left(\bar{v}_x\right)\vec{i} + \left(\bar{v}_y\right)\vec{j} \qquad (۲۴_۱)$$

پرسش ۱ــ۱

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

مثال ۱ــ۱۱

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

$$x = ۲t \text{ و } y = -t^۲ + ۴t \quad (SI)$$

الف : بردار مکان جسم را در لحظه‌های $t_۱ = ۱s$ و $t_۲ = ۲s$ 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 $t_۱ = ۱s$:

$$x_۱ = ۲m \text{ و } y_۱ = +۳m$$

$$\vec{r}_۱ = ۲\vec{i} + ۳\vec{j}$$

به همین ترتیب در $t_۲ = ۲s$: $x_۲ = ۴m$ و $y_۲ = ۴m$

$$\vec{r}_۲ = ۴\vec{i} + ۴\vec{j}$$

ب : در بازه‌ی زمانی ۱ تا ۲ ثانیه :

$$\Delta x = x_۲ - x_۱ = ۴ - ۲ = ۲ \quad m$$

$$\Delta y = y_۲ - y_۱ = ۴ - ۳ = ۱ \quad m$$

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

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

$$\vec{\bar{v}} = ۲\vec{i} + \vec{j}$$

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

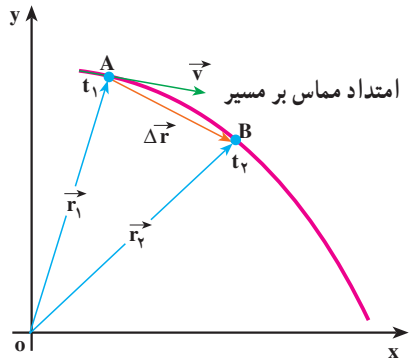
$$\bar{v} = \sqrt{۵} \simeq ۲/۲۳\,m/s$$

تمرین ۱ــ۳

در فعالیت ۱ــ۳ سرعت متوسط خرگوش را در بازه‌ی زمانی ۰ تا ۲ ثانیه به‌دست آورید.

سرعت لحظه‌ای: در شکل ۱ــ۱۶نمودار حرکت جسمی روی یک مسیر خمیده در صفحه‌ی xoy نشان داده شده است. مکان جسم در دو لحظه‌ی $t_۱$ و $t_۲$ ، 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 حدّ بردار سرعت متوسط است، وقتی Δt به سمت صفر میل می‌کند :

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to ۰} (\vec{\bar{v}}) = \lim_{\Delta t \to ۰} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \qquad (۲۵ــ۱)$$



شکل ۱ــ۱۶ــ سرعت لحظه‌ای در امتداد مماس بر مسیر حرکت است.

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

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \qquad (۲۶ــ۱)$$

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

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

$$\vec{v} = (v_x)\vec{i} + (v_y)\vec{j} \qquad (۲۷ــ۱)$$

در شکل ۱ــ۱۶ می‌بینید که وقتی t_2 به سمت t_1 میل کند، راستای بردار جابه‌جایی $\Delta\vec{r}$ ، به سمت راستایی مماس بر منحنی مسیر، در نقطه‌ی A میل خواهد کرد ؛ بنابراین، چون بردار سرعت متوسط همواره هم‌جهت با جابه‌جایی است، در حدّی که Δt به سمت صفر میل می‌کند، بردار سرعت لحظه‌ای بر مسیر حرکت در 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 ۱ــ۱۲

خودرویی در صفحه‌ی xoy حرکت می‌کند. معادله‌های حرکت آن در SI به‌صورت زیر است :

$$x = ۶t + ۵ \quad و \quad y = ۴t^۲$$

بزرگی سرعت خودرو را در $t = ۱s$ به‌دست آورید.

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۲۷ مؤلفه‌های سرعت به‌دست می‌آید :

$$v_x = \frac{dx}{dt} = ۶\,m/s$$

ملاحظه می‌شود که مؤلفه‌ی افقی سرعت مقدار ثابتی دارد و تابع زمان نیست ؛ به همین ترتیب، برای مؤلفه‌ی قائم سرعت داریم :

$$v_y = \frac{dy}{dt} = ۸t$$

همان‌طورکه می‌بینید، این مؤلفه تابع زمان است و بزرگی آن در $t = ۱s$ برابر است با :

$$v_y = ۸\,m/s$$

پس، بزرگی سرعت در $t = ۱s$ برابر است با :

$$v = \sqrt{v_x^۲ + v_y^۲} = \sqrt{۶^۲ + ۸^۲} = ۱۰\,m/s$$

تمرین ۱ــ۴

در مثال ۱ــ۱۲معادله‌ی مسیر را بنویسید و آن را رسم کنید. بردار سرعت متحرک را در $t = ۱s$ روی مسیر، نمایش دهید.

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 جهتِ سرعت یا هر دو باشد. دیدیم که وقتی مسیر حرکت جسم خمیده است، جهت سرعت آن الزاماً تغییر می‌کند ؛ بنابراین، حرکت بر روی مسیر منحنی، حرکتی شتابدار است حتّی اگر بزرگی سرعت ثابت باشد.

فعالیت ۱ــ۵

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

در شکل ۱ــ۱۷ــ 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 ۱ــ۱۷ــ ب). در این‌جا نیز، مشابه حرکت یک‌بعدی، بردار شتاب متوسط را در بازه‌ی زمانی Δt به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم :

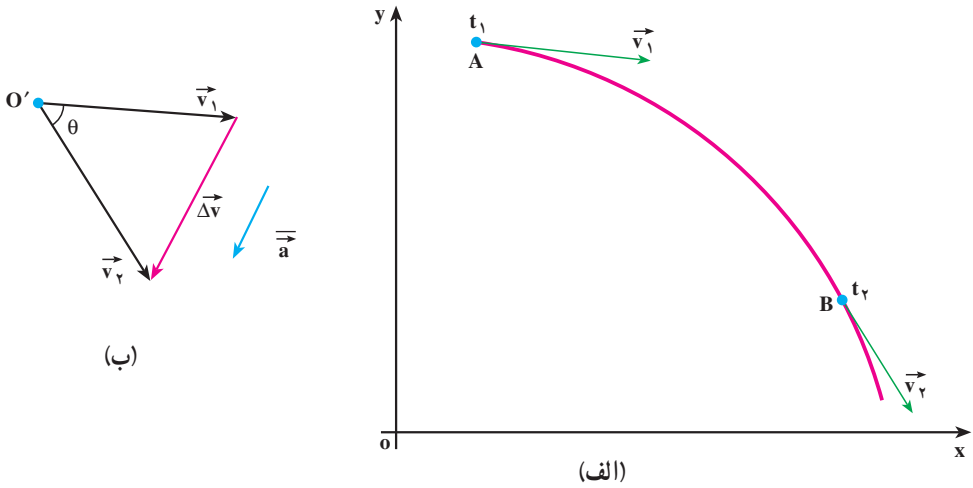
$$\vec{\bar{a}} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \qquad (۱ــ۲۸)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۲۷ داریم :

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

که آن را می‌توان به‌صورت زیر نوشت :

$$\vec{\bar{a}} = (\bar{a}_x)\,\vec{i} + (\bar{a}_y)\,\vec{j} \qquad (۱ــ۲۹)$$



(الف) (ب)

شکل ۱ــ۱۷ــ بردار شتاب متوسط با $\Delta \vec{v}$ هم‌جهت است.

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

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} (\bar{\vec{a}}) = \lim_{\Delta t \to 0} (\frac{\vec{\Delta v}}{\Delta t}) \qquad (۳۰_۱)$$

با توجه به مفهوم مشتق، رابطه‌ی ۱ــ۳۰ به‌صورت زیر نوشته می‌شود :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \qquad (۳۱_۱)$$

$$\vec{a} = \frac{d^2(\vec{r})}{dt^2} \qquad (۳۲_۱)$$

به کمک رابطه‌ی ۱ــ۲۹ می‌توانیم بنویسیم :

$$\vec{a} = (\frac{dv_x}{dt})\vec{i} + (\frac{dv_y}{dt})\vec{j} \qquad (۳۳_۱)$$

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

درنتیجه، می‌توان نوشت :

$$\vec{a} = (a_x)\vec{i} + (a_y)\vec{j} \qquad (۳۴_۱)$$

رابطه‌ی ۱ــ۲۸ نشان می‌دهد که $\bar{\vec{a}}$ و $\Delta\vec{v}$ هم‌جهت‌اند ولی همان‌طورکه در شکل ۱ــ۱۷ــب نشان داده شده است، در حرکت روی مسیر خمیده، معمولاً بردار شتاب متوسط $\bar{\vec{a}}$ ، با بردارهای سرعت، ($\vec{v_1}$ یا $\vec{v_2}$) هم‌جهت نیست. درحالتی هم که Δt به سمت صفر میل می‌کند و بردار $\vec{v_2}$ به‌بردار $\vec{v_1}$ بسیار نزدیک می‌شود، شتاب لحظه‌ای با سرعت لحظه‌ای نیز معمولاً هم‌جهت نخواهد بود. ولی به کمک رابطه‌ی ۱ــ۳۳ و با داشتن معادله‌ی سرعت، جهت بردار شتاب لحظه‌ای را، که از این پس آن را به اختصار **شتاب** خواهیم نامید، می‌توان به‌دست آورد.

فعالیت ۱ــ۶

نشان دهید در حرکت با بزرگی سرعت ثابت، روی مسیر خمیده، وقتی Δt به سمت صفر میل می‌کند، $\Delta\vec{v}$ بر $\vec{v}$ عمود است.

مثال ۱ــ۱۳

معادله‌ی حرکت دو بعدی جسمی در SI به‌صورت زیر است :

$$\begin{cases} x = ۲۰t^{۲} \\ y = -۵t^{۳} \end{cases}$$

بردار سرعت و بردار شتاب این جسم را در لحظه‌ی $t = ۱s$ به‌دست آورید. آیا این دو بردار هم‌جهت‌اند؟

پاسخ

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

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

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

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

$$\vec{v} = ۴۰\vec{i} - ۱۵\vec{j}$$

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

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = ۴۰ m/s^{۲}$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = -۳۰t$$

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

$$a_y = -۳۰ m/s^{۲}$$

با توجه به مقدارهای a_x و a_y در لحظه‌ی $t = ۱s$، بردار شتاب در این لحظه برابر است با :

$$\vec{a} = ۴۰\vec{i} - ۳۰\vec{j}$$

زاویه‌ای که بردارهای سرعت و شتاب در لحظه‌ی $t = ۱s$ با محور افقی می‌سازند،

به‌ترتیب برابرند با :

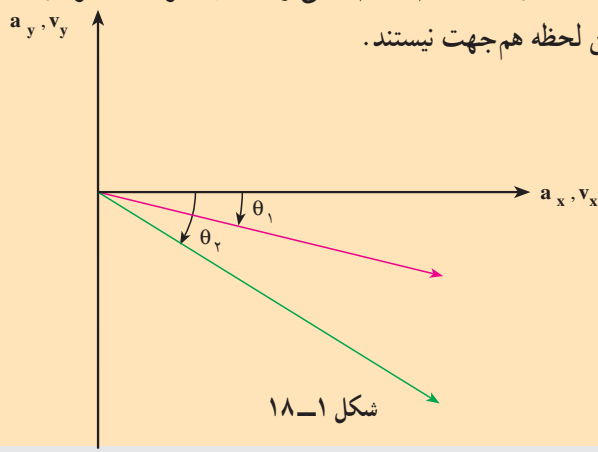
$$\tan\theta_1 = \frac{v_y}{v_x} = \frac{-15}{40}$$

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

$$\tan\theta_2 = \frac{a_y}{a_x} = -\frac{30}{40}$$

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

با مقایسه‌ی زاویه‌های θ_1 و θ_2 می‌توان نتیجه گرفت که بردارهای سرعت و شتاب در این لحظه هم‌جهت نیستند.



شکل ۱ــ۱۸

حرکت با شتاب ثابت در صفحه ــ حرکت پرتابی

وقتی حرکت در یک صفحه با شتاب ثابت باشد، بزرگی و جهت بردار شتاب ثابت می‌ماند ؛ از این‌رو، مؤلفه‌های $\vec{a}$ در طول حرکت تغییری نمی‌کنند و مقدار ثابتی دارند. از سوی دیگر، طبق قانون دوم نیوتون، شتاب هنگامی ثابت است که نیروی وارد بر جسم ثابت باشد. در این نوع حرکت برای سادگی، محورهای x و y را طوری انتخاب می‌کنیم که راستای شتاب حرکت بر راستای یکی از محورهای مختصات منطبق باشد ؛ بنابراین، مؤلفه‌ی شتاب در یک راستا صفر و در راستای دیگر، ثابت است ؛ مثلاً اگر محور y با شتاب هم‌راستا

شکل ۱ــ۱۹

باشد، داریم :

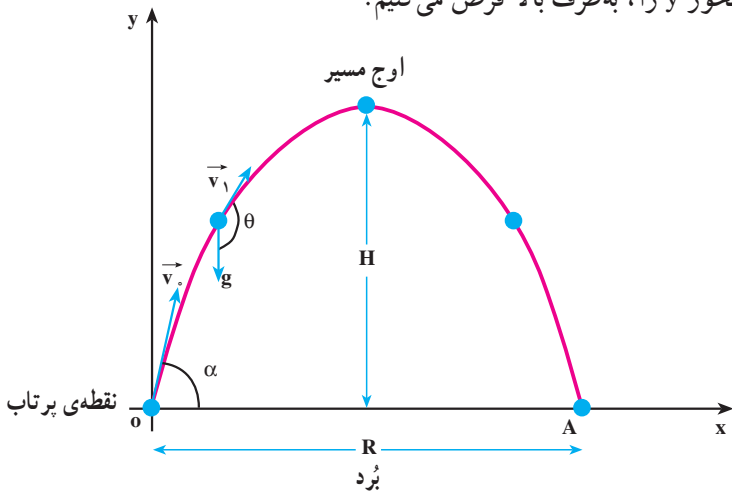
$$a_x = ۰ \quad و \quad a_y = \text{ثابت}$$

ساده‌ترین نوع حرکتِ با شتاب ثابت در صفحه، حرکت پرتابی است. اگر جسم کوچکی را چنان پرتاب کنیم که زاویه‌ی سرعت اولیه‌اش با امتداد قائم، مخالف صفر باشد این حرکت را پرتابی و جسم پرتاب شده را **پرتابه** می‌نامیم. اگر از مقاومت هوا صرف‌نظر کنیم، تنها نیروی وارد بر پرتابه، وزن آن $m\vec{g}$ و شتاب حاصل از این نیرو $\vec{g}$ است که در نزدیکی سطح زمین، بزرگی آن ثابت و جهت آن به‌طرف مرکز زمین است.

فعالیت ۱ــ۷

نشان دهید که هر پرتابه در صفحه‌ی قائمی حرکت می‌کند که بردارهای سرعت اولیه‌ی پرتاب و شتاب جسم در آن صفحه واقع‌اند.

نتیجه‌ی فعالیت ۱ــ۷ نشان می‌دهد که حرکت پرتابی در یک صفحه‌ی قائم انجام می‌شود. برای بررسی این حرکت، محور ox را در راستای افق و محور oy را در راستای g درنظر می‌گیریم. درنتیجه، حرکت پرتابی را می‌توان به‌صورت ترکیب دو حرکت، یکی در راستای افق و دیگری در راستای قائم دانست. در این حرکت، نقطه‌ی پرتاب جسم را مبدأ مختصات $(x_۰ = ۰ \ , \ y_۰ = ۰)$ و جهت مثبت محور y را، به‌طرف بالا فرض می‌کنیم.



شکل ۱ــ۲۰

در شکل ۱ــ۲۰ مسیر حرکت یک پرتابه، روی صفحه‌ی مختصات xoy، همراه با بردار شتاب $\vec{g}$ و نیز بردار سرعت اولیه‌ی جسم $\vec{v}_0$ که با افق زاویه‌ی α می‌سازد، نشان داده شده است. در این شکل، مؤلفه‌های بردار شتاب $\vec{g}$ با رابطه‌های زیر داده می‌شوند :

$$a_x = 0 \text{ و } a_y = -g \qquad (۳۵ــ۱)$$

مؤلفه‌های سرعت اولیه‌ی $\vec{v}_0$ نیز برابرند با :

$$v_{0x} = v_0 \cos\alpha \text{ و } v_{0y} = v_0 \sin\alpha \qquad (۳۶ــ۱)$$

چون $a_x = 0$ است ، حرکت در راستای محور x با سرعت ثابت $(v_0 \cos\alpha)$ انجام می‌شود.

بنابراین، با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۷، معادله‌های حرکت و سرعت پرتابه در راستای محور x ، به‌صورت زیر است :

$$x = (v_0 \cos\alpha)t \qquad (۳۷ــ۱)$$

$$v_x = v_0 \cos\alpha = \text{ثابت} \qquad (۳۸ــ۱)$$

حرکت در راستای قائم y، یک حرکت با شتاب ثابت $(-g)$ است ؛ بنابراین، با استفاده از رابطه‌های ۱ــ۱۴ و ۱ــ۱۵ معادله‌های حرکت پرتابه در راستای محور y را نیز به‌صورت زیر خواهیم داشت :

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + (v_0 \sin\alpha)t \qquad (۳۹ــ۱)$$

$$v_y = -gt + v_0 \sin\alpha \qquad (۴۰ــ۱)$$

معادله‌های ۱ــ۳۵ تا ۱ــ۴۰ مؤلفه‌های بردار شتاب و سرعت و مکان پرتابه را در هر لحظه روی محورهای x و y مشخص می‌کنند. می‌دانیم که اگر در معادله‌های حرکت، برای x و y در حرکت دوبعدی، زمان حذف شود، معادله‌ی مسیر حرکت به‌دست خواهد آمد ؛ بدین ترتیب، معادله‌ی مسیر حرکت پرتابی روی صفحه‌ی xoy نیز چنین است :

$$t = \frac{x}{v_0 \cos\alpha}$$

$$y = -\frac{1}{2}g\left(\frac{x}{v_0 \cos\alpha}\right)^2 + v_0 \sin\alpha\left(\frac{x}{v_0 \cos\alpha}\right)$$

$$y = -\frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2\alpha} + x\tan\alpha \qquad (۴۱ــ۱)$$

رابطه‌ی ۱ــ۴۱ نشان می‌دهد که مسیر حرکت پرتابی در شرایط خلأ، سهمی است (چرا؟). در حرکت پرتابی، فاصله‌ی افقی‌ای را که پرتابه طی می‌کند تا دوباره به ارتفاع اولیه‌ی پرتاب برگردد، **بُرد**

پرتابه می‌نامند. بُرد پرتابه را با R نمایش می‌دهیم (شکل ۱ــ۲۰). **مختصات نقطه‌ی بازگشت به ارتفاع اولیه** با توجه به شکل ۱ــ۲۰ به‌صورت $y = 0$ و $x = R$ است. با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۴۱ داریم :

$$0 = \frac{-g(R)^2}{2v_0^2 \cos^2\alpha} + (R)\tan\alpha$$

$$R = \frac{2v_0^2 \times \sin\alpha \quad \cos\alpha}{g}$$

$$R = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g} \qquad (۱ــ۴۲)$$

تمرین ۱ــ۵

به‌ازای چه زاویه‌ای (α)، بُرد پرتابه بیشینه است؟

در حرکت پرتابی، بالاترین نقطه‌ای که پرتابه به آن می‌رسد، **نقطه‌ی اوج** نام دارد. در شکل ۱ــ۲۰ ارتفاع نقطه‌ی اوج با H نشان داده شده است. سرعت در راستای محور y در نقطه‌ی اوج صفر است (چرا؟) ؛ درنتیجه، با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۴۰ داریم :

$$0 = -gt + v_0 \sin\alpha$$

$$t = \frac{v_0 \sin\alpha}{g}$$

t زمانِ رسیدن به نقطه‌ی‌اوج است. با جای‌گذاری این زمان در معادله‌ی ۱ــ۳۹، ارتفاع نقطه‌ی اوج به‌دست می‌آید :

$$H = -\frac{1}{2}g\left(\frac{v_0 \sin\alpha}{g}\right)^2 + (v_0 \sin\alpha)\left(\frac{v_0 \sin\alpha}{g}\right)$$

$$H = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g} \qquad (۱ــ۴۳)$$

فعالیت ۱ــ۸

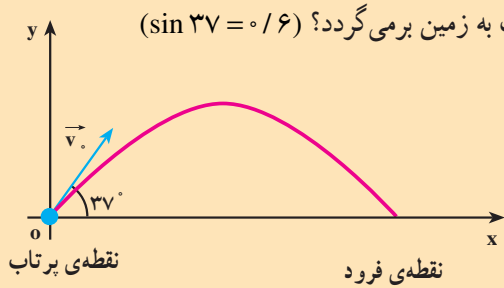
آزمایشی پیشنهاد کنید که به کمک آن بتوان سرعت آب را در لحظه‌ی خارج شدن از شیلنگ اندازه گرفت.

مثال ۱ــ۱۴

یک بازیکن فوتبال، توپی را تحت زاویه‌ی ۳۷° نسبت به افق، با سرعت اولیه‌ی $۱۰\,m/s$ شوت می‌کند. با فرض این‌که توپ در صفحه‌ی xoy حرکت کند و مقاومت هوا ناچیز باشد :

الف : زمان رسیدن توپ به نقطه‌ی اوج را به‌دست آورید.

ب : پس از چه زمانی توپ به زمین برمی‌گردد؟ $(\sin ۳۷ = ۰/۶)$



شکل ۱ــ۲۱

پاسخ

الف : در نقطه‌ی اوج مسیر داریم :

$$v_y = -gt + v_۰ \sin\alpha$$

$$۰ = -۹/۸t + ۱۰ \times ۰/۶ \qquad t = \frac{۶}{۹/۸} \simeq ۰/۶\,s$$

ب : در بازگشت به زمین $y = ۰$ است :

$$y = -\frac{۱}{۲}gt^۲ + (v_۰ \sin\alpha)t$$

$$۰ = -۴/۹t^۲ + (۱۰ \times ۰/۶)t$$

$$t(-۴/۹t + ۶) = ۰ \Rightarrow t = ۰ \ , \ t = ۱/۲\,s$$

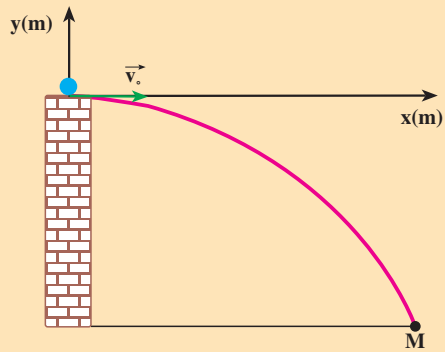
که در آن $t = ۰$ لحظه‌ی پرتاب توپ و $t = ۱/۲\,s$ لحظه‌ی برخورد توپ به زمین (زمان کلّ حرکت) است.

تمرین ۱ــ۶

ارتفاع نقطه‌ی اوج و نیز بُرد توپ را در مثال ۱ــ۱۴ محاسبه کنید.

مثال ۱ــ۱۵

از بالای برجی به ارتفاع ۴۹ متر، توپی با سرعت افقی $22\,m/s$ پرتاب می‌شود.
الف :چه مدت طول می‌کشد تا توپ به زمین برسد؟ ب : فاصله‌ی نقطه‌ی برخورد توپ با زمین تا پای برج چندمتر است؟ پ : سرعت توپ هنگام برخورد به زمین چه‌قدر است؟



شکل ۱ــ۲۲

پاسخ

الف : نقطه‌ی پرتاب را مبدأ مختصات می‌گیریم. نقطه‌ی M محل فرود توپ بر روی زمین است که برای آن $y_M = -49m$. با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۳۹ داریم :

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + (v_0 \sin\alpha)t$$

$$-49 = -4/9t^2 + 0$$

$$t = \sqrt{10} \simeq 3/2s$$

ب : برای محاسبه‌ی فاصله‌ی نقطه‌ی فرود تا پای برج از معادله‌ی ۱ــ۳۷ استفاده می‌کنیم :

$$x = (v_{\circ}\cos\alpha)t$$

$$x = (۲۲\times۱)\times۳/۲ = ۷۰/۴\,m$$

پ : مؤلفه‌های سرعت را در لحظه‌ی برخورد با زمین از رابطه‌های ۱ــ۳۸ و ۱ــ۴۰ به‌دست می‌آوریم :

$$v_x = v_{\circ}\cos\alpha = ۲۲\times۱ = ۲۲\ m/s$$

و

$$v_y = -gt + v_{\circ}\sin\alpha = -۹/۸\times۳/۲ + ۰ = -۳۱/۳۶$$

$$v = \sqrt{v_x^{۲} + v_y^{۲}} = \sqrt{۲۲^{۲} + ۳۱/۳۶^{۲}} \simeq \sqrt{۴۸۴ + ۹۸۳/۴}$$

$$v \simeq ۳۸\ m/s$$

تمرین‌های فصل اوّل

۱ــ معادله‌ی حرکت جسمی در SI به‌صورت $x = t^{۳} - ۳t^{۲}$ است. مطلوب است :

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

ب : بزرگی سرعت متحرک در لحظه‌ی $t = ۴s$.

پ : بزرگی شتاب متوسط متحرک در بازه‌ی زمانی ۲ تا ۳ ثانیه.

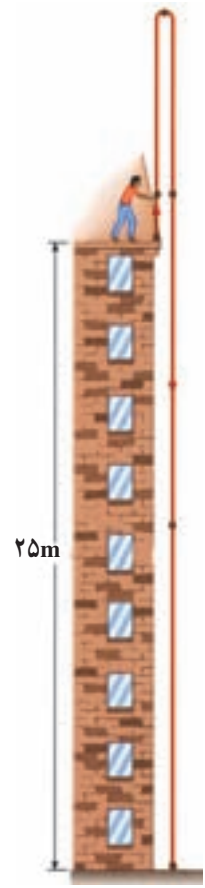
ت : بزرگی شتاب متحرک در لحظه‌ی $t = ۴s$.

۲ــ بیشینه‌ی شتاب خودرویی در حین ترمز کردن، در جاده‌ی خشک $۵\,m/s^{۲}$ و در جاده‌ی خیس، $۲\,m/s^{۲}$ است. اگر این خودرو با سرعت $۷۲\,km/h$ در حرکت باشد و راننده ناگهان مانعی را در فاصله‌ی ۴۵ متری خود ببیند، آیا می‌تواند خودرو را به‌موقع متوقف کند؟ در صورتی که

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

۳ــ در تمرین ۲،اگر جاده خشک باشد و زمان تأخیر در واکنش راننده هم ۰/۵ ثانیه باشد، آیا خودرو با مانع برخورد می‌کند؟

۴ــ خودرویی در پشت چراغ قرمز ایستاده است. با سبز شدن چراغ، خودرو با شتاب $۲\,m/s^{۲}$ شروع به حرکت می‌کند. در همین لحظه، کامیونی با سرعت ثابت $۳۶\,km/h$ از کنار آن می‌گذرد.



شکل ۱ــ۲۳

الف : نمودارهای مکان ــ زمان و سرعت ــ زمان را برای اتومبیل و کامیون رسم کنید.

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

۵ــ در شکل ۱ــ۲۳ توپی در راستای قائم به‌طرف بالا پرتاب می‌شود و پس از ۴ ثانیه به نقطه‌ی پرتاب برمی‌گردد. توپ :

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

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

۶ــ بردارهای مکان ذره‌ی متحرکی در لحظه‌های $t_۱ = ۵s$ و $t_۲ = ۲۵s$ به‌ترتیب $\vec{r}_۱ = ۲\vec{i} + ۱۴\vec{j}$ و $\vec{r}_۲ = ۸\vec{i} + ۶\vec{j}$ است. بزرگی سرعت متوسط این ذره را بین دو لحظه‌ی $t_۱$ و $t_۲$ به‌دست آورید. با رسم یک نمودار جهت $\vec{v}$ را نشان دهید.

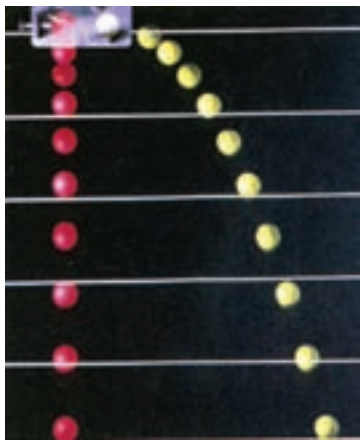
۷ــ معادله‌ی حرکت جسمی با دو رابطه‌ی زیر، در SI داده شده است :

$$y = ۲t^۲ + ۱ \quad , \quad x = ۶t$$

الف : معادله‌ی سرعت جسم را بنویسید و بزرگی سرعت را در $t = ۲s$ محاسبه کنید.

ب : معادله‌ی مسیر حرکت را به‌دست آورید.

پ : بردار سرعت متوسط جسم را بین لحظه‌های $t = ۱$ و $t = ۲$ ثانیه برحسب بردارهای یکّه‌ی $\vec{i}$ و $\vec{j}$ بنویسید.


شکل ۱ــ۲۴

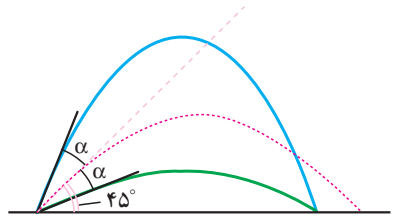
۸ــ الف : سرعت یک پرتابه را در نقطه‌ی اوج آن، برحسب $v_۰$ و α به‌دست آورید.

ب : اگر نقطه‌ی فرود و نقطه‌ی پرتاب در یک صفحه‌ی افقی باشند، بردار سرعت پرتابه را هنگام فرود برحسب α و $v_۰$ به‌دست آورید.

۹ــ در شکل ۱ــ۲۴، گلوله‌ی زرد رنگ در امتداد افق پرتاب شده است. اگر گلوله‌ی قرمز رنگ نیز همزمان با گلوله‌ی زرد رنگ رها شده باشد، نشان دهید که ارتفاع این

دو، در حین سقوط در تمام لحظه‌ها ، یکسان خواهد بود.

۱۰ــ گالیله در یکی از کتاب‌های خود نوشته است : «برای زاویه‌های پرتابی که به یک اندازه از زاویه‌ی ۴۵° بیش‌تر یا کم‌ترند، بُردها مساوی‌اند...» (شکل ۱ــ۲۵). درستی این گفته را اثبات کنید.



شکل ۱ــ۲۵

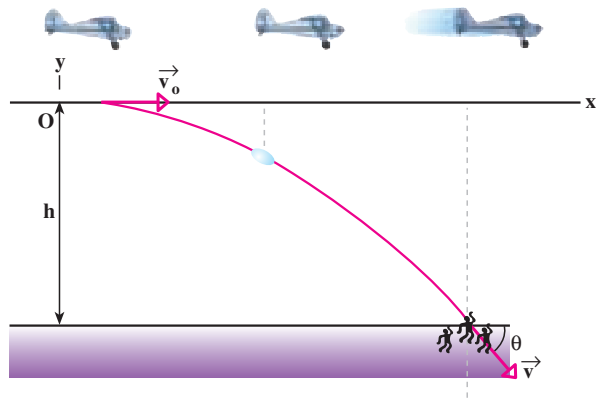
۱۱ــ از روی پلی به ارتفاع ۲۰ متر، بالای سطح آب یک رودخانه، جسمی را در راستای افقی با سرعت ۳۰m/s پرتاب می‌کنیم.

الف : چه زمانی طول می‌کشد تا جسم به آب برخورد کند؟

ب : فاصله‌ی افقی نقطه‌ی برخورد به آب تا نقطه‌ی پرتاب چه مقدار است؟

پ : بزرگی سرعت جسم هنگام برخورد با آب، چه مقدار است؟

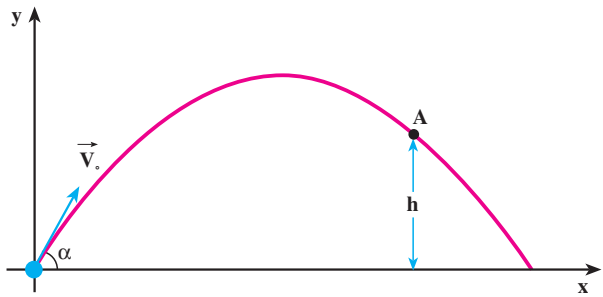
۱۲ــ هواپیمایی که با سرعت ۳۶۰k m/h در ارتفاع ۲۴۵m موازی با سطح زمین پرواز می‌کند، می‌خواهد بسته‌ای را برای سیل‌زدگان به پایین بیندازد (شکل ۱ ــ۲۶). خلبان در چه فاصله‌ی افقی، بسته را رها کند تا به‌سیل‌زدگان برسد؟



شکل ۱ــ۲۶

۱۳ــ مطابق شکل ۱ــ۲۷ جسمی به جرم m را با سرعت اولیه‌ی $\vec{v}_0$ و با زاویه‌ی α نسبت به افق، پرتاب می‌کنیم. فرض کنید نیروی مقاومت هوا در برابر حرکت جسم قابل چشم‌پوشی است.

الف : با استفاده از قانون پایستگی انرژی مکانیکی، بزرگی سرعت جسم را در نقطه‌ی A در ارتفاع h، از نقطه‌ی پرتاب به‌دست آورید.

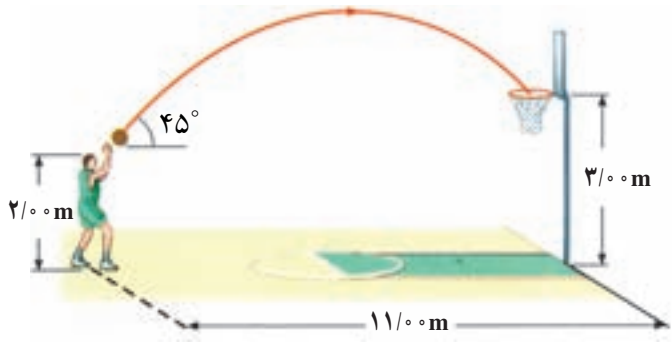


شکل ۱ــ۲۷

ب : بزرگی سرعت جسم را در نقطه‌ی A با استفاده از معادله‌های حرکت پرتابی به‌دست آورید و آن را با نتیجه‌ی قسمت «الف» مقایسه کنید.

۱۴ــ در شکل ۱ــ۲۸ سرعت اولیه‌ی توپ را طوری حساب کنید که توپ داخل سبد بیفتد.

$g = ۱۰ m/s^۲$



شکل ۱ــ۲۸

۲

دینامیک

اسحاق نیوتون
(۱۶۴۲ـ۱۷۲۷م)

دینامیک

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

شما در فیزیک ۲ و آزمایشگاه، با قانون‌های نیوتون آشنا شدید و دیدید که چگونه می‌توان آن‌ها را برای حلّ مسئله‌های دینامیک در یک بُعد به‌کار برد.

در این فصل، پس از یادآوری این قانون‌ها، کاربرد آن‌ها را در حلّ مسئله‌ها، در دینامیک دوبعدی، بررسی می‌کنیم.

۲ــ۱ــ قانون‌های نیوتون

قانون اول نیوتون: «هر جسمی، حالت سکون 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 هم‌جهت است و با جرم جسم نسبت وارون دارد» ؛ یعنی :

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

یا :

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

توجه کنید در رابطه‌ی بالا، $\vec{F}$ برایند نیروهای وارد برجسم است.

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

هم‌چنین، در فیزیک (۲) و آزمایشگاه دیدیم که نیرویی که جسم اوّل وارد می‌کند، «کنش» و نیرویی که جسم دوّم وارد می‌کند «واکنش» نام دارد. این دو نیرو همواره هم‌اندازه، هم‌راستا و در سوی مخالف یک‌دیگراند که هر یک بر دیگری وارد می‌کند.

تمرین ۲ــ۱

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

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

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

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

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

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

تمرین ۲ــ۲

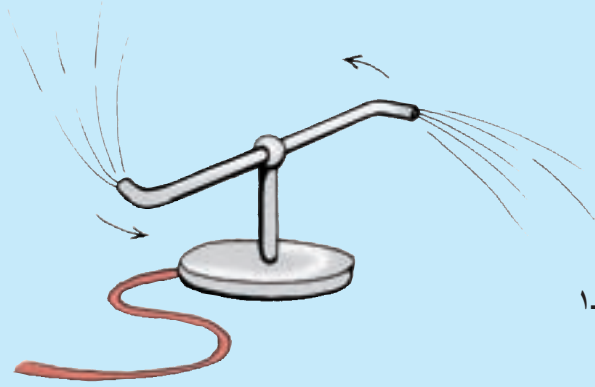
توضیح دهید چرا هنگامی که :

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

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

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

۴ــ آب از فواره مطابق شکل ۲ــ۱خارج می‌شود و فواره می‌چرخد؟



شکل ۲ــ۱

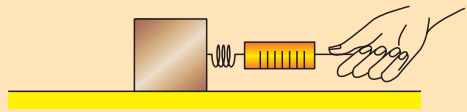
فعالیت ۲ــ۱

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

شکل ۲ــ۲

مثال ۲ــ۱

صندوقی به جرم ۱۰kg روی یک سطح افقی با ضریب اصطکاک ایستایی ۰/۴ و ضریب اصطکاک جنبشی ۰/۲ قرار دارد. مطابق شکل ۲ــ۳ــ الف نیروسنجی به صندوق وصل می‌کنیم و آن را می‌کشیم.



شکل ۲ــ۳ــ الف

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

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

پاسخ

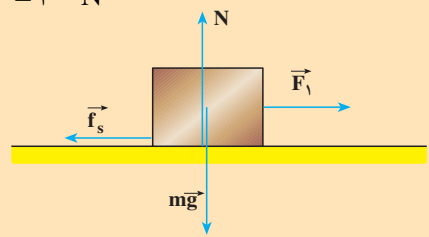
الف : در فیزیک (۲) و آزمایشگاه دیدیم، برای آن‌که جسمی به حرکت درآید باید نیروی وارد بر آن از نیروی اصطکاک در آستانه‌ی حرکت بیش‌تر باشد.

بنابراین، ابتدا نیروی اصطکاک در آستانه‌ی حرکت (بیشینه‌ی نیروی اصطکاک) را محاسبه می‌کنیم :

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

$$\sum F_y = ۰ \Rightarrow N = mg = ۱۰ \times ۱۰ = ۱۰۰N$$

$$f_{s\max} = ۰/۴ \times ۱۰۰ = ۴۰N$$



شکل ۲ــ۳ــ ب

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

$$\Sigma F_x = ma \Rightarrow F_1 - f_s = ma = ۰$$

$$f_s = ۲۰N$$

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

$$f_k = ۰/۲ \times ۱۰۰ = ۲۰ N$$

برای محاسبه‌ی شتاب حرکت، قانون دوم نیوتون را می‌نویسیم :

$$F - f_k = ma$$

$$۶۰ - ۲۰ = ۱۰a$$

$$a = ۴ m/s^۲$$

فعالیت ۲ــ۲

جسمی را روی سطح افقی قرار دهید و آن را با یک نیروی افقی بکشید و به‌تدریج نیروی کشش را افزایش دهید تا این‌که جسم در آستانه‌ی حرکت قرار گیرد و سپس حرکت کند. حال، به‌طور کیفی، نمودار تغییر نیروی اصطکاک را، برحسب نیروی کشش، رسم کنید.

۲ــ۲ــ چگونگی استفاده از قانون‌های نیوتون در حرکت یک جسم

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

۱ــ شکل ساده‌ای از جسم و تکیه‌گاه آن رسم می‌کنیم.

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

۳ــ دستگاه محورهای مختصات مناسب انتخاب می‌کنیم. (ضمن حلّ مسئله، با نحوه‌ی انتخاب دستگاه مختصات مناسب نیز آشنا خواهیم شد.)

۴ــ نیروها را روی محورهای مختصات تجزیه می‌کنیم ؛یعنی، مؤلفه‌های هر نیرو را روی

محورها تعیین می‌کنیم.

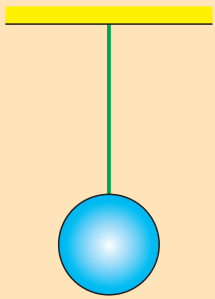
۵ــ با نوشتن قانون دوم نیوتون روی هر یک از محورها، شتاب حرکت جسم را روی هر محور محاسبه می‌کنیم ؛ به عبارت دیگر، مؤلفه‌های نیرو را روی هر محور به‌طور جداگانه، به‌صورت $F_x = ma_x$ و $F_y = ma_y$ می‌نویسیم.

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

نحوه‌ی استفاده از قانون‌های نیوتون در مثال‌های زیر نشان داده شده است.

مثال ۲ــ۲

جسمی به جرم $m = ۱۲kg$ را با طنابی که جرم آن ناچیز است، مطابق شکل ۲ــ۴ــ الف می‌آویزیم. نیروهای وارد بر جسم را تعیین کنید و مقدار هر یک را به‌دست آورید.

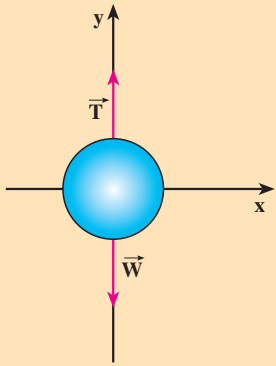


شکل ۲ــ۴ــ الف

پاسخ

نیروهای وارد بر جسم عبارت‌اند از :

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



شکل ۲ــ۴ــ ب

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

$$T - mg = ma$$

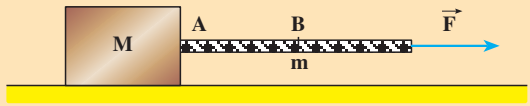
چون $a = ۰$ ، داریم :

$$T = mg = ۱۲ \times ۱۰ = ۱۲۰ N$$

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 وضعیّت اولیه‌ی آن حفظ شود ؛ یعنی، اگر جسم ساکن بوده با جای‌گزینی این نیرو در آن نقطه هم‌چنان ساکن بماند و اگر در حرکت بوده با همان حالت قبل از پاره شدن حرکت کند.

مثال ۲ــ۳

با طنابی به جرم $m = ۰/۵ kg$ ، جسمی به جرم $M = ۲ kg$ را با نیروی افقی $F = ۵N$ می‌کشیم (شکل ۲ــ۵ــ الف). نیروی اصطکاک بین جسم و سطح ناچیز است و فرض می‌کنیم که بر اثر حرکت در طناب تغییر شکل ایجاد نشود. نیروی کشش طناب را در نقطه‌ی A (محلّ اتصال طناب با جسم) و در نقطه‌ی B (وسط طناب) محاسبه کنید (از انحنای طناب صرفنظر می‌شود).



شکل ۲ــ۵ــ الف

پاسخ

ابتدا شتاب حرکت جسم را محاسبه می‌کنیم. چون طناب و جسم به هم متّصل‌اند و شتاب یکسان دارند، می‌توان مجموعه را یک دستگاه درنظر گرفت و قانون دوم را برای آن‌ها، یک‌جا نوشت :

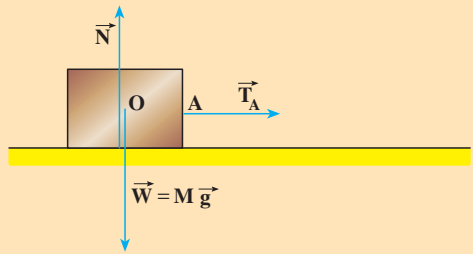
$$F = (M + m)a$$

$$a = \frac{۵}{۲ + ۰/۵} = ۲ m/s^۲$$

برای محاسبه‌ی نیروی کشش T در نقطه‌ی A، نیروهای وارد بر جسم را رسم و جهت محور x را هم‌جهت حرکت انتخاب می‌کنیم. تنها نیروی وارد بر جسم در راستای حرکت، نیروی کشش طناب است (شکل ۲ــ۵ــ ب).

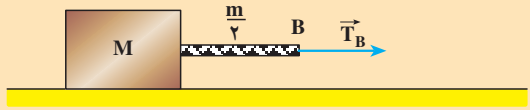
$$T_A = Ma$$

$$T_A = ۲ \times ۲ = ۴N$$



شکل ۲ــ۵ــ ب

برای به‌دست آوردن نیروی کشش طناب در نقطه‌ی B، طناب را در این نقطه از بقیه‌ی طناب جدا در نظر می‌گیریم و نیروی وارد بر این نقطه را مشخص می‌کنیم (شکل ۲ــ۵ــ پ).



شکل ۲ــ۵ــ پ

در این حالت داریم :

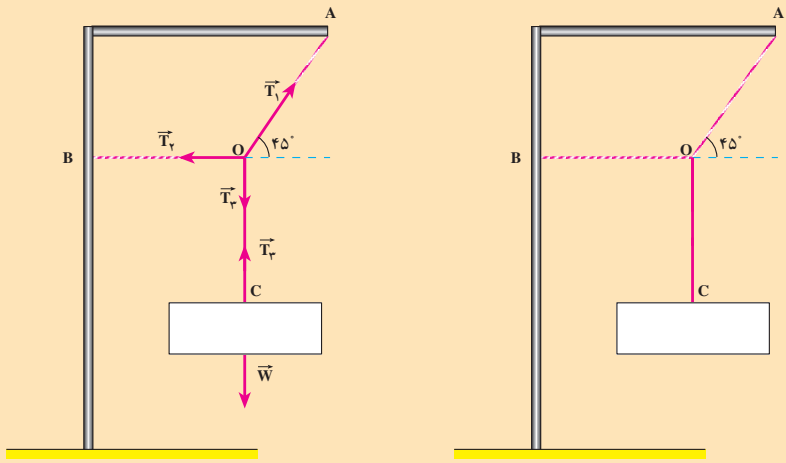
$$T_B = (M + \frac{m}{۲})a = (۲ + ۰/۲۵) \times ۲$$

$$T_B = ۴/۵N$$

اگر جرم طناب ناچیز باشد، نیروی کشش در تمام نقاط آن یکسان است. (چرا؟)

مثال ۲ــ۴

یک تابلوی تبلیغاتی مطابق شکل ۲ــ۶ــ الف از پایه‌ای آویزان است. اگر وزن تابلو ۱۲۰N باشد، کشش طناب‌های OA و OB را محاسبه کنید. (از وزن طناب‌ها چشم‌پوشی کنید.)



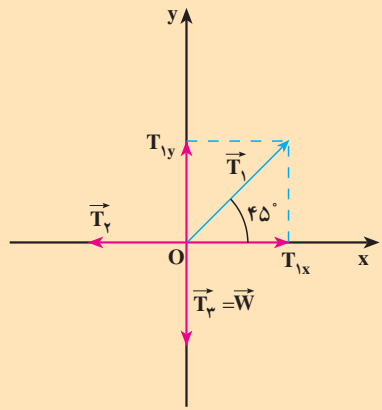
الف ب

شکل ۲ــ۶

پاسخ

در شکل ۲ــ۶ــ ب نیروهای وارد بر گره‌ی O و تابلو نشان داده شده‌اند. قانون دوم نیوتون را برای گره‌ی O می‌نویسیم. نیروهای وارد بر گره عبارت‌اند از :

$\vec{T}_1$ نیروی کشش طناب در امتداد OA، $\vec{T}_2$ نیروی کشش طناب در امتداد OB و $\vec{T}_3$ نیروی کشش در امتداد OC. داریم : $T_3 = W$ (چرا؟). با انتخاب دستگاه محورهای مختصات مناسب مطابق شکل ۲ــ۶ــ پ نیروها را روی محورهای مختصات تصویر می کنیم.



شکل ۲ــ۶ــ پ

چون گره در حال سکون است، داریم :

$$F_x = ۰ \Rightarrow T_{۱x} - T_۲ = ۰$$

$$F_y = ۰ \Rightarrow T_{۱y} - W = ۰$$

$$T_{۱y} = T_۱ \sin ۴۵^\circ = T_۱ \frac{\sqrt{۲}}{۲} \quad \text{و} \quad T_{۱x} = T_۱ \cos ۴۵^\circ = T_۱ \frac{\sqrt{۲}}{۲}$$

با جای‌گزینی مقادیر $T_{۱x}$ و $T_{۱y}$ در معادله‌های بالا داریم :

$$T_۱ \frac{\sqrt{۲}}{۲} - T_۲ = ۰$$

$$T_۱ \frac{\sqrt{۲}}{۲} - ۱۲۰ = ۰$$

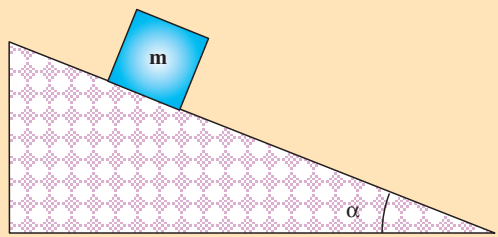
با حلّ این دو معادله داریم :

$$T_۱ \simeq ۱۷۰N \quad \text{و} \quad T_۲ = ۱۲۰N$$

مثال ۲ــ۵

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).

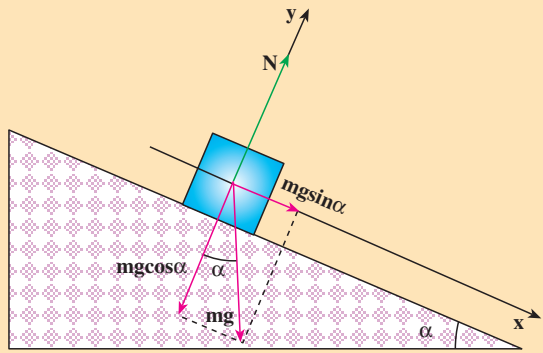


شکل ۲ــ۷ــ الف

ب : اگر بر اثر نیروی اصطکاک، جسم روی سطح ساکن بایستد، نیروی اصطکاک چه‌مقدار خواهد بود. آن 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 ۲ــ۷ــ ب

مؤلفه‌های وزن روی محورهای x و y به‌ترتیب عبارت‌اند از :

$mg\cos\alpha$ و $mg\sin\alpha$

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

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

$$a = g\sin\alpha$$

چون جسم در راستای محور y حرکت ندارد :

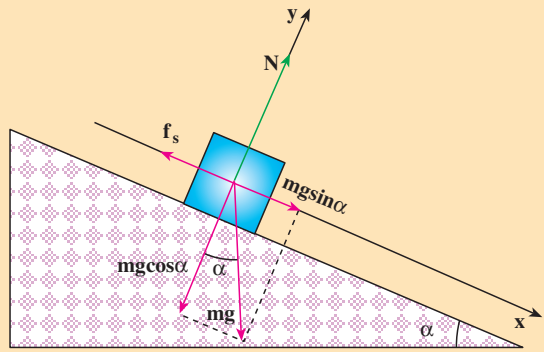
$$F_y = 0$$

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

و در نتیجه :

$$N = mg\cos\alpha$$

ب : نمودار نیروهای وارد بر جسم در شکل ۲ــ۸ نشان داده شده است. چون جسم ساکن است، برآیند نیروهای وارد بر آن صفر است :



شکل ۲ــ۸

$F_x = 0$

$mg\sin\alpha - f_s = 0$

و از آن‌جا داریم :

$f_s = mg\sin\alpha$

تمرین ۲ــ۳

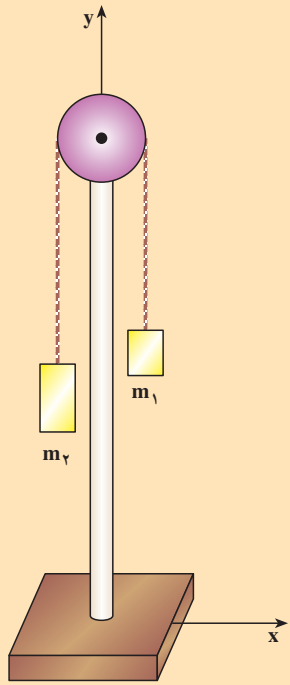
توضیح دهید که آیا می‌توان با استفاده از مثال ۲ــ۵ــ ب ضریب اصطکاک ایستایی جسم و سطح را محاسبه کرد.

فعالیت ۲ــ۳

آزمایشی برای تعیین ضریب اصطکاک ایستایی سطح‌های مختلف با استفاده از سطح شیب‌دار طراحی کنید.

مثال ۲ــ۶

قرقره‌ای را مطابق شکل ۲ــ۹ــ الف بر روی پایه‌ای نصب می‌کنیم. دو وزنه‌ی $m_1 = ۱۰۰g$ و $m_2 = ۱۵۰g$ را با نخی سبک به یک‌دیگر وصل می‌کنیم و نخ را از شیار قرقره می‌گذرانیم. شتاب حرکت وزنه‌ها و نیروی کشش نخ را محاسبه کنید. این وسیله را ماشین اتوود می‌نامند.



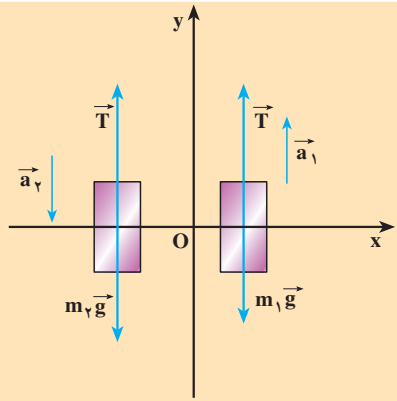
شکل ۲ــ۹ــ الف

پاسخ

نیروهای وارد بر جرم‌های m_1 و m_2 در شکل ۲ــ۹ــ ب رسم شده است. چون جرم نخ، قرقره و نیروی اصطکاک ناچیز است، کشش طناب در تمام نقطه‌های آن یکسان است ؛ بنابراین، $T_1 = T_2$ و چون $m_2 > m_1$ است، m_2 به‌طرف پایین و m_1 به‌طرف بالا حرکت می‌کند. در این‌صورت، شتاب حرکت m_2 در خلاف جهت محور y و m_1 در جهت محور y خواهد بود ؛ پس :

$$T - m_1 g = m_1 a_1 \quad (۱)$$

$$T - m_2 g = -m_2 a_2 \quad (۲)$$



شکل ۲ــ۹ــ ب

چون بزرگی جابه‌جایی وزنه‌ها یکسان است : $a_1 = -a_2 = a$

با جای‌گزینی مقادیر m_1 و m_2 در رابطه‌های (۱) و (۲) خواهیم داشت :

$$T - ۰/۱ \times ۱۰ = +۰/۱ a$$

$$T - ۰/۱۵ \times ۱۰ = -۰/۱۵ a$$

با حلّ این معادله‌ها داریم :

$$a = ۲ m/s^۲ \quad و \quad T = ۱/۲ N$$

۲ــ۳ــ تکانه (اندازه حرکت)

در شکل ۲ــ۱۰ یک خودروی سواری و یک کامیون مجاور هم با سرعت یکسان درحرکت‌اند. خودرو و کامیون با نزدیک شدن به چراغ قرمز، باید پس از طی مسافت ۵۰m متوقف شوند. به‌نظر شما، نیروی لازم برای متوقف کردن کدام‌یک از آن‌ها با شتاب ثابت، بیش‌تر است؟ برای بررسی

شکل ۲ــ۱۰

دقیق‌تر، فرض کنید جرم کامیون ۱۰ تن و جرم خودروی سواری ۱ تن باشد و هریک با سرعت ۲۰ m/s در حرکت باشند. شتاب حرکت کندشونده برای کامیون و خودروی سواری، در این جابه‌جایی، برابر است با :

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

نیروی لازم برای توقف کامیون برابر است با :

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

و نیروی لازم برای توقف خودروی سواری برابر است با :

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

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

فعالیت ۲ــ۴

فرض کنید در مثال بالا، جرم خودرو و کامیون یکسان، ولی سرعت یکی ۲۰ m/s و دیگری ۱۵ m/s باشد. نیروی لازم برای متوقف کردن هر یک 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 متوقّف کردن خودروها به جرم و سرعت آن‌ها بستگی دارد. در فیزیک کمیّتی به‌نام تکانه (اندازه حرکت) تعریف می‌شود که به هر دو کمیّت جرم و سرعت بستگی دارد. «**تکانه‌ی یک جسم، حاصل‌ضرب 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 :

$$\vec{P} = m\vec{v} \qquad (۲ــ۲)$$

تکانه، کمیّتی 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 ۲ــ۱ داریم :

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

چون جرم جسم، مقداری ثابت است، می‌توان نوشت :

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

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

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

یعنی، **آهنگ تغییر تکانه‌ی یک جسم نسبت به زمان برابر با برآیند نیروهای وارد بر جسم است؛** به‌بیان 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 متوسّط وارد بر آن از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

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

مثال ۲ــ۷

چکشی به جرم ۱/۵kg را با سرعت ۱۰m/s به سر میخی می‌کوبیم (شکل ۲ــ۱۱). اگر زمان برخورد چکش با سر میخ ۰/۰۰۵s باشد، بزرگی نیروی متوسطی که به‌چکش وارد می‌شود، چه‌قدر است؟

پاسخ

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

$$\bar{F} = \left|۱/۵\frac{(۰-۱۰)}{۰/۰۰۵}\right| = ۳۰۰۰\text{N}$$

شکل ۲ــ۱۱

تمرین ۲ــ۴

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

حداکثر برآیند نیروهای وارد بر هر یک از خودروهای A و B را حساب کنید.

مطالعه‌ی آزاد

نقش کیسه‌ی هوا در تصادف‌های رانندگی

شکل ۲ــ۱۲

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

جاسازی 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، بر 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، طبق رابطه‌ی $\overrightarrow{F} = \frac{\Delta \overrightarrow{P}}{\Delta t}$ ، با افزایش Δt نیروی متوسط وارد بر سرنشینان کاهش می‌یابد و بدین‌ترتیب از وارد آمدن آسیب جدی به آن‌ها جلوگیری می‌شود.

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

فعالیت ۲ــ۵

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

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

شکل ۲ــ۱۳

۲ــ۴ــ 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 لباس‌شویی، آب‌میوه‌گیری و... اجسام درونِ آن‌ها در مسیر دایره‌ای حرکت می‌کنند. در تصویرهای زیر، نمونه‌هایی از حرکت اجسام بر مسیر دایره را مشاهده می‌کنید.

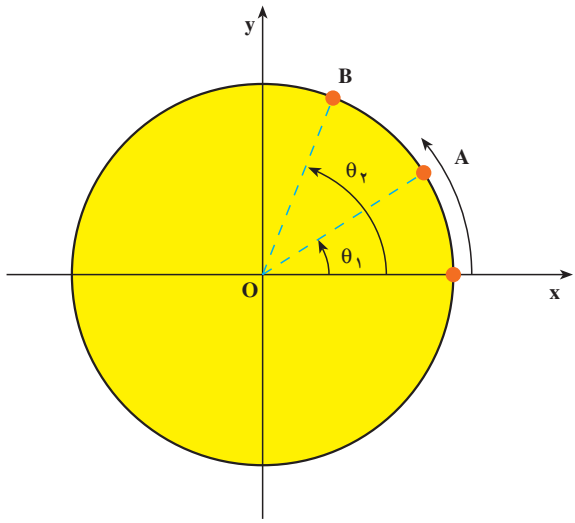
شکل ۲ــ۱۴ــ الف ــ تصویری از یک قطار هوایی در پارک تفریحی

شکل ۲ــ۱۴ــ ب ــ طرحی از چرخش ماهواره‌ی امید در مدار زمین

شکل ۲ــ۱۴ــ پ ــ تصویری از حرکت اتومبیل در شیب عرضی جاده

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 ۲ــ۱۵). در این‌جا 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 ۲ــ۱۵

نشان می‌دهیم. $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ را جابه‌جایی زاویه‌ای ذرّه می‌نامیم. سرعت زاویه‌ای متوسط ذره در حرکت دایره‌ای، به‌صورت نسبت جابه‌جایی زاویه‌ای به زمان آن تعریف می‌شود ؛ یعنی :

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

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

مثال ۲ــ۸

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

پاسخ

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

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

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

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

یا :

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

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

تمرین ۲ــ۵

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

الف : سرعت زاویه‌ای متوسط ذره را بین لحظه‌های $t_۱ = ۱\,s$ و $t_۲ = ۲\,s$ و

ب : سرعت زاویه‌ای آن را در لحظه‌ی $t_۳ = ۳\,s$ حساب کنید.

۲ــ۵ــ 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.

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

یا :

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

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

دوره: زمانی که طول می‌کشد تا 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 $\frac{۱}{s}$ یا هرتز (Hz) است.

روشن است که :

$$T = \frac{1}{f} \qquad (۸ــ۲)$$

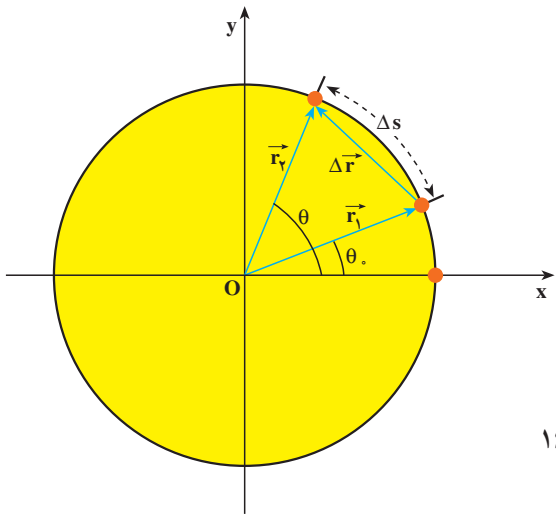
چون ذره در هر دور، 2π رادیان طی می‌کند، سرعت زاویه‌ای آن برابر است با :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \qquad (۹ــ۲)$$

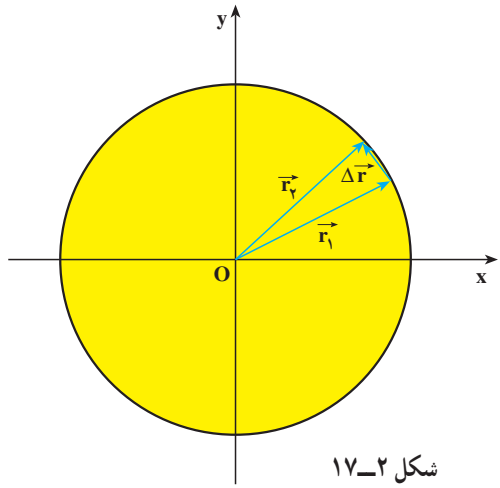
تمرین ۲ــ۶

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

سرعت خطی در حرکت دایره‌ای: در فصل قبل دیدید که موقعیت ذره را در صفحه می‌توان با بردار مکان مشخص کرد (شکل ۲ــ۱۶). اگر بردار مکان ذره در لحظه‌ی t_1 ، $\vec{r}_1$ و در لحظه‌ی t_2 ، $\vec{r}_2$ باشد، جابه‌جایی ذره در بازه‌ی زمانی $\Delta t = (t_2 - t_1)$ برابر $\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ خواهد بود. ذره در این بازه‌ی زمانی کمان Δs را می‌پیماید. اگر بازه‌ی زمانی Δt بسیار کوچک باشد، کمان Δs کوچک می‌شود و می‌توان طول کمان Δs را تقریباً با طول وتر مقابل آن یعنی $|\Delta\vec{r}|$ برابر گرفت.



شکل ۲ــ۱۶



شکل ۲ــ۱۷

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

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

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

$$|\vec{v}| = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \qquad (۲ــ۱۰)$$

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

یعنی :

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

یا :

$$\Delta s = r\Delta\theta \qquad (۲ــ۱۱)$$

بنابراین رابطه‌ی ۲ــ۱۰ را می‌توان به‌صورت زیر نوشت :

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

یا :

$$v = r\omega \qquad (۲ــ۱۲)$$

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

مثال ۲ــ۹

در یک شهربازی، گردونه‌ای افراد را در یک سطح افقی و در مسیر دایره‌ای می‌گرداند (شکل ۲ــ۱۸). به‌طوری که هر فرد حرکت دایره‌ای یکنواختی دارد. اگر گردونه در هر ۱۰ ثانیه یک دور بزند و شعاع چرخش برای هر نفر ۵m باشد، سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی هر شخص را در این گردونه محاسبه کنید.

شکل ۲ــ۱۸

پاسخ

دوره‌ی چرخش $T = ۱۰s$ است.

پس سرعت زاویه‌ای برابر است با : $\omega = \frac{۲\pi}{T} = \frac{۲\pi}{۱۰} = \frac{\pi}{۵}$ rad/s

و سرعت خطی آن نیز برابر خواهد بود با :

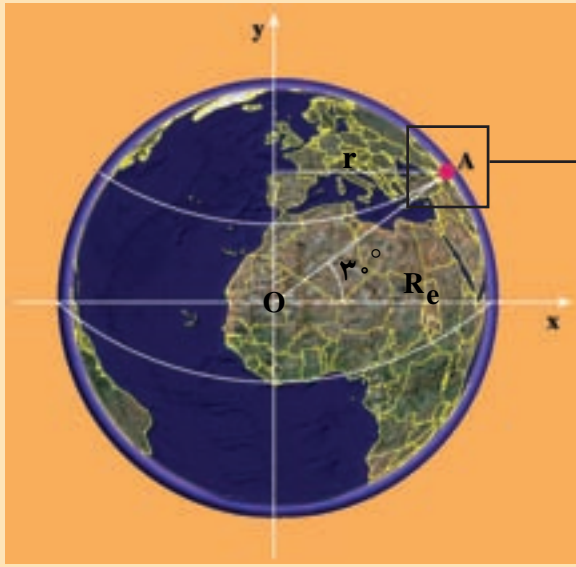
$v = r\omega \quad ۵ \times \frac{\pi}{۵} = ۳/۱۴$ m/s

تمرین ۲ــ۷

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

مثال ۲ــ۱۰

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



شکل ۲ــ۱۹

پاسخ

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

$$\omega = \frac{۲\pi}{T}$$

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

$$\omega = \frac{۲\pi}{۸۶۴۰۰} = ۷/۲۷\times ۱۰^{-۵}\ \ rad/s$$

فاصله‌ی آبادان از محور چرخش زمین، با توجه به شکل ۲ــ۱۹ برابر است با :

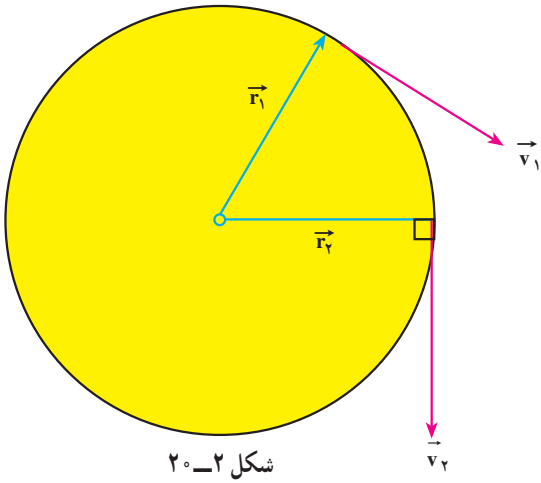
$$r = ۶/۴ \times ۱۰^{۶} \times \frac{\sqrt{۳}}{۲} = ۵/۵۴ \times ۱۰^{۶}\ m$$

و سرعت خطی شخص در آبادان برابر است با :

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

شتاب در حرکت دایره‌ای یکنواخت

ذره‌ای را درنظر بگیرید که دارای حرکت دایره‌ای یکنواخت است (شکل ۲ــ۲۰). در فصل قبل دیدیم که بردار سرعت در هر لحظه مماس بر مسیر است. اگر مکان ذره در لحظه‌ی $t_۱$ ، $\vec{r}_۱$ و در لحظه‌ی $t_۲$ ، $\vec{r}_۲$ باشد، بردارهای سرعت متحرک در این نقاط به‌ترتیب بر $\vec{r}_۱$ و $\vec{r}_۲$ عمودند. بردار $\Delta\vec{v} = \vec{v}_۲ - \vec{v}_۱$ در شکل ۲ــ۲۱ رسم شده است. ملاحظه می‌شود با این که بزرگی بردار سرعت ثابت است، به علت تغییر راستای بردار سرعت $\Delta\vec{v} \neq ۰$ است. اندازه‌ی شتاب متوسط حرکت را در این حالت 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 به‌دست می‌آید :

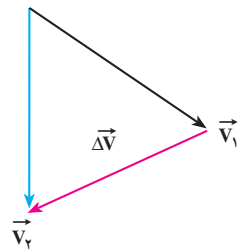


شکل ۲ــ۲۰

$$a = \frac{v^{۲}}{r} \qquad (۲ــ۱۳)$$

یا

$$a = r\omega^{۲} \qquad (۲ــ۱۴)$$



شکل ۲ــ۲۱

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

تمرین ۲ــ۸

شتاب مرکزگرای ماه به دور زمین را محاسبه کنید.
فاصله‌ی ماه از زمین $۳/۸\times۱۰^{۸}\,m$ و دوره‌ی ماه را ۲۹ روز فرض کنید.

مثال ۲ــ۱۱

خودرویی پیچ جاده‌ای به شعاع ۲۰۰ m را با سرعت ثابت ۲۰ m/s می‌پیماید. شتاب مرکزگرای این خودرو را محاسبه کنید.

پاسخ

$$a = \frac{v^{۲}}{r}$$

$$a = \frac{۴۰۰}{۲۰۰} = ۲\ m/s^{۲}$$

۲ــ۶ ــ دینامیک حرکت دایره‌ای یکنواخت

در بخش ۲ــ۵ دیدیم که در حرکت دایره‌ای یکنواخت، شتاب جسم در راستای شعاع دایره و جهت آن به طرف مرکز است. بنابر قانون دوم نیوتون نیرو و شتاب هم‌جهت‌اند، در نتیجه در حرکت دایره‌ای یکنواخت، برآیند نیروهای وارد بر جسم در راستای شعاع و به سوی مرکز است. از این‌رو برآیند نیروهای وارد بر جسم را که منجر به حرکت دایره‌ای می‌شوند، **نیروی مرکزگرا** می‌نامند.

با توجه به رابطه‌های ۲ــ۱۳ و ۲ــ۱۴ قانون دوم نیوتون در حرکت دایره‌ای یکنواخت به‌صورت زیر بیان می‌شود :

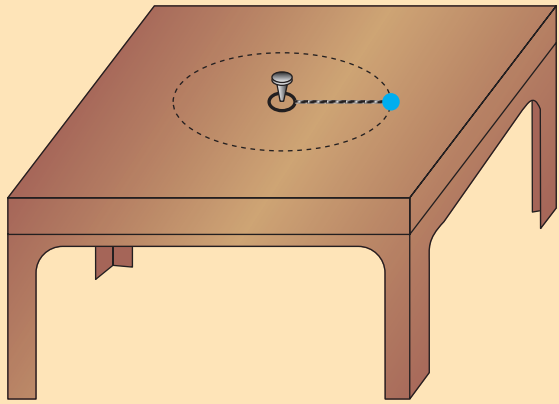
$$F = \frac{mv^{۲}}{r} \qquad (۲ــ۱۵ــ \text{الف})$$

$$F = mr\omega^{۲} \qquad (۲ــ۱۵ــ \text{ب})$$

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

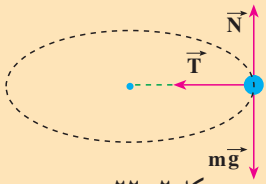
مثال ۲ــ۱۲

مهره‌ای به جرم ۲۰g را به نخی می‌بندیم و به انتهای دیگر نخ، حلقه‌ی کوچکی وصل می‌کنیم. سپس حلقه را مطابق شکل ۲ــ۲۲ــ الف با میخ کوتاهی در وسط یک میز ثابت می‌کنیم. نیروی اصطکاک مهره با میز ناچیز است.



شکل ۲ــ۲۲ــ الف

فاصله‌ی مهره از میخ ۲۵cm است، با یک ضربه که به مهره وارد می‌کنیم آن را روی مسیر دایره‌ای به‌حرکت 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 ۲ــ۲۲ــ ب

پاسخ

نیروهای وارد بر مهره در شکل ۲ــ۲۲ــ ب نشان داده شده است.

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

$$N - mg = 0$$

$$N = mg$$

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

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

و سرعت خطی نیز برابر است با :

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

و نیروی کشش نخ برابر است با :

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

تمرین ۲ــ۹

در هر یک از موارد زیر چه نیرویی مرکزگرا است؟

۱ــ در حرکت لباس‌هایی که در ماشین‌لباس‌شویی می‌چرخند.

۲ــ در چرخش الکترون به‌دور هسته.

۳ــ در گردش سیاره‌ها به دور خورشید.

مثال ۲ــ۱۳

شکل ۲ــ۲۳ــ الف

براساس اصول مهندسی، در سر پیچ‌های جاده‌ها، شیب عرضی ایجاد می‌کنند تا خودروها بدون خطر انحراف و خارج شدن از مسیر، جاده را طی کنند. زاویه‌ی شیب عرضی جاده با راستای افق چه‌قدر باید باشد، تا هنگامی که خودرو با بیشینه‌ی سرعت مجاز پیچ جاده را می‌پیماید از مسیر جاده منحرف نشود (اصطکاک در عرض جاده قابل چشم‌پوشی است.)

پاسخ

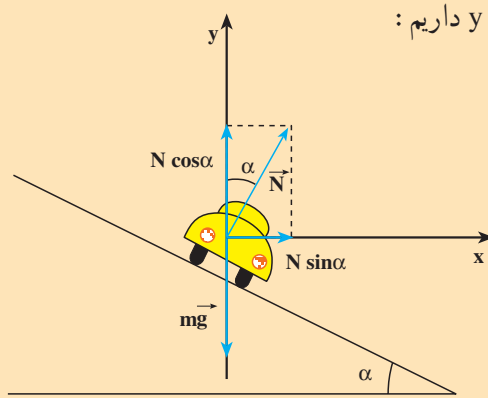
نمودار نیروهای وارد بر خودرو را، در مقطع عرضی جاده، رسم می‌کنیم (شکل ۲ــ۲۳ــ ب).

دو نیرو، یکی نیروی وزن خودرو (mg) و دیگری نیروی عمودی سطح جاده (N) بر خودرو وارد می‌شوند. این نیروها را روی محورهای x و y تجزیه می‌کنیم. روی محور y داریم :

$$F_y = 0$$

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

$$N\cos\alpha = mg$$



شکل ۲ــ۲۳ــ ب

برآیند نیروهای وارد در راستای محور x (که جهت آن متوجه مرکز پیچ است) برابر $F_x = N\sin\alpha$ است. در این مثال نیروی مرکزگرا برابر $N\sin\alpha$ است. در نتیجه با استفاده از قانون دوّم نیوتون داریم :

$$N\sin\alpha = m\frac{v^2}{r}$$

که در این رابطه r شعاع انحنای جاده است. در نتیجه :

$$\tan\alpha = \frac{v^2}{rg}$$

تمرین ۲ــ۱۰

در پیچ جاده‌ای حداکثر سرعت مجاز را ۴۰km/h نوشته‌اند، اگر شعاع انحنای این پیچ ۵۰m باشد، زاویه‌ی شیب عرضی جاده را با افق محاسبه کنید.

ابوریحان بیرونی

ابوریحان محمدبن‌احمد 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، کوشیاربن‌لبان گیلانی و ابومحمد خجندی، آشنا شد و رساله‌ای کوتاه در مورد وسیله‌ای که خجندی برای رصد آسمان ساخته بود، نگاشت (حکایة الالة المسماة السدس الفخری). هم‌چنین، بیرونی در مقدمه‌ی کتاب «مقالید علم الهیئة مایحدث فی‌سطح 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 جُرجان و نزد قابوس وشمگیر نخستین کتاب مشهور خود، «آثارالباقیه عن القرون الخالیه» را درباره‌ی 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 انجام‌دادن 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 چیستی کهکشان راه شیری که در کتاب التفهیم آمده از اهمیتی بسزا برخوردار است؛ زیرا در میان طبیعی‌دانان مسلمان کم‌تر کسی به آن پرداخته است و همگی از نظریات ارسطو در این زمینه پیروی می‌کرده‌اند. تنها بیرونی و ابن هیثم نظریاتی نو دراین زمینه مطرح کرده‌اند. بیرونی چنین می‌گوید: «مجرّه را پارسیان راه کاهکشان خوانند و هندوان راه بهشت و آن جمله‌شدن ستارگان است از جنس ستارگان ابری و ...»

بیرونی در بخشی از کتاب افراد المقال فی‌امر الظلال سخن احمد بن‌طیب 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 الممکنه فی صنعة الاسطرلاب»، رساله‌ای مهم در تاریخ نجوم اسلامی درباره‌ی بررسی و مقایسه‌ی روش‌های گوناگون ساخت انواع اسطرلاب، و «تسطیح الصور و تبطیح الکور»، رساله‌ای درباره‌ی تصویرکردن شکل‌های روی کره بر سطح مستوی، را نگاشته است.

۲ــ۷ــ قانون‌های کپلر

منظره‌ی ستارگان در آسمان، از روزگاران پیشین، همواره کنجکاوی بشر را برمی‌انگیخته است. توجه اندیشمندان به آسمان، دانش ستاره‌شناسی را که شاید از قدیم‌ترین شاخه‌های دانش بشری است، پدید آورد. به‌تدریج دانشمندان پی بردند که آرایش ستاره‌ها ثابت، ولی مکان تعدادی از آن‌ها تغییر می‌کرد. این دسته از جرم‌های آسمانی را سیاره نامیدند.

بر طبق نظریه‌ی بطلمیوس که در آن زمین در مرکز عالم فرض می‌شد، حرکت سیاره‌ها بسیار پیچیده به‌نظر می‌آمد. نظریه‌ی زمین مرکزی بطلمیوس تا قرن شانزدهم میلادی، نظریه‌ای قابل قبول برای توصیف حرکت سیاره‌ها بود، به‌گونه‌ای که دانشمندان ایرانی به‌ویژه خواجه نصیرالدین‌توسی، این نظریه را گسترش دادند و حرکت سیارات را با دقّت زیادی مورد بررسی قرار دادند.

در سال ۱۵۳۳ میلادی کوپرنیک، منجم لهستانی در کتاب خود به‌نام «درباره‌ی مدارهای گردش اجسام آسمانی» نظریه‌ی خورشید مرکزی را ارایه کرد که تحول بسیار بزرگی در شناخت بشر از جهان به‌وجود آورد.

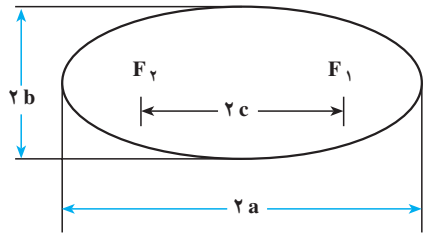
تیکوبراهه، اخترشناس دانمارکی، سال‌های زیادی را به رصد ستاره‌ها پرداخت و موقعیت سیاره‌ها را در میان ستاره‌های ثابت آسمان در زمان‌های مختلف ثبت کرد. کپلر پس از ۲۰ سال تحقیق و بررسی در سال ۹۸۸ هجری خورشیدی (۱۶۰۹ میلادی) دو قانون درباره‌ی حرکت سیاره‌ها به دور خورشید، بیان کرد. ۹ سال پس از آن نیز قانون دیگری درباره‌ی حرکت سیاره‌ها به‌دست آورد. اکنون به بیان این سه قانون می‌پردازیم :

قانون اوّل: «مسیر حرکت تمام سیاره‌ها به دور خورشید، بیضی است، که خورشید یکی از کانون‌های آن است.»

در درس ریاضی خوانده‌اید که اگر فاصله‌ی بین دو کانون بیضی 2c، قطر بزرگ آن 2a و قطر کوچک آن 2b باشد، نسبت c/a را **خروج از مرکز بیضی** می‌گویند و آن را با e نمایش می‌دهند.

به شکل ۲ــ۲۴ توجه کنید. هرقدر e کوچک‌تر باشد فاصله‌ی بین دو کانون در

مقایسه با قطر بیضی کم‌تر است و شکل بیضی به دایره نزدیک‌تر می‌شود. خروج از مرکز سیاره‌های منظومه‌ی خورشیدی و میانگین فاصله‌ی آن‌ها از خورشید در جدول ۲ــ۱ آورده شده است.



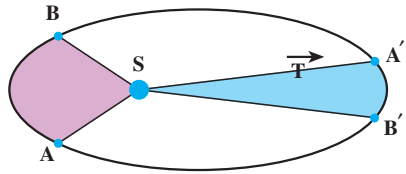
شکل ۲ــ۲۴

جدول ۲ــ۱

نام سیاره	خروج از مرکز $e=\frac{c}{a}$	میانگین فاصله‌ی سیاره از خورشید برحسب m
تیر (عطارد)	۰/۲۰۶	$۵/۷۹\times۱۰^{۱۰}$
ناهید (زهره)	۰/۰۰۷	$۱/۰۸\times۱۰^{۱۱}$
زمین	۰/۰۱۷	$۱/۴۹\times۱۰^{۱۱}$
بهرام (مریخ)	۰/۰۹۳	$۲/۲۸\times۱۰^{۱۱}$
برجیس (مشتری)	۰/۰۴۸	$۷/۷۸\times۱۰^{۱۱}$
کیوان (زحل)	۰/۰۵۶	$۱/۴۳\times۱۰^{۱۲}$
اورانوس	۰/۰۴۸	$۲/۸۷\times۱۰^{۱۲}$
نپتون	۰/۰۰۹	$۴/۵\times۱۰^{۱۲}$
پلوتو	۰/۲۴۹	$۵/۹\times۱۰^{۱۲}$

با توجه به جدول بالا می‌بینیم که مسیر بیش‌تر سیاره‌های منظومه‌ی خورشیدی، به دایره نزدیک است. پس می‌توان خورشید را مرکز دایره فرض کرد.

قانون دوم: «شعاع حامل هر سیاره (خطی که خورشید را به سیاره وصل می‌کند) در زمان‌های مساوی، مساحت‌های مساوی را جاروب می‌کند.» مسیر یک سیاره به دور خورشید، در شکل ۲ــ۲۵ نشان داده شده است. در این شکل، دو قسمت هاشور



شکل ۲ــ۲۵

زده دارای مساحت برابرند. در نتیجه بنابر قانون دوّم کپلر، سیاره کمان‌های AB و $A'B'$ را در زمان‌های مساوی می‌پیماید. اما چون سیاره در مسیر AB به خورشید نزدیک‌تر است. در نتیجه طول کمان AB از طول کمان $A'B'$ بیش‌تر است، از این رو سیاره کمان AB را با سرعت بیش‌تری می‌پیماید تا کمان $A'B'$ را.

گفتیم اگر خروج از مرکز بیضیِ مسیر سیاره کوچک باشد، می‌توان آن را دایره فرض کرد که در این‌صورت قسمت‌های هاشور خورده به دو قطاع مساوی دایره‌ی روبه‌رو به کمان‌های مساوی تبدیل می‌شوند. درنتیجه سیاره تمام مسیر را با سرعت ثابت می‌پیماید که در این‌صورت حرکت سیاره به دور خورشید را می‌توان حرکت دایره‌ای یکنواخت فرض کرد. مسیر حرکت زمین به دور خورشید نیز بسیار نزدیک به دایره است و سرعت این حرکت حدود ۳۰ km/s محاسبه شده است.

قانون سوم: «مجذور دوره‌ی حرکت هر سیاره به دور خورشید با مکعب فاصله‌ی میانگین آن از خورشید متناسب است. یعنی اگر T دوره‌ی سیاره و r فاصله‌ی میانگین آن از خورشید باشد، نسبت $\frac{T^2}{r^3}$ برای تمام سیاره‌ها یکسان است.»

مثال ۲ــ۱۴

با استفاده از جدول ۲ــ۱ دوره‌ی کیوان را به‌دست آورید.

پاسخ

اگر دوره‌ی زمین و کیوان را به‌ترتیب T_1 و T_2 و فاصله‌ی میانگین آن‌ها را از خورشید به‌ترتیب r_1 و r_2 بگیریم، بنابر قانون سوم کپلر داریم :

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^3$$

$T_1 = 1$ سال

$$\frac{1}{T_2^2} = \left(\frac{1/49 \times 10^{11}}{1/43 \times 10^{12}}\right)^3$$

$T_2 = 29/73$

تمرین ۲ــ۱۱

دوره‌ی حرکت پلوتو چند برابر دوره‌ی تیر است؟

تمرین‌های فصل دوم

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

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

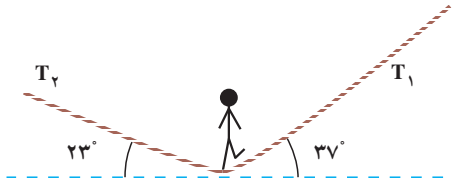
ب : نقش نیروهای مختلف در هنگام راه رفتن ما بر روی زمین چگونه است؟

۲ــ به جسمی به جرم ۱۰۰kg نیروی ثابت F در راستای قائم به‌طرف بالا وارد می‌شود. جسم از حال سکون با شتاب $5\ m/s^2$ به‌طرف بالا حرکت می‌کند و پس از ۲۰s نیروی F حذف می‌شود.

الف : مقدار نیروی F را تعیین کنید.

ب : جسم تا چه ارتفاعی بالا می‌رود؟ $g = 10\ m/s^2$ (از مقاومت هوا چشم‌پوشی کنید.)

۳ــ یک بازیگر سیرک به وزن ۶۰۰N روی طنابی مطابق شکل ۲ــ۲۶، درحال تعادل است. نیروهای کشش طناب رامحاسبه کنید.



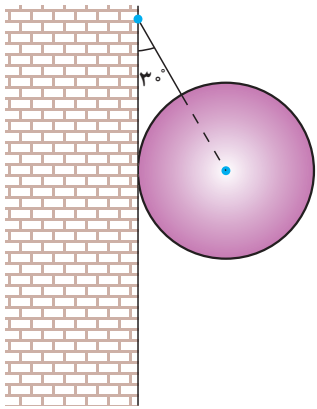
شکل ۲ــ۲۶

۴ــ جسمی را با سرعت اولیه‌ی $v_{\circ}$ در امتداد سطح شیب‌داری که با افق زاویه‌ی α می‌سازد به بالا پرتاب می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی جسم و سطح را μ_k بگیرید :

الف : این جسم تا چه مسافتی روی سطح شیب‌دار بالا می‌رود؟ (برحسب $v_{\circ}$ ، α و μ_k)

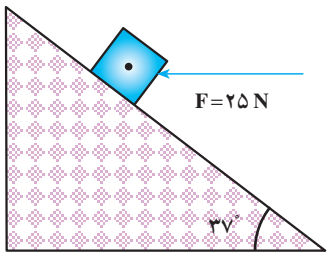
ب : اگر جسم دوباره به پایین حرکت کند، سرعت آن را هنگام رسیدن به پایین سطح شیب‌دار برحسب $v_{\circ}$ ، α و μ_k محاسبه کنید.

۵ ــ کره‌ای به جرم ۲۰kg را، مطابق شکل ۲ــ۲۷، به‌وسیله‌ی کابلی به دیوار قائم و بدون اصطکاک آویزان می‌کنیم. نیروی کشش کابل و واکنش دیوار را محاسبه کنید.



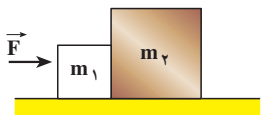
شکل ۲ــ۲۷

۶ــ جسمی به جرم ۲kg روی سطح شیب‌داری با زاویه‌ی ۳۷° نسبت به افق، توسط نیروی افقی $F = 25N$ مطابق شکل ۲ــ۲۸ به بالا رانده می‌شود. ضریب اصطکاک جنبشی جسم با سطح ۰/۲ است. شتاب حرکت جسم را محاسبه کنید.

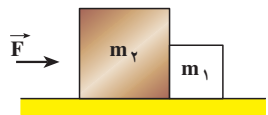


شکل ۲ــ۲۸

۷ــ دو جسم به جرم‌های $m_1 = 1kg$ و $m_2 = 2kg$ مطابق شکل ۲ــ۲۹ روی سطح افقی صافی قراردارند. نیروی افقی $\vec{F}$ باعث می‌شود که دو جسم با شتاب $3m/s^2$ به حرکت درآیند. اندازه‌ی نیروی F و نیروی تماسی‌ای که دو جسم بریکدیگر وارد می‌کنند را در هر یک از دو شکل «الف» و «ب» محاسبه کنید.



(ب)



(الف)

شکل ۲ــ۲۹

۸ــ پاسخ مسئله‌ی ۷ را برای حالتی که ضریب اصطکاک جنبشی بین جسم و سطح ۰/۱ باشد، بنویسید.

۹ــ کتابی را مانند شکل ۲ــ۳۰ به دیوار فشرده و ثابت نگه داشته‌ایم.

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

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

شکل ۲ــ۳۰

۱۰ــ از یک لوله‌ی آتش‌نشانی آب با آهنگ ۵ kg/s با سرعت ۵ m/s به دیوار مقابل برخورد می‌کند. نیروی متوسط وارد بر دیوار توسط آب را حساب کنید. (از برگشت آب از روی دیوار چشم‌پوشی کنید.)

شکل ۲ــ۳۱

۱۱ــ پره‌های یک بالگرد (هلیکوپتر) در هر دقیقه ۹۰۰ دور می‌گردد. کمیّت‌های زیر را برای پره‌ها محاسبه کنید.

الف : دوره، بسامد و سرعت زاویه‌ای ؛

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

۱۲ــ برای این‌که خودرویی بتواند در پیچ جاده‌ای به شعاع ۱۲۰m در شرایطی که اصطکاک در عرض جاده ناچیز است با سرعت ۵۴ km/h حرکت کند، شیب عرضی جاده چه‌قدر باید باشد؟

۱۳ــ ماهواره‌ای در اثر نیروی گرانشی بین زمین و ماهواره، روی مدار دایره‌ای به دور زمین می‌گردد. اگر جرم ماهواره $m = ۲۵۰ kg$ ، جرم زمین $M_E = ۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴} kg$ ، ثابت جهانی گرانش $G = ۶/۶۷ \times ۱۰^{-۱۱} N.m^۲/kg^۲$ ، فاصله‌ی ماهواره از سطح زمین ۲۶۰۰km و شعاع زمین ۶۴۰۰km باشد، کمیت‌های زیر را محاسبه کنید :

الف : نیروی گرانش بین ماهواره و زمین

ب : سرعت ماهواره

پ : دوره‌ی گردش ماهواره

۱۴ــ یک ماهواره در چه فاصله‌ای از مرکز زمین باید قرار گیرد تا همواره در یک نقطه در بالای خط استوا باشد؟ جرم زمین $۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴} kg$ و $G = ۶/۶۷ \times ۱۰^{-۱۱} N.m^۲/kg^۲$.

۱۵ــ جرم ماهواره‌ی امید (شکل ۲ــ۳۲) تقریباً ۲۷ کیلوگرم و فاصله‌ی آن از سطح زمین حدوداً ۲۵۰ کیلومتر است. با توجه به داده‌های مسئله‌ی ۱۳، دوره، سرعت و نیروی گرانش بین این ماهواره و زمین را به دست آورید.

شکل ۲ــ۳۲ــ ماهواره‌ی امید

۳

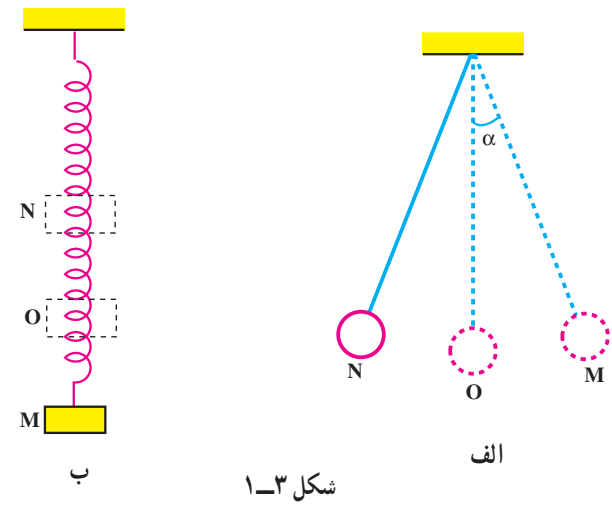
حرکت نوسانی

هاینریش هرتز

(۱۸۵۷ـ۱۸۹۴م)

حرکت نوسانی

نگاهی به فصل: گردش زمین به دور خورشید، گردش ماه به دور زمین، ضربان قلب انسان، ارتعاش تارهای کمانچه یا تار و سه‌تار، بالا و پایین رفتن تاب بازی، پیدایش فصل‌های سال، طلوع و غروب خورشید، یا حرکت یک آونگ ساده (شکل ۳ــ۱ ــ الف)، حرکت وزنه‌ای که به یک فنر متصل است (شکل ۳ــ۱ــ ب) و مثال‌های بسیار دیگری مانند این‌ها، حرکت‌های دوره‌ای هستند که با گذشت زمان بارها تکرار می‌شوند. در حرکت‌های دوره‌ای، متحرک پس از طی زمان معینی به وضعیت اولیه برمی‌گردد و حرکت خود را از نو آغاز می‌کند. در این فصل پس از معرفی پدیده‌های دوره‌ای به توصیف حرکت هماهنگ ساده می‌پردازیم. زیرا شناخت و بررسی این حرکت، پایه و اساس مناسبی برای درک امواج و انتشار آن‌ها فراهم می‌کند.



شکل ۳ــ۱

۳ــ۱ــ حرکت هماهنگ ساده

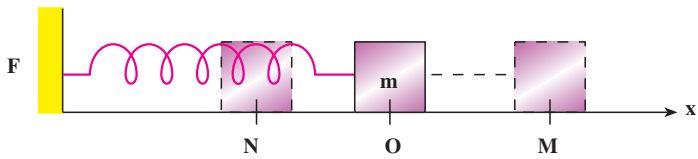
یک حرکت نوسانی را **هماهنگ ساده** می‌نامیم وقتی مسیر رفت و برگشت متحرک روی یک پاره‌خط حول نقطه‌ای واقع در وسط آن باشد. برای مثال، حرکت آونگ (شکل ۳ ــ ۱ــ الف)، وقتی زاویه‌ی α خیلی کوچک باشد، به گونه‌ای که بتوان تانژانت و سینوس آن را برابر گرفت و همچنین بالا و پایین رفتن وزنه‌ی آویخته به فنر (شکل ۳ــ۱ــ ب). در این دو حرکت، متحرک، دربازه‌های 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 ــ فنر در شکل ۳ــ۱ــ ب الگوی مناسبی برای بررسی حرکت نوسانی ساده است. ابتدا برخی مفهوم‌ها را در این حرکت معرفی می‌کنیم.

دوره و بسامد: در حرکت هماهنگ ساده 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 :

$$f = \frac{1}{T} \qquad (۱ــ۳)$$

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 ۳ــ۲). در حالتی که فنر طول عادی خود را دارد برآیند نیروهای وارد به جسم صفر و در نتیجه جسم در حال تعادل است.



شکل ۳ــ۲

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، امّا هیچ‌گاه فاصله‌ی آن از مبدأ بیش از OM یا ON نمی‌شود. این بیش‌ترین فاصله‌ی نوسانگر از مبدأ را **دامنه** می‌نامیم و معمولاً آن‌را با A نشان می‌دهیم.

نیروی بازگرداننده: در شکل ۳ــ۲، جهت نیروی فنر همواره به گونه‌ای است که می‌خواهد

جسم را به حالت تعادل (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، به‌دست می‌آید :

$$F = -kx \qquad (۲_۳)$$

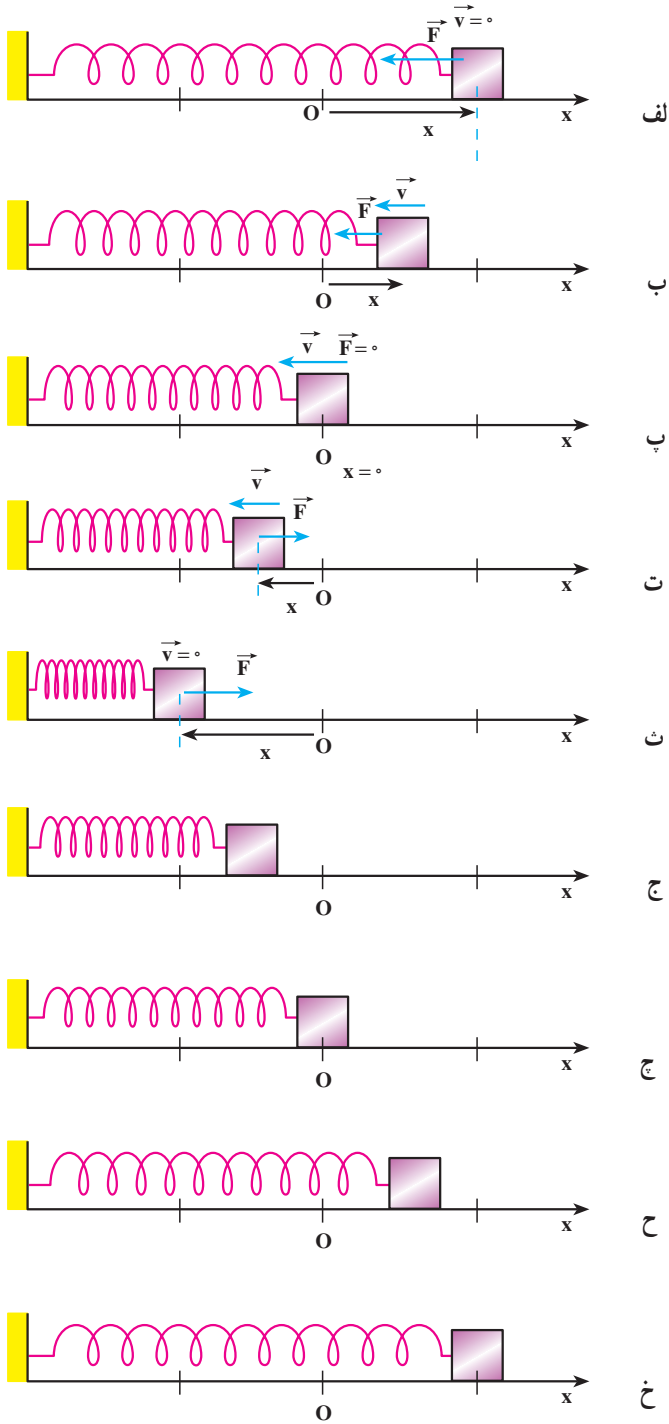
در این رابطه ، x تغییر طول فنر، F نیروی بازگرداننده‌ی فنر و k ثابت تناسب است که به ویژگی‌های فنر بستگی دارد و آن را ثابت نیروی فنر می‌نامیم. یکای k در SI نیوتون بر متر (N/m) است. علامت منفی در رابطه‌ی ۳ــ۲ نشان می‌دهد که جهت نیروی بازگرداننده‌ی فنر همواره خلاف جهت بردار مکان جسم است. هر دستگاهی که نیروی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

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

همان‌طور که در شکل ۳ــ۳ــ الف تا پ دیده می‌شود، اگر جسم را پس از خارج کردن از وضع تعادل رها کنیم، تحت اثر نیروی بازگرداننده به‌طرف وضع تعادل خود (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. بنابه قانون دوّم 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 ۳ــ۱

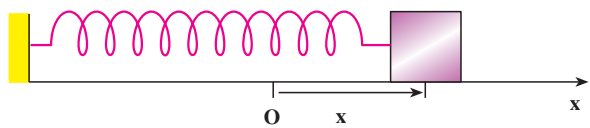
دیدیم در لحظه‌ای که فنر بیش‌ترین فشردگی را پیدا می‌کند سرعت نوسانگر به صفر می‌رسد. اکنون با توجه به شکل‌های ۳ــ۳ــ ج تا خ نیروی وارد بر نوسانگر و همچنین مکان، سرعت و شتاب نوسانگر را پس از لحظه‌ی مذکور بررسی کنید.


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

شکل ۳ــ۳

۳ــ۲ــ معادله‌ی حرکت هماهنگ ساده

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



شکل ۳ــ۴

بنابه رابطه‌ی ۳ــ۲ نیروی وارد بر وزنه در این لحظه $F=-kx$ است. اگر جرم وزنه m باشد بنابه قانون دوّم نیوتون داریم :

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

$$a=-\frac{k}{m}x \qquad (۳ــ۳)$$

بنابه 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.

$$x=A\sin(\omega t+\varphi_\circ) \qquad (۴ــ۳)$$

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

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

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

با توجه به رابطه‌ی ۳ــ۴ می‌توان نوشت :

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

از مقایسه‌ی رابطه‌ی اخیر با رابطه‌ی ۳ــ۳ نتیجه‌ی زیر حاصل می‌شود.

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

ω را **بسامد زاویه‌ای** می‌نامیم. یکای بسامد زاویه‌ای رادیان بر ثانیه است. در رابطه‌ی ۳ــ۴، x مکان متحرک در لحظه‌ی t و A دامنه نوسان است ؛(چرا؟). هم‌چنین $(\omega t + \varphi_0)$ 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 :

$$\varphi_1 = \omega t_1 + \varphi_0$$

و در لحظه‌ی t_2 فاز حرکت

$$\varphi_2 = \omega t_2 + \varphi_0$$

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

$$\Delta\varphi = (\omega t_2 + \varphi_0) - (\omega t_1 + \varphi_0) = \omega(t_2 - t_1)$$

یا

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

در رابطه‌ی ۳ــ۶ اگر $\Delta t = 1s$ باشد $\Delta\varphi = \omega$ 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 ۳ــ۶ می‌توان چنین نوشت :

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

و از آن‌جا

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

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

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

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

رابطه‌ی ۳ــ۸ نشان می‌دهد که دوره به ویژگی‌های فیزیکی نوسانگر بستگی دارد ؛ چنان که اگر وزنه را تغییر دهیم (m تغییر کند) یا فنر را عوض کنیم (k تغییر کند) دوره و در نتیجه بسامد نوسان‌های

دستگاه، تغییر می‌کند. از طرف دیگر دوره و بسامد به دامنه 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 ۳ــ۱

معادله‌ی حرکت نوسانگری در SI به صورت زیر است.

$$x = ۰/۰۵\sin(۶۰\pi t + \frac{\pi}{۶})$$

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

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

پاسخ

الف : باتوجه به معادله‌ی ۳ــ۴ و رابطه‌ی ۳ــ۷ نتایج زیر حاصل می‌شود.

دامنه : $A = ۰/۰۵m$

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

بسامد : $f = \frac{۱}{T} = ۳۰\ Hz$

و فاز اولیه : $\varphi_۰ = +\frac{\pi}{۶}$

ب : $x_۰ = ۰/۰۵\sin(۶۰\pi \times ۰ + \frac{\pi}{۶}) = ۰/۰۵ \times \frac{۱}{۲} = ۰/۰۲۵\,m$

$$x = ۰/۰۵\sin(۶۰\pi \times \frac{۱}{۳۶۰} + \frac{\pi}{۶}) \Rightarrow x = ۰/۰۵\sin\frac{\pi}{۳} = ۰/۰۲۵\sqrt{۳}m$$

مثال ۳ــ۲

دامنه‌ی نوسان نوسانگر هماهنگ ساده‌ای ۲cm و بسامد آن ۲۰Hz است. اگر نوسانگر در لحظه‌ی $t = ۰$ در فاصله‌ی ۲+ سانتی‌متری مبدأ باشد معادله‌ی حرکت آن را بنویسید.

پاسخ

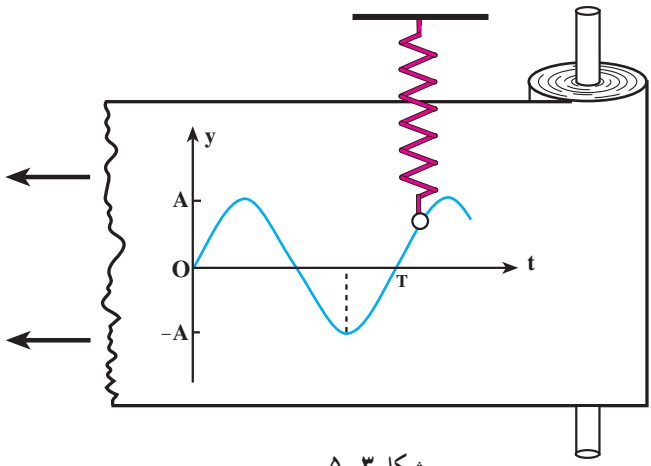
$$A = ۰/۰۲m \ , \ f = ۲۰Hz \ , \ \omega = ۲\pi f \Rightarrow \omega = ۴۰\pi,$$

$$x_۰ = A\sin(\omega \times ۰ + \varphi_۰)$$

$$\sin\varphi_۰ = \frac{x_۰}{A} = \frac{+۲}{۲} = ۱ \Rightarrow \varphi_۰ = \frac{\pi}{۲}$$

$$x = A\sin(\omega t + \varphi_۰) \Rightarrow x = ۰/۰۲\sin\left(۴۰\pi t + \frac{\pi}{۲}\right)$$

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



شکل ۳ــ۵

در این روش نوار کاغذی روی استوانه‌ای که در امتداد قائم قرار دارد پیچیده شده است. استوانه می‌تواند به‌طور یکنواخت حول محورش بچرخد. نوسانگر وزنه ــ فنر در امتداد قائم طوری نصب شده است که 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 ۳ــ۳

دوره و دامنه‌ی نوسانگر هماهنگ ساده‌ای به ترتیب $0/2\,s$ و $6\,cm$ است. معادله‌ی حرکت این نوسانگر را هنگامی که فاز اولیه‌ی آن صفر است بنویسید و نمودار مکان ــ زمان آن را رسم کنید.

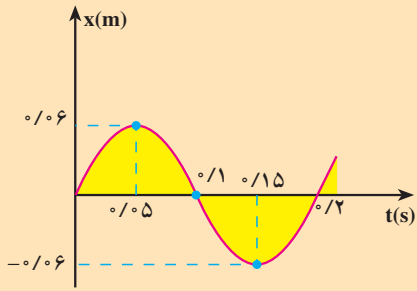
پاسخ

$$T = 0/2\,s \;,\; A = 0/06\,m \;,\; \omega = 10\pi\ rad/s \;,\; \varphi_0 = 0$$

معادله‌ی حرکت : $x = A\sin(\omega t + \varphi_0) \rightarrow x = 0/06\sin 10\pi t$

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

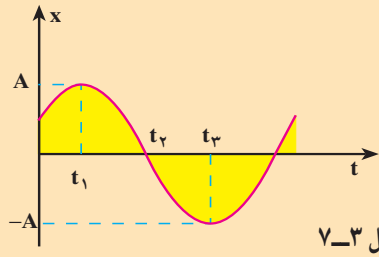
x	t
0	0
$+A = 0/06$	$\frac{T}{4} = 0/05$
0	$\frac{T}{2} = 0/1$
$-A = -0/06$	$\frac{3T}{4} = 0/15$
0	$T = 0/2$



شکل ۳ــ۶

مثال ۳ــ۴

نمودار شکل ۳ــ۷ مربوط به حرکت هماهنگ ساده‌ای است که دوره‌ی آن $0/2$ ثانیه و فاز اولیه‌ی آن $\frac{\pi}{6}$ رادیان است. زمان‌های t_1 و t_2 و t_3 را به‌دست آورید.



شکل ۳ــ۷

پاسخ

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 10\pi \text{ rad/s} \ , \ \varphi_0 = \frac{+\pi}{6} \Rightarrow x = A\sin(10\pi t + \frac{\pi}{6})$$

با توجه به شکل ۳ــ۷ در لحظه‌ی t_1 مکان با دامنه برابر است ؛ بنابراین :

$$+A = A\sin(10\pi t_1 + \frac{\pi}{6}) \Rightarrow \sin(10\pi t_1 + \frac{\pi}{6}) = 1$$

$$10\pi t_1 + \frac{\pi}{6} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow 10\pi t_1 = \frac{\pi}{3} \Rightarrow t_1 = \frac{1}{30}s$$

در لحظه‌ی t_2 مکان صفر است، بنابراین :

$$0 = A\sin(10\pi t_2 + \frac{\pi}{6})$$

$$(10\pi t_2 + \frac{\pi}{6}) = 0 \text{ یا } (10\pi t_2 + \frac{\pi}{6}) = \pi$$

از تساوی $(10\pi t_2 + \frac{\pi}{6}) = 0$ زمان t_2 منفی به دست می‌آید در حالی‌که در شکل t_2 مثبت است، بنابراین :

$$(10\pi t_2 + \frac{\pi}{6}) = \pi \Rightarrow \quad t_2 = \frac{1}{12}s$$

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

در لحظه‌ی t_3 مکان $-A$ است بنابراین

$$-A = A\sin(10\pi t_3 + \frac{\pi}{6}) \Rightarrow \sin(10\pi t_3 + \frac{\pi}{6}) = -1$$

$$10\pi t_3 + \frac{\pi}{6} = \frac{3\pi}{2} \Rightarrow t_3 = \frac{2}{15}s$$

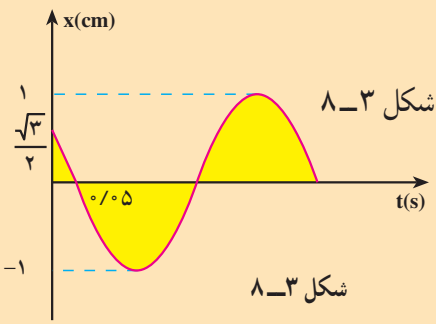
مقدار t_3 را می‌توانستیم از رابطه‌ی $t_3 = t_1 + \frac{T}{2}$ نیز به‌دست آوریم.

مثال ۳ــ۵

نمودار مکان ــ زمان نوسانگری در شکل ۳ــ۸ رسم شده است. مطلوب است :

الف : فاز اولیه‌ی نوسانگر

ب : دوره‌ی حرکت



شکل ۳ــ۸

پاسخ

الف : با توجه به شکل معلوم می‌شود که $A = ۱cm$ و در لحظه‌ی صفر $x_۰ = \frac{\sqrt{۳}}{۲} cm$ است. بنابراین :

$$\frac{\sqrt{۳}}{۲} = ۱ \sin(\omega \times ۰ + \varphi_۰) \Rightarrow \sin\varphi_۰ = \frac{\frac{\sqrt{۳}}{۲}}{۱} = \frac{\sqrt{۳}}{۲}$$

$$\varphi_۰ = \frac{\pi}{۳} rad \quad \text{یا} \quad \varphi_۰ = \frac{۲\pi}{۳} rad$$

اگر $\varphi_۰ = \frac{\pi}{۳}$ باشد لازم است بعد از لحظه‌ی صفر فاز حرکت از $\frac{\pi}{۳}$ بیش‌تر شود و به $\frac{\pi}{۲}$ برسد ؛ یعنی، سینوس آن باید افزایش یابد و به ۱ برسد. در حالی‌که نمودار پس از لحظه‌ی صفر، کاهش x را نشان می‌دهد. پس جواب $\varphi_۰ = \frac{\pi}{۳} rad$ قابل قبول نیست.

اگر $\varphi_۰ = \frac{۲\pi}{۳} rad$ اختیار شود همان‌طور که انتظار داریم با افزایش فاز، مقدار آن به π می‌رسد و سینوس آن به صفر کاهش می‌یابد. بنابراین $\varphi_۰ = \frac{۲\pi}{۳} rad$ قابل قبول است.

ب : معادله‌ی این حرکت در SI به صورت :

$$x = ۰/۰۱ \sin\left(\frac{۲\pi t}{T} + \frac{۲\pi}{۳}\right)$$

است. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود در لحظه‌ی $t = ۰/۰۵s$ مکان متحرک صفر است بنابراین :

$$۰ = ۰/۰۱ \sin\left(\frac{۲\pi}{T} \times ۰/۰۵ + \frac{۲\pi}{۳}\right) \Rightarrow \frac{\pi}{۱۰T} + \frac{۲\pi}{۳} = n\pi$$

چون در لحظه‌ی $t = ۰/۰۵s$ برای اولین‌بار $x = ۰$ شده است بنابراین به ازای $n = ۱$ خواهیم داشت :

$$\frac{\pi}{۱۰T} + \frac{۲\pi}{۳} = \pi \Rightarrow \quad T = ۰/۳s$$

۳ــ۳ــ معادله‌های سرعت و شتاب در حرکت هماهنگ ساده

الف ــ معادله‌ی سرعت: با توجه به این که سرعت، مشتق مکان نسبت به زمان است با مشتق‌گیری از رابطه‌ی ۳ــ۴ خواهیم داشت :

$$v = \frac{dx}{dt} \Rightarrow v = A\omega \cos(\omega t + \varphi_0) \qquad (۳ــ۱۰)$$

معادله‌ی ۳ــ۱۰ نشان می‌دهد که سرعت به ازای $\cos(\omega t + \varphi_0) = \pm 1$ بیشینه می‌شود ؛ پس داریم :

$$v_{max} = A\omega \qquad (۳ــ۱۱)$$

در لحظه‌ای که $\cos(\omega t + \varphi_0) = \pm 1$ است، $\sin(\omega t + \varphi) = 0$ و در نتیجه $x = 0$. یعنی سرعت بیشینه مربوط به لحظه‌ای است که نوسانگر درحال گذر از وضع تعادل است.

تمرین ۳ــ۱

الف : به کمک رابطه‌های ۳ــ۴ و ۳ــ۱۰ نشان دهید که $v = \pm\omega\sqrt{A^2 - x^2}$ است.

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

ب ــ معادله‌ی شتاب: می‌دانیم که شتاب مشتق سرعت نسبت به زمان، یا مشتق دوم مکان نسبت به زمان است. در نتیجه، با استفاده از رابطه‌ی ۳ــ۴ یا ۳ــ۱۰ داریم :

$$a = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) \qquad (۳ــ۱۲)$$

معادله‌ی ۳ــ۱۲ نشان می‌دهد که در حرکت هماهنگ ساده، شتاب نیز به‌طور دوره‌ای تغییر می‌کند و بیشینه‌ی آن از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$a_{max} = A\omega^2 \qquad (۳ــ۱۳)$$

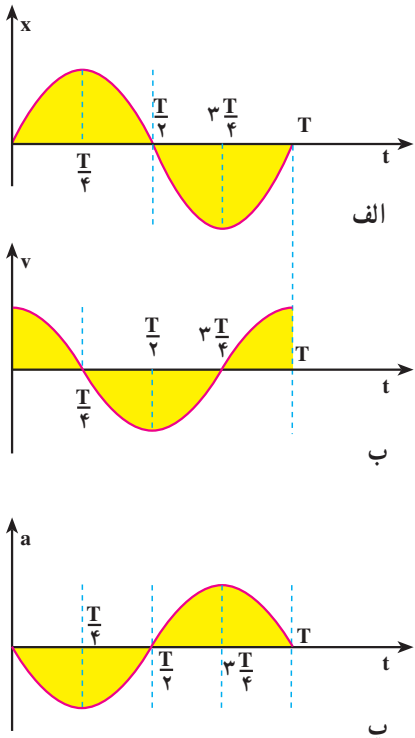
با استفاده از رابطه‌ی ۳ــ۴ می‌توان رابطه‌ی ۳ــ۱۲ را به‌صورت زیر نوشت :

$$a = -\omega^2 x \qquad (۳ــ۱۴)$$

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

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



شکل ۳ــ۹

مثال ۳ــ۶

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

الف : بیشینه‌ی سرعت و شتاب در SI چه اندازه است؟

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

پاسخ

الف :

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

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

$$a_{max} = A\omega^۲ = ۰/۰۵ \times ۱۰۰ = ۵ \text{ m/s}^۲$$

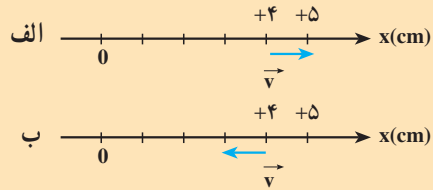
ب : در تمرین ۳ــ۱ دیدیم که $v = \pm\omega\sqrt{A^۲ - x^۲}$ ، بنابراین

$$v = \pm ۱۰\sqrt{(۰/۰۵)^۲ - (+۰/۰۴)^۲} = \pm ۰/۳ \text{ m/s}$$

علامت $(\pm)$ نشان‌دهنده‌ی این است که در مکان $x = +۴cm$ ممکن است سرعت در جهت محور x یا در خلاف جهت محور x باشد. یعنی در لحظه‌ای که $x = +۴cm$ است ممکن است متحرک در حال دور شدن از مبدأ باشد که در این صورت $v = +۰/۳ m/s$ است و یا درحال نزدیک شدن به مبدأ باشد که در این صورت $v = -۰/۳ m/s$. این وضعیت به ترتیب در شکل‌های ۳ــ۱۰ــ الف و ۳ــ۱۰ــ ب نشان داده شده است.

$$a = -\omega^۲ x = -۱۰۰ \times +۰/۰۴ = -۴ m/s^۲$$

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



شکل ۳ــ۱۰

۳ــ۴ــ انرژی مکانیکی نوسانگر (دستگاه جرم ــ فنر)

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

$$U_e = \frac{۱}{۲} kx^۲$$

با جایگذاری x از معادله‌ی ۳ــ۴ خواهیم داشت :

$$U_e = \frac{۱}{۲} kA^۲ \sin^۲(\omega t + \varphi_۰) \qquad (۱۵ــ۳)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۳ــ۵ می‌توان نوشت :

$$U_e = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \varphi_0) \qquad (۱۶ــ۳)$$

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

$$K = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \cos^2(\omega t + \varphi_0) \qquad (۱۷ــ۳)$$

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

$$E = U_e + K = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \varphi_0) + \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \cos^2(\omega t + \varphi_0)$$

$$E = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \left[\sin^2(\omega t + \varphi_0) + \cos^2(\omega t + \varphi_0) \right]$$

$$E = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \qquad (۱۸ــ۳)$$

از رابطه‌های ۳ــ۱۵ و ۳ــ۱۷ می‌توان دریافت که انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی نوسانگر وزنه‌ــفنر با زمان تغییر می‌کنند. یعنی در لحظه‌ای که نوسانگر در فاصله‌ی x از مبدأ قرار دارد بخشی از انرژی آن به صورت پتانسیل و بقیه به صورت جنبشی است. اما رابطه‌ی ۳ــ۱۸ نشان می‌دهد که انرژی مکانیکی نوسانگر مستقل از زمان است.

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

تمرین ۳ــ۲

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

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

تمرین ۳ــ۳

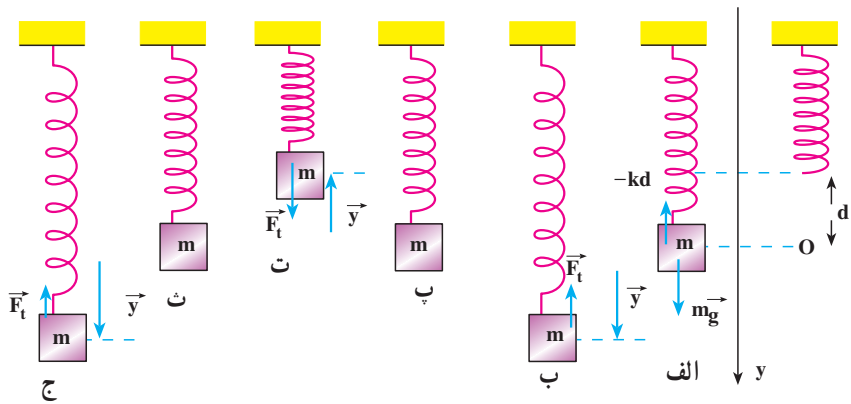
نمودار تغییرات U_e ، K و E را نسبت به مکان برای یک دوره‌ی نوسانگر ساده رسم کنید.

۳ــ۵ــ نوسان وزنه ــ فنر در راستای قائم

حرکت هماهنگ ساده‌ی وزنه ــ فنر در راستای قائم در شکل‌های ۳ــ۱۱ــ الف تا ج نشان داده شده است. در شکل الف وزنه‌ای به جرم m از فنر آویخته شده است و دستگاه وزنه ــ 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 دوّم نیوتون و با توجه به این‌که جهت محور y رو به پایین انتخاب شده است می‌توان نوشت :

$$mg - kd = 0$$

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



شکل ۳ــ۱۱

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

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

با جایگذاری مقدار d در این رابطه داریم :

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

بنابراین در این حالت نیز برآیند 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. درنتیجه مکان وزنه‌ی آویخته را نیز می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۳ــ۴ به‌دست آورد. روابط دیگری را نیز که در حالت نوسان افقی وزنه ــ فنر به‌دست آمد می‌توان برای نوسان وزنه ــ فنر قائم به‌کار برد.

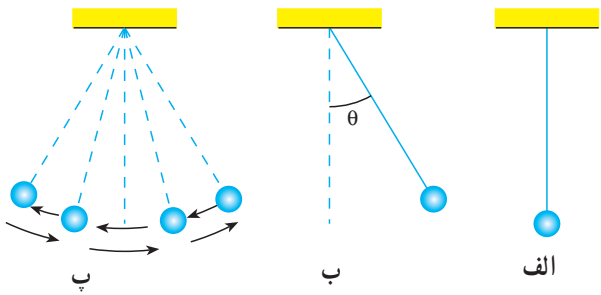
فعالیت ۳ــ۲

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 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ محاسبه نموده و نتایج حاصل را با یکدیگر مقایسه کنید. روش کارگروه و نتیجه‌ی آن را به کلاس گزارش کنید.

۳ــ۶ــ 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 ۳ــ۱۲ــ الف).

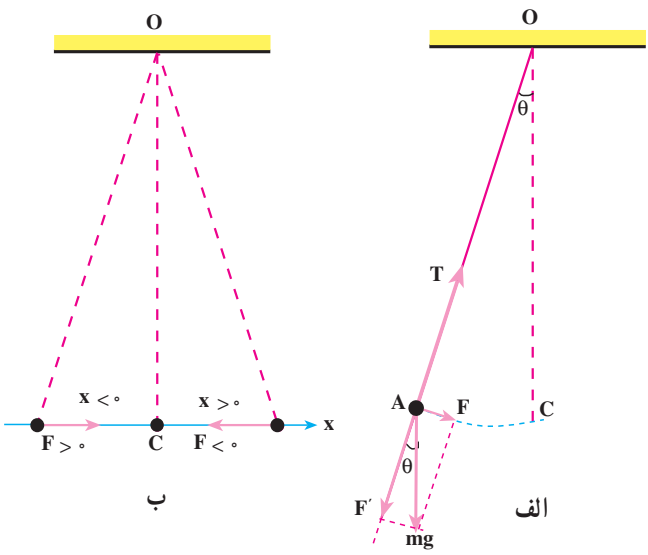
اگر وزنه را پس از خارج کردن آونگ از وضع تعادل رها کنیم (شکل ۳ــ۱۲ــ ب) حول وضع تعادلش نوسان می‌کند (شکل ۳ــ۱۲ــ پ). در نوسان آونگ، نیروی بازگرداننده مؤلفه‌ی نیروی وزن جسم در راستای مماس بر مسیر است.



شکل ۳ــ۱۲

اگر زاویه‌ی انحراف اولیه از وضع قائم (θ) به اندازه‌ی کافی کوچک باشد مسیر حرکت وزنه تقریباً یک پاره‌خط افقی است (شکل ۳ــ۱۳ــ ب). در این صورت، وزنه مانند وزنه‌ی متصل به فنر یک حرکت هماهنگ ساده با دامنه‌ی کم (حرکت نوسانی کم‌دامنه) انجام می‌دهد.

محاسبه‌ی دوره‌ی آونگ ساده‌ی کم‌دامنه: 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 ۳ــ۱۳ــ الف نشان می‌دهد نیروی کشش نخ در امتداد نخ است و در هر لحظه بر مسیر حرکت وزنه عمود است. بنابراین در راستای مماس بر مسیر، مؤلفه ندارد. 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.



شکل ۳ــ۱۳

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، $\sin\theta \approx \frac{x}{l}$ است و می‌توان نوشت :

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

همان‌گونه که در شکل ۳ــ۱۳ــ 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 ــ۲) پیروی می‌کند و حرکت آونگ ساده‌ی کم دامنه یک حرکت هماهنگ ساده است.

اکنون با توجه به قانون دوم نیوتون داریم :

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

$$a = -\frac{g}{l}x \qquad (۳ـ۱۹)$$

از رابطه‌ی ۳ـ۱۴ و ۳ـ۱۹ نتیجه می‌گیریم که :

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

و

$$T = ۲\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \qquad (۳ـ۲۰)$$

مثال ۳ـ۷

دوره و بسامد حرکت نوسانی کم‌دامنه‌ی یک آونگ ساده که طول آن ۴۰cm است چه اندازه است؟ $(g = ۱۰ m/s^{۲})$.

پاسخ

$$T = ۲\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

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

$$f = \frac{۱}{T} = ۰/۸ Hz$$

مثال ۳ـ۸

طول آونگ ساده‌ی کم‌دامنه چند سانتی‌متر باشد تا بتواند در هر دقیقه ۳۰ نوسان انجام دهد؟ $g = ۹/۸ m/s^{۲}$ و $\pi^{۲} = ۱۰$

پاسخ

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

$$T^{۲} = ۴\pi^{۲}\frac{l}{g}$$

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

$$l = ۰/۹۸ m = ۹۸ cm$$

فعالیت ۳ــ۳

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

۲ــ گلوله‌ی آونگی را که ساخته‌اید به ترتیب با چند گلوله‌ی دیگر تعویض کنید. سپس دوره‌ی هریک را با زاویه‌ی انحراف ۶ درجه اندازه بگیرید.

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

نتیجه‌ی فعالیت گروه را در کلاس به بحث بگذارید.

فعالیت ۳ــ۴

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

۳ــ۷ــ تشدید

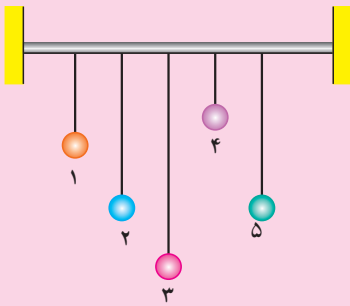
در بخش‌های قبل دیدیم که وقتی یک نوسانگر ساده نظیر آونگ و یا دستگاه وزنه ــ فنر را از وضع تعادل منحرف می‌کنیم و آن را برای نوسان آزاد می‌گذاریم، دستگاه حول وضع تعادل خود شروع به نوسان می‌کند. این حرکت نوسانی، **نوسان طبیعی یا آزاد دستگاه** نامیده می‌شود. بسامد (یا دوره‌ی) نوسان طبیعی از ویژگی‌های ساختاری نوسانگر است. مثلاً، بسامد آونگ ساده‌ی کم دامنه به طول آونگ (l) بستگی دارد. یعنی، اگر با دادن انرژی به‌یک آونگ دامنه‌ی نوسان آن را افزایش دهیم (به‌طوری 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 به‌تدریج کاهش می‌یابد و دستگاه پس از چند نوسان می‌ایستد. این نوسان‌ها را **نوسان میرا** می‌نامیم. ساده‌ترین مثال برای نوسان میرا آونگ ساده و نیز تاب بازی در بوستان‌ها است. 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 ۳ــ۵

مطابق شکل ۳ــ۱۴به یک میله‌ی افقی آونگ‌های ساده‌ای با طول‌های متفاوت ولی جرم یکسان بیاویزید، به‌طوری 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.



شکل ۳ــ۱۴

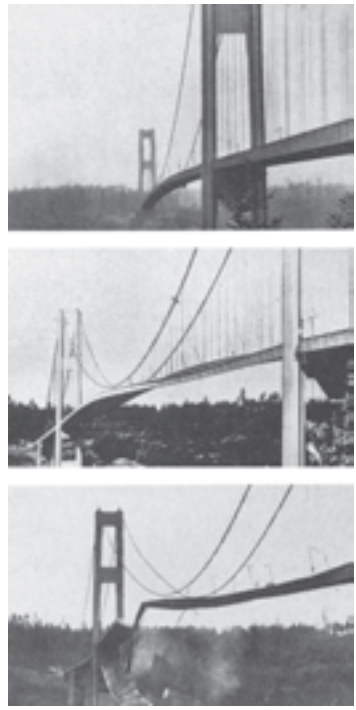
در این فعالیت با نوسان آونگ شماره‌ی ۵ آونگ‌های ۱ و ۳ و ۴ نیز به نوسان درمی‌آیند، اما پس از چند نوسان می‌ایستند. ولی آونگ شماره‌ی ۲ که دوره‌ی آن با آونگ شماره‌ی ۵ یکسان است، در مدت طولانی‌تری می‌ایستد. نتیجه این که :

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 ۳ــ 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 ۳ــ۱

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 ۳ــ۱۵ مراحل مختلف به نوسان درآمدن پل و تخریب آن را نشان می‌دهد.



شکل ۳ــ۱۵

تمرین‌های فصل سوم

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

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

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

ب : نوسانگر از مبدأ دور می‌شود.

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

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

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

۶ــ دامنه‌ی نوسان یک حرکت هماهنگ ساده $۳\times۱۰^{-۲}\,m$ و بسامد آن ۵ هرتز است. معادله‌ی این حرکت را در دو حالت زیر بنویسید و در هر یک از دو حالت نمودار مکان ــ 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.

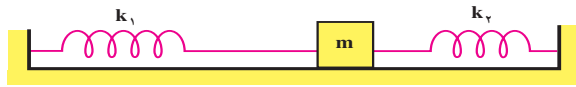
ب : در لحظه‌ی صفر مکان نوسانگر $+۳\times۱۰^{-۲}\,m$ است.

۷ــ وزنه‌ای به جرم m به دو فنر با ضریب ثابت $k_۱$ و $k_۲$ به دو روش مختلف که در شکل‌های ۳ــ۱۶ــ 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 ــ فنر از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود :

الف : $T = ۲\pi\sqrt{m\left(\frac{۱}{k_۱}+\frac{۱}{k_۲}\right)}$

ب : $T = ۲\pi\sqrt{\frac{m}{k_۱+k_۲}}$

الف



ب

شکل ۳ــ۱۶

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

$$T = ۲\pi\sqrt{\frac{d}{g}}$$

۹ــ وزنه‌ای به جرم ۴۰۰g به فنر سبکی آویخته شده است. اگر وزنه را به اندازه‌ی ۳cm از وضع تعادل خارج و رها کنیم با دوره‌ی $T = ۰/۶۲۸s$ به نوسان درمی‌آید. $(g = ۱۰m/s^۲)$

الف : ثابت فنر، اندازه و جهت سرعت نوسانگر را وقتی وزنه در ۱/۵ سانتی‌متری بالای وضع تعادل قرار دارد و سرعت آن رو به افزایش است تعیین کنید.

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

۱۰ــ 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 ۲۰ سانتی‌متر پایین رفته و برمی‌گردد و با حرکت هماهنگ ساده به نوسان ادامه می‌دهد. دامنه، دوره و سرعت آن‌را هنگام عبور از وضع تعادل محاسبه کنید.

۱۱ــ معادله‌ی حرکت هماهنگ ساده‌ای را بنویسید که دامنه‌ی آن ۴cm و دوره‌ی آن ۰/۴s و در لحظه‌ی صفر در $x = +۲cm$ قرار دارد و سرعت آن منفی است. نمودار مکان ــ زمان این حرکت را در یک دوره رسم کنید.

۱۲ــ معادله‌ی نیروی وارد بر یک نوسانگر (وزنه ــ فنر) به جرم ۰/۵kg که در امتداد قائم با دامنه‌ی A نوسان می‌کند در SI به‌صورت $F = -۲۰۰y$ است. سرعت این نوسانگر هنگام عبور از وضع تعادل ۱۰m/s است. در لحظه‌ی صفر $y = -\frac{\sqrt{۲}}{۲}A$ و سرعت آن در جهت مثبت است. شتاب حرکت را در لحظه‌ی $t = \frac{T}{۴}s$ حساب کنید (T دوره‌ی حرکت است).

۱۳ــ معادله‌ی حرکت هماهنگ ساده‌ی یک نوسانگر در SI به‌صورت $x = ۰/۰۵\sin(۲۰\pi t + \frac{۲\pi}{۳})$ است.

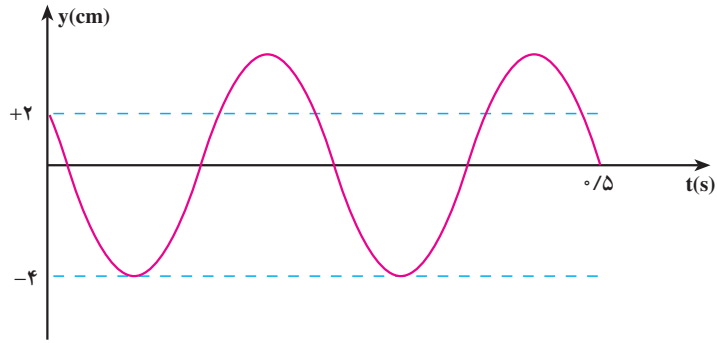
الف : در چه زمانی، پس از لحظه‌ی صفر، برای اولین بار سرعت نوسانگر به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد؟

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

۱۴ــ نمودار مکان ــ زمان نوسانگر مطابق شکل ۳ــ۱۷ است :

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

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



شکل ۳ــ۱۷

۱۵ــ پیستون‌های یک اتومبیل ۴ سیلندر در حالت خلاص تقریباً حرکت نوسانی ساده دارند. اگر دامنه‌ی نوسان آن‌ها ۵۰ میلی‌متر و بسامد آن ۱۱۰ هرتز باشد، کمیت‌های زیر را به دست آورید.

الف : بیشینه‌ی سرعت پیستون‌ها

ب : بیشینه‌ی شتاب نوسان آن‌ها

٤

موج‌های مکانیکی (۱)

توماس یانگ
(۱۷۷۳ـ۱۸۲۹م)

موج های مکانیکی ۱

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

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

نوع دیگری از موج‌ها که می‌توانند در محیط‌های غیرمادی (خلأ) نیز منتشر شوند، **موج‌های الکترومغناطیسی** نامیده می‌شوند. برای مثال هم‌اکنون که در حال خواندن این نوشته‌ها هستید، اطلاعات را به صورت نوری که از صفحه‌ی کتاب باز می‌تابد دریافت می‌کنید. نور نوعی موج الکترومغناطیسی است. در فصل دوم فیزیک (۲) با ماهیت و ویژگی‌های این گونه موج‌ها آشنا می‌شوید. هرچند ماهیت موج‌های مکانیکی و الکترومغناطیسی با یک‌دیگر تفاوت دارند، اما رفتار و ویژگی‌های آن‌ها از جهت‌های زیادی، مشابه یک‌دیگر است. برای مثال هر دو در حین انتشار می‌توانند انرژی را از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر منتقل کنند.

۴ــ۱ــ موج

پیش از این با نیروی کشسانی فنر آشنا شدیم. اگر در یک فنر تغییر طولی ایجاد کنیم، بین هر دو حلقه‌ی مجاور فنر نیروی کشسانی به‌وجود می‌آید که می‌خواهد فنر را به حالت اولیه برگرداند. به فنر یا هر محیط دیگری که مانند فنر عمل می‌کند محیط کشسان گفته می‌شود. پس محیط کشسان محیطی است که وقتی در آن تغییر شکلی ایجاد شود نیروهای کشسان ایجاد شده بین اجزای محیط، تمایل

دارند محیط را به حالت اول خود برگردانند. بیش‌تر جامدها، مایع‌ها و گازها محیط‌های کشسان هستند. مثلاً اگر یک تیغه‌ی فنری را خم کرده و رها کنیم، به حالت اول برمی‌گردد. اگر توپی را که بر سطح آرام آب درون تشتکی قرار دارد، کمی بیش‌تر در آب فرو برده و رها کنیم، به حالت اول برمی‌گردد. به همین ترتیب اگر انتهای سُرنگی را با دست مسدود کرده و پیستون را به درون آن فرو ببریم و رها کنیم، پیستون به حالت اول برمی‌گردد. در همه‌ی این مثال‌ها، تیغه‌ی فنری، آب و هوای درون سرنگ محیط‌هایی کشسان هستند.

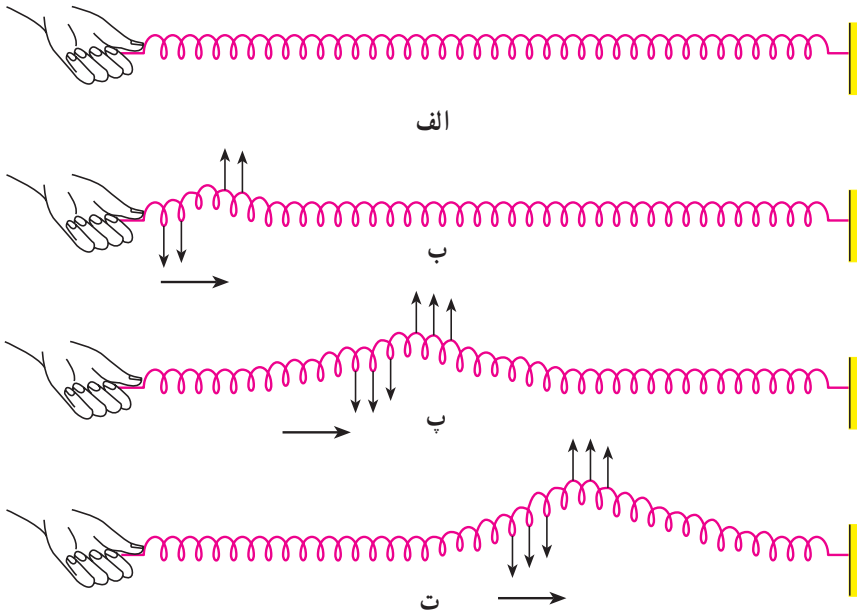
فعالیت ۴ــ۱

طنابی را مطابق شکل ۴ــ۱کشیده و بین دو نقطه‌ی A و B، محکم کنید. اکنون با دست جزیی از طناب را پایین بکشید و رها کنید . به‌این 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 ۴ــ۱

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

مثلاً فنری را درنظر بگیرید که روی یک سطح افقی صاف به حال سکون قرار دارد (شکل ۴ــ۲ــالف). اگر مطابق شکل ۴ــ۲ــب، چند حلقه‌ی فنر را به یک سمت بکشیم و تغییر شکلی در آن ایجاد کرده و آن را رهایش کنیم، می‌بینیم که حلقه‌های جابه‌جا شده به‌جای اول برگشته و حلقه‌های مجاور آن از وضع تعادل خارج می‌شوند و همان شکل حلقه‌های قبلی را به خود می‌گیرند. این تغییر شکل، جزء به جزء در طول فنر منتقل می‌شود و تا آخر در آن پیش می‌رود (شکل‌های ۴ــ۲ــپ و ت) علت انتقال تغییر شکل، وجود نیروی بازگرداننده بین حلقه‌های فنر است.



شکل ۴ــ۲

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

فعالیت ۴ــ۲

سنگ کوچکی را از بالای سطح آبِ 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 درحال تعادل است با حرکت هماهنگ ساده به نوسان درآوریم، با نوسان آن جزء، تپ‌های متوالی در محیط تولید و به‌دنبال یک‌دیگر، منتشر می‌شوند. چنین موجی را، **موج سینوسی** می‌نامیم. چشمه‌ی موج سینوسی، نوسانگری است که

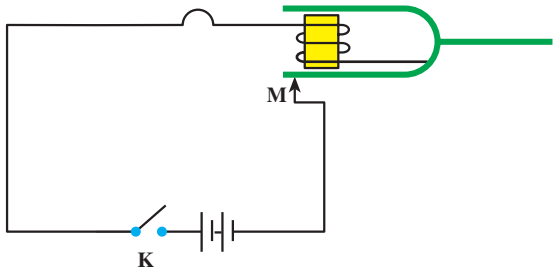
می‌تواند، با بسامد (یا دوره) و دامنه‌ی ثابتی، حرکت هماهنگ ساده انجام دهد. دیاپازون یکی از وسیله‌هایی است که به‌عنوان چشمه‌ی موج در آزمایش‌ها به‌کار برده می‌شود.

مطالعه‌ی آزاد

نوسان دیاپازون با دامنه‌ی ثابت

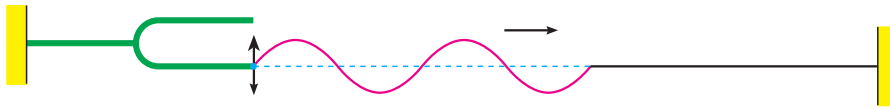
شکل ۴ــ۳

دیاپازون، دوشاخه‌ای مانند شکل ۴ــ۳ 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 دیاپازون بعد از تعدادی نوسان از حرکت باز می‌ایستد. برای آن که نوسان‌های دیاپازون ادامه یابد، می‌توان آن را در مداری الکتریکی مانند شکل ۴ــ۴ قرار داد. در این مدار، توسط آهنربای الکتریکی، نیروی مغناطیسی‌ای به‌طور دوره‌ای، بر شاخه‌های دیاپازون (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 دیاپازون، جذب آهنربای الکتریکی می‌شوند. در نتیجه در نقطه‌ی M، شاخه‌ی دیاپازون از مدار جدا شده و جریان الکتریکی نیز قطع می‌شود. با قطع جریان، خاصیت مغناطیسی ازبین می‌رود و شاخه‌های دیاپازون به‌جای اول برمی‌گردند و دوباره اتصال برقرار می‌شود و این عمل، ادامه می‌یابد. به‌این ترتیب نوسان‌های دیاپازون پایدار می‌ماند.



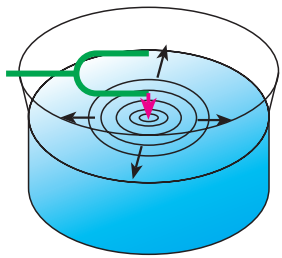
شکل ۴ــ۴

شکل ۴ــ۵ ــ الف تا پ ایجاد و انتشار موج سینوسی را در طناب، فنر و سطح آب نشان می‌دهد.



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

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



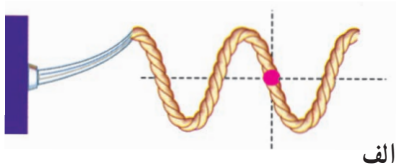
پ ــ موج‌های ایجاد شده در سطح آب به‌صورت دایره‌های متوالی برجسته و فرورفته منتشر می‌شوند.

شکل ۴ــ ۵

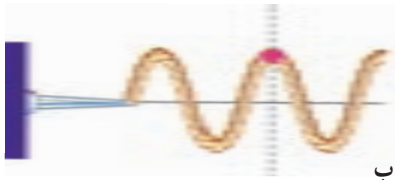
موج‌های ایجاد شده در طناب، فنر و سطح آب، نمونه‌هایی از موج‌های مکانیکی‌اند. این موج‌ها در محیط‌های مادّی کشسان تولید و منتشر می‌شوند.

بسامد موج: وقتی یک چشمه‌ی موج با بسامد f 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 بسامدِ چشمه‌ی موج به نوسان درمی‌آیند.

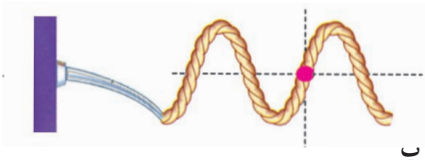
شکل ۴ــ۶ ــ الف تا ت چگونگی نوسان یک ذره‌ی محیط را، که با رنگ قرمز مشخص شده است، ضمن انتشار موج نشان می‌دهد.



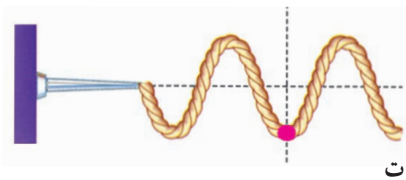
الف



ب



پ



ت

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

انتشار موج: شکل ۴ــ۷ حالت‌های مختلف طنابی را نشان می‌دهد که در آن موجی سینوسی منتشر می‌شود. در این شکل‌ها، یک 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 قله‌ی 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 :

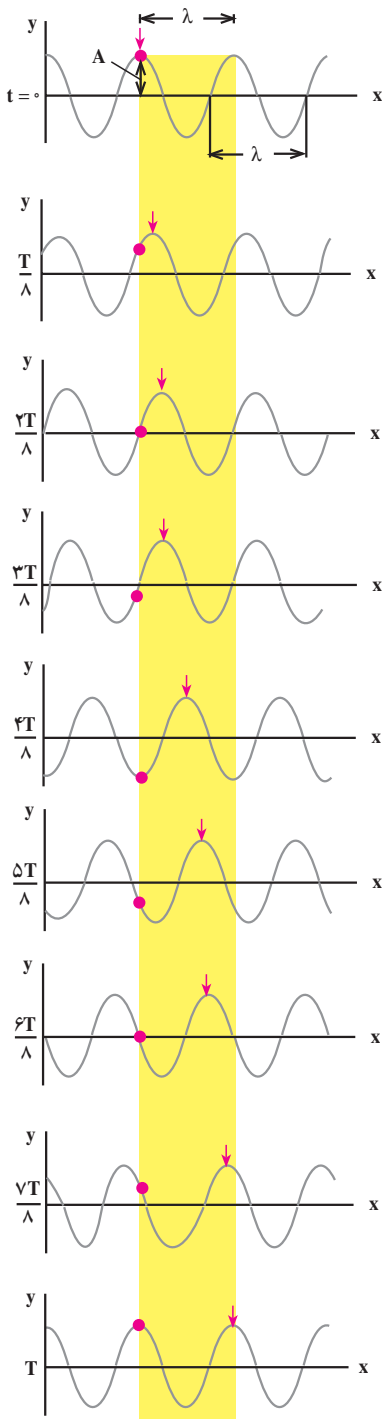
$$v = \frac{x}{t} \qquad (۴ــ۱)$$

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 به‌جرم واحد طول آن بستگی دارد. سرعت انتشار موج عرضی (درهمین فصل با موج‌های طولی و عرضی آشنا می‌شویم) در طناب (و یا در تار) یکنواختی به جرم m و طول L از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

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

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

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



شکل ۴ــ۷ــ انتشار موج در طناب

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

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \qquad (۴ـ۲ـ ب)$$

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

مثال ۴ـ۱

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

پاسخ

ابتدا جرم واحد طول ریسمان را محاسبه می‌کنیم :

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

$$\mu = \frac{۰/۱}{۱} = ۰/۱\,kg/m$$

اکنون به کمک رابطه‌ی ۴ـ ۲ سرعت انتشار را به‌دست می‌آوریم :

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

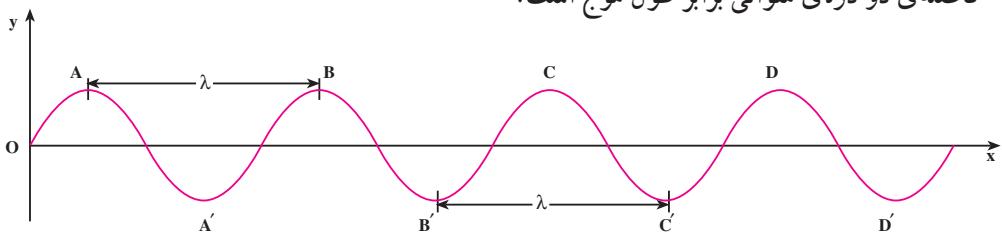
$$v = \sqrt{\frac{۴۰}{۰/۱}} = ۲۰\,m/s$$

فعالیت ۴ـ۳

در فعالیت ۴ـ۱، 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 به‌بحث بگذارید.

طول موج: به حالت‌های مختلف شکل ۴ــ۷ توجه کنید. در مدتی که یک نقطه‌ی محیط (مثلاً نقطه‌ی واقع در قلّه‌ی موج) یک نوسان انجام می‌دهد، یعنی در مدت یک دوره T، قله‌ی 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.

شکل ۴ــ 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 ۴ــ ۸

بار دیگر به شکل ۴ــ 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 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 هم فاز را با Δx نشان دهیم داریم :

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

اکنون به دو نقطه‌ی متوالی طناب در شکل ۴ــ 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 :

$$\Delta x = (2n-1)\frac{\lambda}{2} \qquad (4_4)$$

پرسش ۴ــ۱

روی شکل ۴ ــ ۸ 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 ۴ــ۱ داریم :

$$\lambda = vT \qquad (4_5)$$

چون دوره و بسامد، عکس یک‌دیگراند خواهیم داشت :

$$\lambda = vT = \frac{v}{f} \qquad (4_6)$$

مثال ۴ــ۲

نیروی کشش طنابی ۱۲N و جرم واحد طول آن ۳۰g/m است. الف : اگر سر این طناب را با دیاپازونی که بسامد آن ۱۰۰Hz است، عمود بر راستای طناب به نوسان درآوریم، طول موج در طناب را پیدا کنید. ب : اگر نیروی کشش طناب را نصف کنیم، بسامد و طول موج در طناب را حساب کنید.

پاسخ

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

الف : با استفاده از رابطه‌ی ۴ــ۲ داریم :

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

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

طول موج را از رابطه‌ی ۴ــ ۶ محاسبه می‌کنیم :

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

$$\lambda = \frac{۲۰}{۱۰۰} = ۰/۲ m$$

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

$$f_۲ = f_۱ = ۱۰۰ Hz$$

از رابطه‌ی ۴ــ۲ و با توجه به این که $\mu_۱ = \mu_۲$ است داریم :

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

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

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

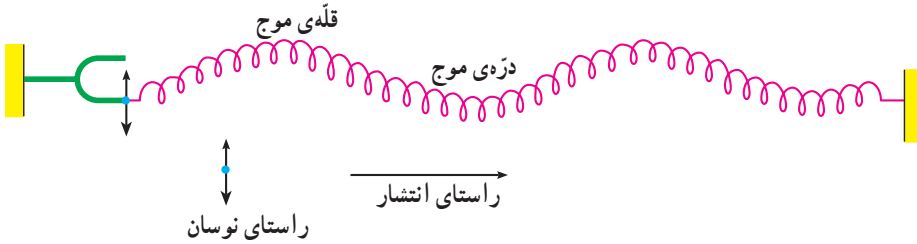
$$\frac{\lambda_۲}{\lambda_۱} = \frac{v_۲}{v_۱} = \frac{\sqrt{۲}}{۲}$$

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

۴ــ۲ــ موج‌های عرضی ــ موج‌های طولی

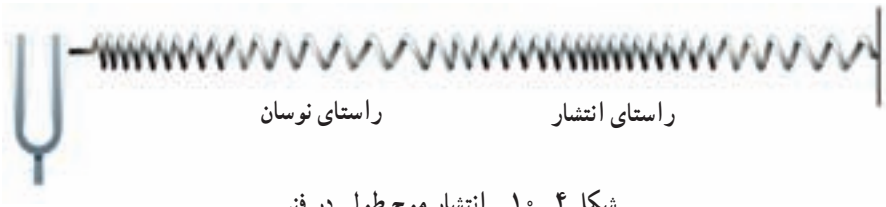
گفتیم وقتی یک چشمه‌ی موج با بسامد f در محیطی کشسان نوسان می‌کند ذره‌های مجاور خود را نیز با همان بسامد به نوسان درمی‌آورد و بدین ترتیب همه‌ی ذرات محیط به نوسان درمی‌آیند. راستای نوسان این ذره‌ها، ممکن است عمود بر راستای انتشار موج و یا موازی با آن باشد.

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 ۴ــ۹ عرضی‌اند. موج عرضی در فنر و یا در طناب با قلّه‌ها و درّه‌ها قابل تشخیص است.



شکل ۴ــ۹ــ 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 ۴ــ۱۰ 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 ۴ــ۱۰ــ 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 پی در پی می‌توان تشخیص داد. در فنر می‌توان هر دو نوع موج عرضی و طولی را ایجاد کرد.

۴ــ۳ــ تابع موج

وقتی یک موج در یک محیط همگن در حال انتشار است، شکل موج، در ضمن انتشار از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر، تغییر نمی‌کند. مثلاً اگر شکل یک تپ در یک لحظه (مثلاً در $t = 0$) و در نقطه‌ی A به صورت شکل ۴ــ۱۱ــالف 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 ۴ــ۱۱ــ ب). به بیان دیگر، وضعیت نقطه‌ی B در لحظه‌ی t، مانند وضعیت A در Δt ثانیه قبل از آن است.

ب　　الف

شکل ۴ــ۱۱

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 :

$$u = A\sin\omega t = A\sin\frac{2\pi}{T}t \qquad (۷ــ۴)$$

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 «$t - \frac{x}{v}$» به‌جای t در رابطه‌ی ۴ــ۷ مشخص می‌شود. بنابراین خواهیم داشت :

$$u = A\sin\omega(t - \frac{x}{v}) = A\sin(\omega t - \frac{\omega x}{v}) \qquad (۸ــ۴)$$

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

$$u = A\sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x) \qquad (۹ــ۴)$$

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

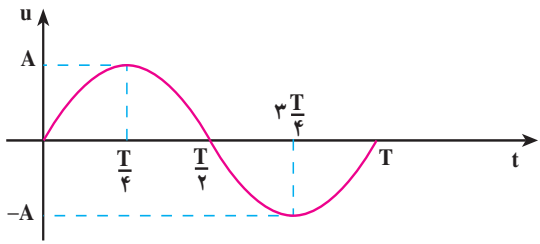
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} \qquad (۱۰ــ۴)$$

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

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

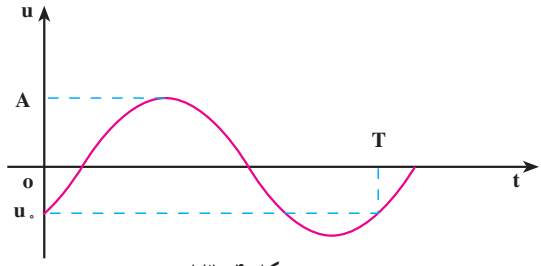
رابطه‌ی ۴ــ۱۱ وضعیت نوسانی نقطه‌ای از محیط را که به فاصله‌ی x از مبدأ مختصات (چشمه‌ی موج) واقع است، در لحظه‌ی t نشان می‌دهد. به این رابطه **تابع موج** می‌گوییم.

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، در 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 برحسب زمان (t) برای هریک 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 ($x = ۰$) به‌صورت $u = A\sin\frac{۲\pi}{T}t$ و نمودار آن نیز به‌صورت زیر است :



شکل ۴ــ۱۲

تابع u برای یک ذره که به فاصله‌ی $x = d$ از چشمه‌ی موج واقع است، $u = A\sin(\frac{۲\pi}{T}t - kd)$ خواهد بود. مقدار $-kd = \varphi_۰$ ، فاز اولیه‌ی این نقطه است. نمودار u برای این نقطه در شکل ۴ــ۱۳ آمده است. توجه کنید که شروع نمودار به $\varphi_۰$ و یا d بستگی دارد.



شکل ۴ــ۱۳

مثال ۴ــ۳

یک چشمه‌ی موج با بسامد ۱۰۰Hz نوسان‌هایی با دامنه‌ی ۵mm ایجاد می‌کند که با سرعت ۱۰ m/s در امتداد محور x منتشر می‌شوند. طول موج و عدد موج را محاسبه کنید و تابع موج آن را نیز بنویسید.

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی ۴ــ۶ داریم :

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

$$\lambda = \frac{۱۰}{۱۰۰} = ۰/۱\,m$$

با توجه به رابطه‌ی ۴ــ۱۰ خواهیم داشت :

$$k = \frac{۲\pi}{\lambda}$$

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

با استفاده از رابطه‌ی ۴ــ۱۱ داریم :

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

$$u = ۵\times۱۰^{-۳}\sin(۲۰۰\pi t - ۲۰\pi x) = ۵\times۱۰^{-۳}\sin ۲۰\pi(۱۰t - x)$$

تمرین ۴ــ۱

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

اگر موج عرضی باشد، نوسان 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 :

$$u_y = A\sin(\omega t - kx) \qquad (۴ــ۱۲)$$

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

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

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

$$u_x = A\sin(\omega t + kx) \qquad (۱۴_۴)$$

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

تمرین ۴ــ۲

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

تمرین ۴ــ۳

نشان دهید که :

الف : اختلاف فاز دو نقطه‌ی هم‌فاز محیط مضرب زوجی از π است.

ب : اختلاف فاز دو نقطه‌ی محیط که در فاز مخالف‌اند مضرب فردی از π است.

مثال ۴ــ۴

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

الف : تابع موج ایجاد شده در طناب را بنویسید.

ب : معادله‌ی نوسان نقطه‌ی M از طناب را که به فاصله‌ی ۲۵cm از سر طناب (نقطه‌ی O) واقع است بنویسید.

پاسخ

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

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

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

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

با استفاده از رابطه‌ی ۴ــ۱۲ داریم :

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

$$u_y = ۵\times۱۰^{-۳}\sin(۱۰۰\pi t - \pi x)$$

ب : برای نقطه‌ی مزبور داریم :

$$x = ۰/۲۵\,m = \frac{۱}{۴}\,m$$

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

$$u_M = ۵\times۱۰^{-۳}\sin(۱۰۰\pi t - \frac{\pi}{۴})$$

تمرین ۴ــ۴

چشمه‌ی موجی نوسان‌هایی با بسامد ۲۰Hz و دامنه‌ی ۵cm در یک محیط کشسان و در راستای محور y انجام می‌دهد. اگر این نوسان‌ها در خلاف جهت محور x و با سرعت ۱۰m/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 درنظر 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 ۴ــ۱۲، به‌صورت زیر است ؛

$$u_A = A\sin(\omega t - \frac{۲\pi}{\lambda}x_A)$$

$$u_B = A\sin(\omega t - \frac{۲\pi}{\lambda}x_B)$$

اختلاف فاز این دو نقطه برابر است با :

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

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

$$|\Delta\varphi| = \frac{2\pi}{\lambda}|\Delta x| = k|\Delta x| \qquad (۱۵_۴)$$

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

$$\Delta x = 1\,m$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} = k \qquad (۱۶_۴)$$

رابطه‌ی ۴ــ۱۶ 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 ۴ــ۵

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

پاسخ

ابتدا بسامد نوسان‌ها و سپس طول موج را محاسبه می‌کنیم :

$$\omega = 2\pi f$$

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

$$f = 25\,Hz$$

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

$$\lambda = \frac{20}{25} = 0/8\,m = 80\,cm$$

اکنون اندازه‌ی اختلاف فاز دو نقطه را محاسبه می‌کنیم :

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

$$\Delta\varphi = |0/7\pi - 0/4\pi| = 0/3\pi \text{rad}$$

با استفاده از رابطه‌ی ۴ــ۱۵ داریم :

$$\frac{3\pi}{10} = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta x = \frac{2\pi}{80}\Delta x$$

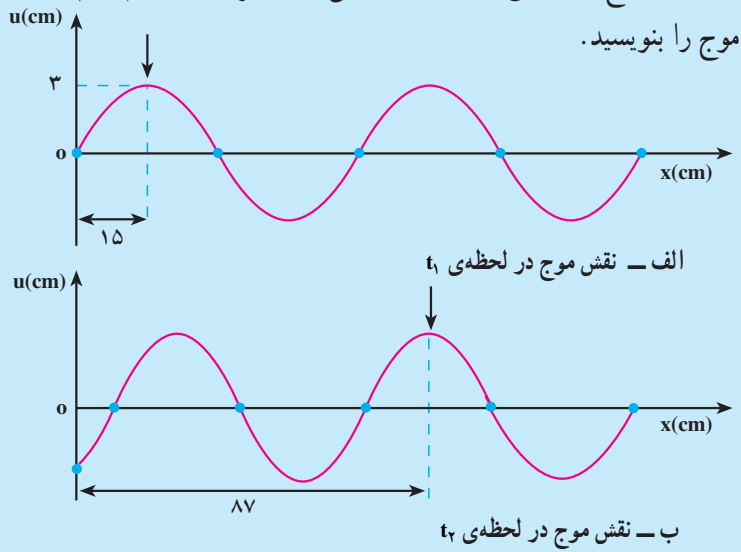
$$\Delta x = AB = 12\,\text{cm}$$

فعالیت ۴ــ۴

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

تمرین ۴ــ۵

شکل‌های ۴ــ ۱۴ــ 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 درحال انتشار است. علامت پیکان، یک قلّه‌ی موج را در این دو لحظه نشان می‌دهد. اگر $t_2 - t_1 = 0/06\,s$ باشد، تابع این موج را بنویسید.



شکل ۴ــ۱۴

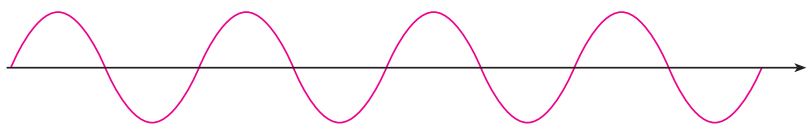
تمرین‌های فصل چهارم

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

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

۳ــ 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؟

۴ــ شکل ۴ــ۱۵، 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 ــ۱۵

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

۶ــ دو موج با بسامدهای ۵۰ Hz و ۷۵ 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؟

۷ــ تابع یک موج در یک محیط، در SI، به‌صورت $u_y = ۲\times۱۰^{-۲}\sin(۵۰\pi t - \frac{\pi}{۴}x)$ است.

الف : این موج طولی است یا عرضی؟

ب : دامنه، بسامد، طول موج و سرعت انتشار را به‌دست آورید.

پ : معادله‌ی نوسان نقطه‌های واقع در $x = \pm ۰/۵ m$ را تعیین کنید.

۸ــ چشمه‌ی موجی با بسامد ۱۰ Hz در یک محیط که سرعت انتشار موج در آن ۱۰۰m/s است، نوسان‌هایی طولی ایجاد می‌کند. اگر دامنه‌ی نوسان‌ها ۴ cm باشد، تابع موجی را که در راستای محور y منتشر می‌شود بنویسید.

۹ــ موجی در یک محیط در حال انتشار است. معادله‌ی نوسان دو نقطه‌ی A و B از این محیط، که در یک جهت انتشار واقع‌اند، به‌صورت زیر است :

$$u_A = ۰/۲\sin(۵۰\pi t - \frac{\pi}{۸})$$

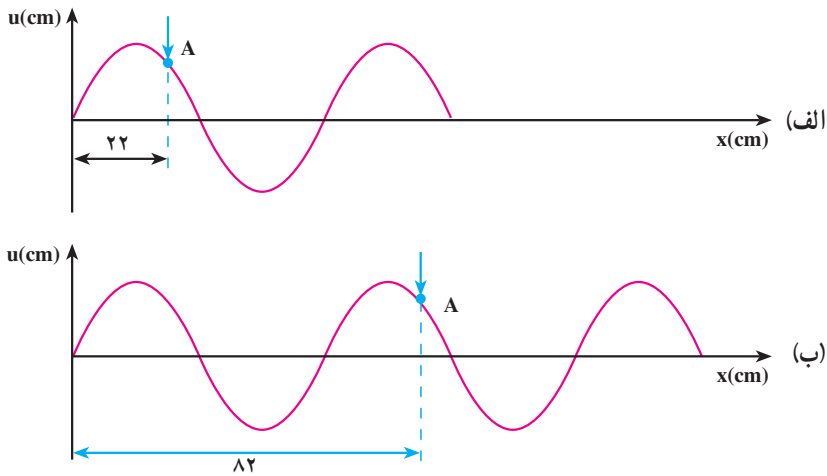
$$u_B = ۰/۲\sin(۵۰\pi t - \frac{\pi}{۱۲})$$

فاصله‌ی این دو نقطه را از یکدیگر، به دست آورید. سرعت انتشار موج در محیط را ۲۰۰m/s فرض کنید.

۱۰ــ شکل‌های ۴ــ۱۶ ــ الف و ب، نقش یک موج را در دو لحظه‌ی $t_۱$ و $t_۲$ نشان می‌دهد که در امتداد محور x منتشر می‌شود. علامت پیکان، یک نقطه از موج را در این دو لحظه نشان می‌دهد. موردهای زیر را محاسبه کنید :

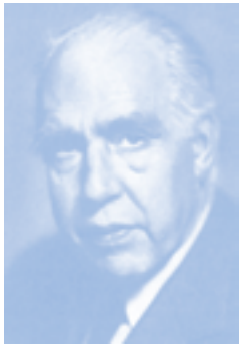
الف : این موج طولی است یا عرضی و عدد موج آن چه اندازه است؟

ب : اگر بسامد نوسان‌ها ۲۵ Hz باشد، $\Delta t = t_۲ - t_۱$ چند ثانیه است؟



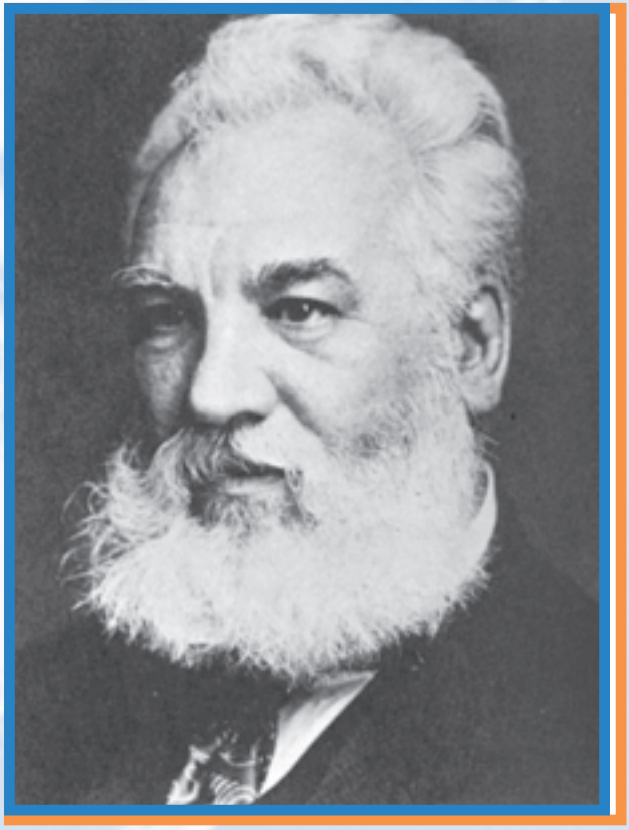
شکل ۴ــ۱۶

فیزیک ۲



۱

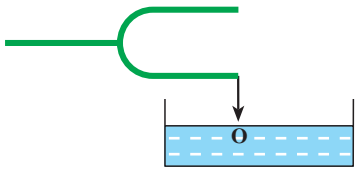
موج‌های مکانیکی (۲)



الکساندر گراهام بل
(۱۹۲۲ـ۱۸۴۷م)

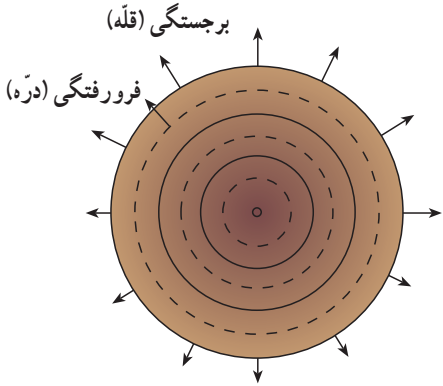
موج های مکانیکی ۲

۱ــ۱ــ انتشار موج در دو و سه بعد



شکل ۱ــ۱

اگر مطابق شکل ۱ــ 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.

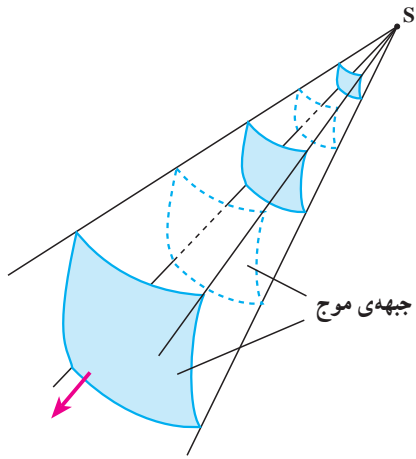


شکل ۱ــ۲

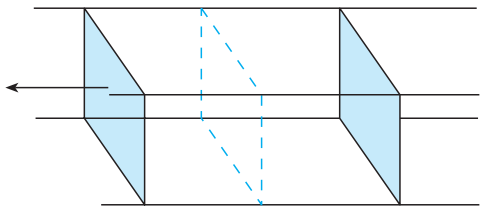
در شکل ۱ــ۲ دو دسته دایره می‌بینید. دایره‌های توپر، برجستگی‌ها و دایره‌های خط‌چین، فرورفتگی‌ها را در سطح آب نشان می‌دهند. به این دایره‌های درحال انتشار **جبهه‌ی موج** می‌گوییم و آن را چنین تعریف می‌کنیم : **جبهه‌ی موج مکان هندسی نقطه‌هایی از محیط است که در آن نقطه‌ها تابع موج دارای فاز یکسانی است.** بنابراین، اختلاف فاز نقطه‌های واقع بر یک جبهه‌ی موج همواره برابر صفر است.

موج‌های سطح آب، نمونه‌ای از انتشار موج در دو بُعد است. موج‌هایی نیز هستند که در سه بعد منتشر می‌شوند ؛ انتشار موج‌های صوتی و انتشار موج‌های الکترومغناطیسی، نمونه‌هایی از انتشار موج در سه بُعداند. اگر یک چشمه‌ی موج نقطه‌ای را در یک محیط همسانگرد سه‌بُعدی قرار دهیم (مثلاً بلندگوی کوچکی در هوای درون اتاق)، جبهه‌ی موج به‌صورت 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 به‌تدریج افزایش می‌یابد. به این موج‌ها، موج کروی می‌گوییم. شکل ۱ــ۳ قسمت‌های کوچکی از سطح موج‌ها را که از چشمه‌ی موج نقطه‌ای S گسیل می‌شوند نشان می‌دهد.

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



شکل ۱ــ۳ــ موج‌های کروی



شکل ۱ــ۴ــ 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 به‌دست شما می‌رسد، ضربه‌ی موج می‌خواهد طناب را از دست شما خارج کند.

در فیزیک ۱دیدیم که هر نوسانگر دارای انرژی است. از طرف دیگر می‌دانیم موج به‌هر 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 :

$$E = \frac{۱}{۲} m\omega^{۲} A^{۲}$$

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

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

چون هر ذره‌ی محیط، حرکت نوسانی ساده با بسامد موج انجام می‌دهد ؛ بنابراین، انرژی مکانیکی هر ذره نیز از رابطه‌ی ۱ــ۱ محاسبه می‌شود.

رابطه‌ی ۱ــ۱ 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 قلّه‌ی موج به یک ذره از محیط می‌رسد، تمام انرژی ذره به‌صورت انرژی پتانسیل است، و وقتی که ذره از وضع تعادل می‌گذرد، تمام انرژی آن به‌صورت 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؟

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 و ثانیاً اصطکاک ناچیز است و انرژی موج هم تلف نمی‌شود.

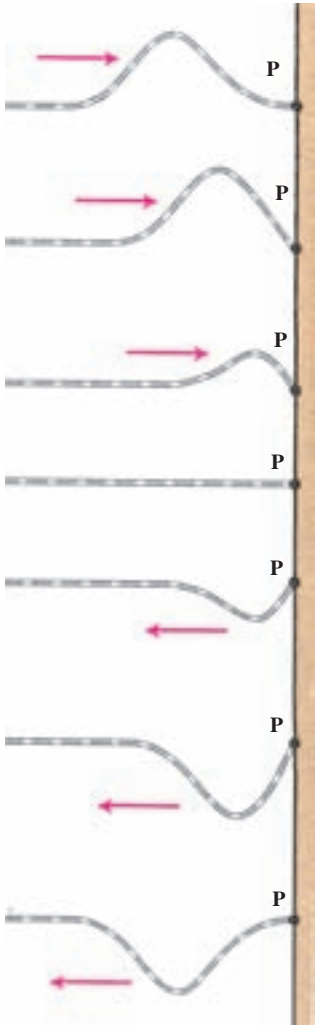
نتیجه‌ی به‌دست آمده در این مورد در مورد دیگر موج‌های مکانیکی، نظیر موج‌های صوتی و نیز موج‌های الکترومغناطیسی، درست است.

برای این بررسی، فرض می‌کنیم که یک تپ روی یک طناب در حال انتشار است. بازتاب تپ (موج) از انتهای طناب به نحوه‌ی اتصال انتهای طناب بستگی دارد. انتهای طناب، ممکن است محکم به یک دیوار ثابت شده باشد. در این صورت، انتهای طناب را **انتهای ثابت یا بسته** می‌نامیم (شکل ۱ــ۵ ــ الف). همچنین ممکن است، انتهای طناب به حلقه‌ی بسیار سبکی وصل شده باشد و بتواند روی میله‌ی قائمی بدون اصطکاک، بالا و پایین برود (شکل ۱ــ۵ــ ب). در این حالت، انتهای طناب **انتهای آزاد** نامیده می‌شود. بدین ترتیب، انتهای ثابت نمی‌تواند نوسان کند، درصورتی که انتهای آزاد برای نوسان آزاد است.

ب ــ انتهای آزاد

الف ــ انتهای ثابت

شکل ۱ــ ۵

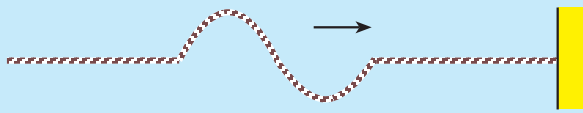


بازتاب از انتهای ثابت: وقتی تپ مطابق شکل ۱ــ۶ به انتهای ثابت P می‌رسد، جزء کوچکی از طناب که در مجاورت نقطه‌ی P قرار دارد، به آن نیرویی رو به بالا وارد می‌کند تا نقطه‌ی P را به نوسان وادارد. نقطه‌ی P ثابت است و نمی‌تواند جابه‌جا شود، بنا به قانون سوم نیوتون، به طناب نیرویی رو به پایین وارد می‌کند. این 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. در واقع در این بازتاب، تپ مانند یک چشمه‌ی موج عمل می‌کند و یک تپ در خلاف جهت، تپ تابشی (فرودی) در طناب ایجاد می‌کند که برجستگی را به فرورفتگی و فرورفتگی را به برجستگی تبدیل می‌کند (به حالت‌های مختلف شکل ۱ــ۶ توجه کنید). تپ باز تابیده، در خلاف جهت تپ تابشی، روی طناب منتشر می‌شود.

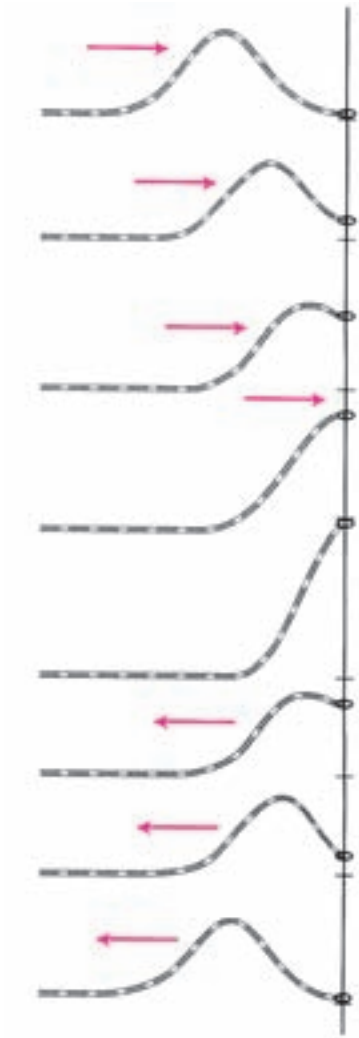
شکل ۱ــ۶ــ انتهای طناب ثابت است.

تمرین ۱ــ۱

در شکل ۱ــ۷ تپی روی طنابی در حال انتشار است. شکل تپ بازتاب آن را از انتهای ثابت طناب، رسم کنید.



شکل ۱ــ۷

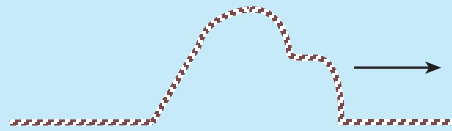


بازتاب از انتهای آزاد: اگر انتهای طناب آزاد باشد، وقتی تپ به آن می‌رسد، طناب را در جهت خود به‌حرکت درمی‌آورد. در شکل ۱ــ۸ تپ تابشی، انتهای طناب را بالا می‌کشد. در این حالت همان طور که شکل نشان می‌دهد، انتهای طناب به قلّه‌ای می‌رسد که جابه‌جایی آن از وضع تعادل، دو برابر جابه‌جایی سایر نقطه‌های طناب است. 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 به‌جای اول برگردانیم. بنابراین، در انتهای آزاد، برجستگی به‌صورت برجستگی، و فرورفتگی به‌صورت فرورفتگی، بازتاب می‌شود.

شکل ۱ــ۸ ــ انتهای طناب آزاد است.

تمرین ۱ــ۲

تپی مانند شکل ۱ــ۹ در طنابی در حال انتشار است. شکل تپ بازتابی آن را از انتهای آزاد طناب، رسم کنید.



شکل ۱ــ۹

۱ــ۲ــ 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 را بشنود، اما صداهای مختلف همگی و با هم در هوا منتشر می‌شوند و انتشار یک صوت مانع انتشار صوت‌های دیگر نمی‌شود.

به شکل ۱ــ۱۰ نگاه کنید، در سطح آب دریاچه، موج‌هایی هم‌زمان در حال انتشارند. این موج‌ها، هر یک به‌طور مستقل به انتشار خود ادامه می‌دهند.

شکل ۱ــ۱۰

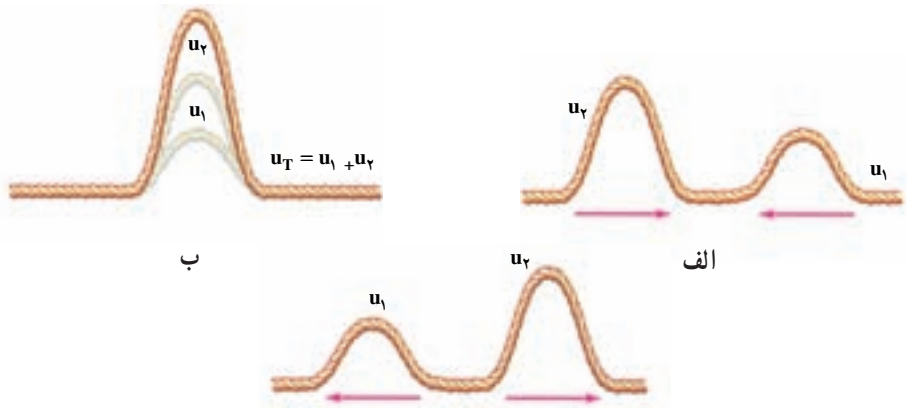
مثال‌های بالا به‌طور عملی نشان دهنده‌ی اصلی به‌نام **اصل برهم نهی** هستند. مطابق این اصل :

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 موج‌ها است.

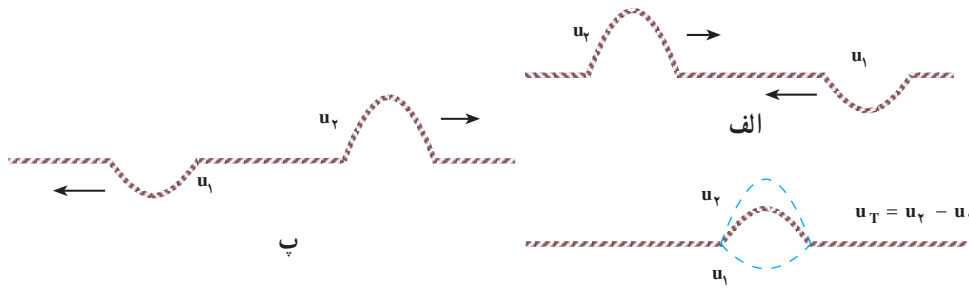
$$\vec{u}_T = \vec{u}_1 + \vec{u}_2 + \dots \qquad (۱ــ۲)$$

به حالت‌های مختلف شکل ۱ــ۱۱ 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 هریک شده است. در این 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 ۱ــ۱۲ توجه کنید. در این حالت (ب) می‌گوییم : **برهم نهی موج‌ها، ویرانگر است.**



شکل ۱ــ۱۱

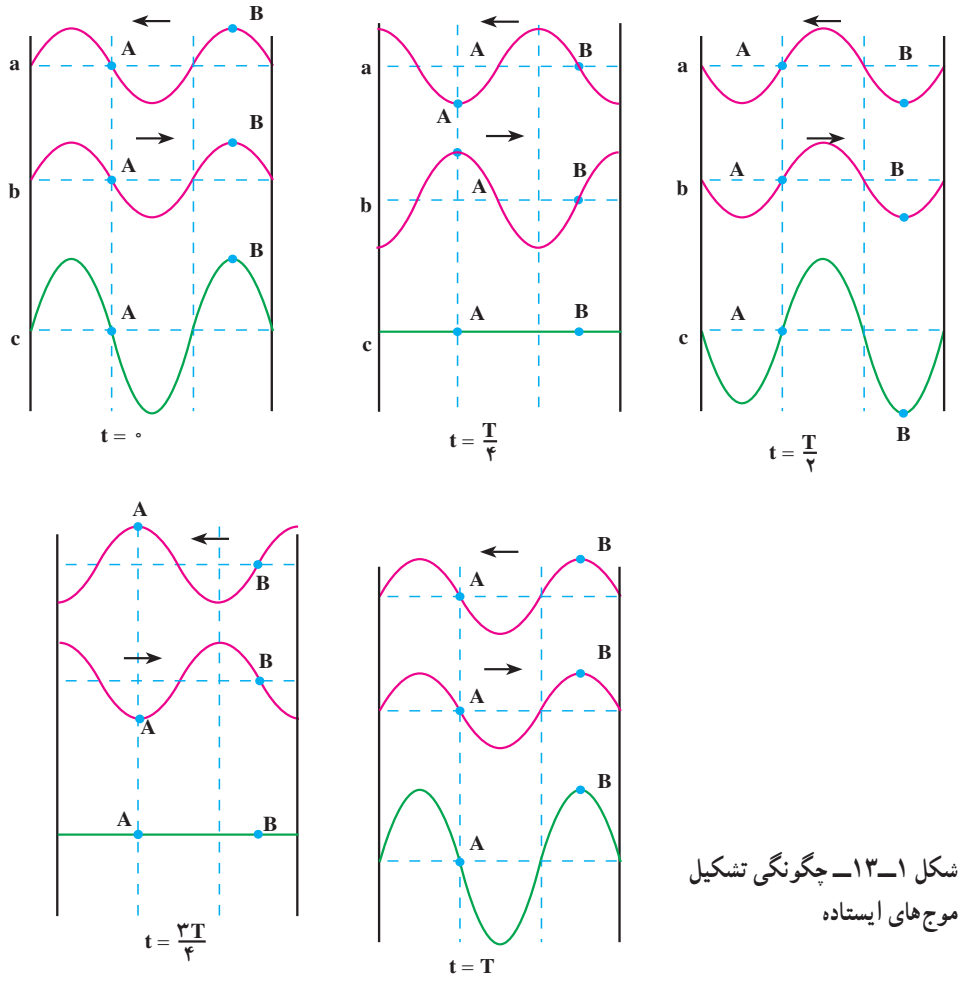


شکل ۱ــ۱۲

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 هریک از دو موج در تمام طول طناب گسترده شده باشد، به هر جزءِ طناب در هر لحظه دو موج می‌رسد. بنا به اصل برهم نهی، جابه‌جایی هر جزءِ طناب در هر لحظه، برابر برآیند جابه‌جایی‌هایی است که هریک از دو موج در آن لحظه در آن جزء ایجاد می‌کنند. وضعیت نوسانی هر نقطه بستگی به مکان آن نقطه در طناب دارد. از برهم نهی چنین دو موجی در طناب شکل خاصی به‌وجود می‌آید که به آن **موج ایستاده** گفته می‌شود.

گره و شکم: به بعضی از نقطه‌های طناب در هر لحظه دو موج می‌رسد که در آن نقطه جابه‌جایی‌های یکسان اما در خلاف جهت ایجاد می‌کنند. درنتیجه 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 ۱ــ ۱۳ توجه کنید. در این حالت‌ها و در هریک از لحظه‌های مشخص شده، موجی را که از راست به چپ روی طناب منتشر می‌شود با a و موجی را که از چپ به راست در حال انتشار است با b و حاصل برهم نهی این دو موج را با c نشان داده و هر یک را جداگانه رسم کرده‌ایم. در واقع، حالت‌های c وضعیت طناب را هنگامی که موج‌های a و b روی آن منتشر می‌شوند، در بازه‌های زمانی $\frac{T}{۴}$ (T دوره‌ی موج است) نشان می‌دهد.



شکل ۱ــ۱۳ــ چگونگی تشکیل موج‌های ایستاده

در حالت‌های مختلف شکل ۱ــ۱۳ به نقطه‌ی A توجه کنید. موج‌های a و b در هر لحظه به این نقطه، جابه‌جایی‌هایی هم اندازه اما در خلاف جهت می‌دهند. درنتیجه، همان‌گونه که حالت‌های c در لحظه‌های مختلف نشان می‌دهد، نقطه‌ی A همواره ساکن می‌ماند. نقطه‌ی A یک گره است.

پرسش ۱ــ۱

در شکل ۱ــ۱۳ 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 به‌گونه‌ای 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 ۱ــ 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 ۱ــ۲

آیا در حالت‌های مختلف شکل ۱ــ 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 (درنتیجه به نیروی کشش طناب و جرم واحد طول آن) و طول طناب بستگی دارد. علاوه‌بر این کمیت‌ها، این رابطه به ثابت و یا آزاد بودن انتهای طناب نیز بستگی دارد. در ادامه سعی می‌کنیم این رابطه را به دست آوریم.

یکی از روش‌های ایجاد دو موجِ کاملاً یکسان، که در خلاف جهت یکدیگر در طناب کشیده شده، آن است که یک‌سر طناب را به کمک یک دیاپازون به نوسان درآوریم. این نوسان‌ها از انتهای طناب، بازتاب شده و با موج‌های فرودی بر هم‌نهاده می‌شوند و موج ایستاده را به‌وجود می‌آورند. برای بررسی، دو حالت الف : دو سر طناب ثابت و ب : یک سر ثابت و سر دیگر آزاد، را درنظر می‌گیریم. در این بررسی‌ها، فرض شده که تعداد گره‌ها و شکم‌ها در طول طناب کمترین تعداد ممکن باشد.

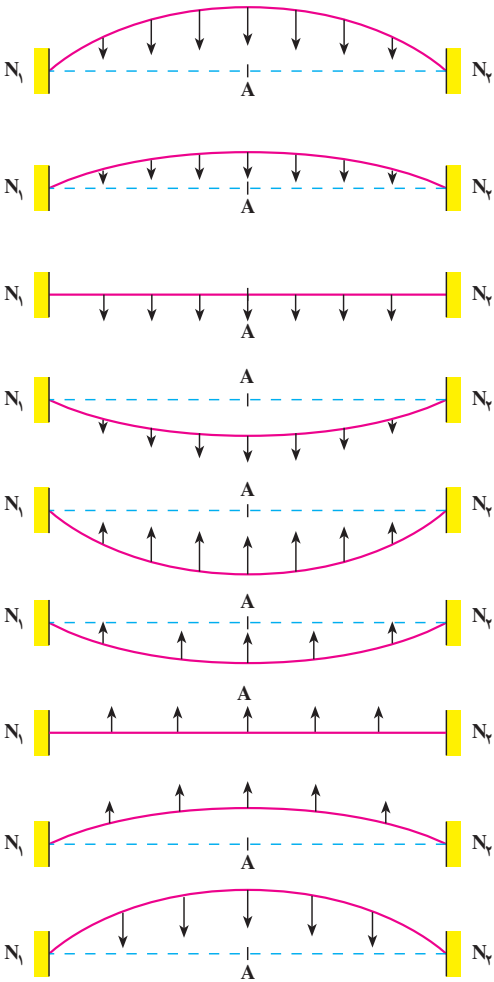
الف: دو سر طناب ثابت است: چون انتهای ثابت نمی‌تواند نوسان کند، در دو انتهای(دو سر) طناب، همواره گره ایجاد می‌شود. حالت‌های مختلف شکل ۱ــ۴ وضعیت طناب را در لحظه‌های مختلف و در یک دوره نشان می‌دهد.

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

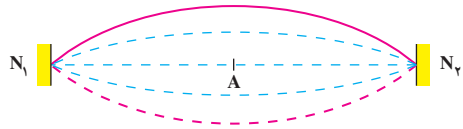
در شکل ۱ــ۱۵ حالت‌های مختلف شکل ۱ــ۱۴ نشان داده شده است.

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 :

$$L = \frac{\lambda}{2} \qquad (۳ــ۱)$$



شکل ۱ــ۱۴



شکل ۱ــ ۱۵

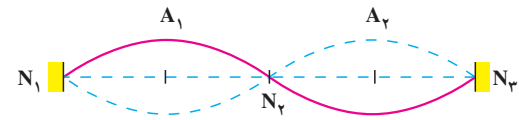
اگر بسامد نوسان f و سرعت انتشار موج در طناب v باشد، با استفاده از رابطه‌ی ۴ــ۶ خواهیم داشت :

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

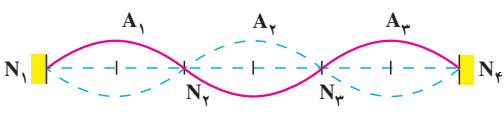
$$2L = \frac{v}{f}$$

$$f_1 = \frac{v}{2L} \qquad (۴ــ۱)$$

در آلات موسیقی سیمی (زهی) مانند تار، ویلون و... ارتعاش‌های ایجاد شده توسط مضراب و یا آرشه و... در سیم منتشر می‌شود و از دو انتهای ثابتِ تار بازتاب می‌یابد که از برهم نهی آن‌ها در طول سیم موج ایستاده تشکیل می‌شود. اگر یک سیم (تار مرتعش)، به‌گونه‌ای مرتعش شود که مانند شکل ۱ــ۱۴ 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 ۱ــ۴ به‌دست می‌آید. یک طناب (یا یک تار) را می‌توان به‌گونه‌ای به نوسان درآورد که تعداد گره‌ها و شکم‌های تشکیل شده در طول آن از حالت اصلی بیش‌تر باشد. شکل‌های ۱ــ۱۶ و ۱ــ۱۷ وضعیت‌هایی را نشان می‌دهد که در آن‌ها به‌ترتیب دو و یا سه شکم تشکیل شده است.



شکل ۱ــ۱۶



شکل ۱ــ۱۷

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

$$L = n\frac{\lambda_n}{۲} \qquad (۵ــ۱)$$

$$n = ۱, ۲, ۳, \ldots$$

رابطه‌ی اخیر را می‌توان برحسب بسامد به‌صورت زیر نوشت :

$$f_n = \frac{nv}{۲L} = nf_۱ \qquad (۶ــ۱)$$

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

مثال ۱ــ۱

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

پاسخ

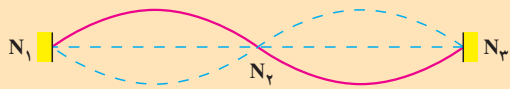
الف : شکل ۱ــ۱۸ وضعیت نوسانی طناب را نشان می‌دهد. با توجه به شکل،

معلوم می‌شود که $n = ۲$ است. با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ ۵ داریم :

$$L = n\frac{\lambda_n}{۲}$$

$$۶۰ = ۲\frac{\lambda_۲}{۲}$$

$$\lambda_۲ = ۶۰cm$$



شکل ۱ــ۱۸

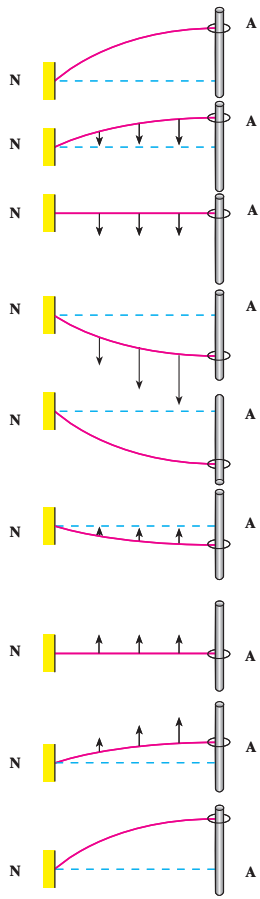
ب : با استفاده از رابطه‌ی $\lambda = \frac{v}{f}$ داریم :

$$۰/۶ = \frac{۲۴۰}{f}$$

$$f = ۴۰۰Hz$$

همان‌طور که دیدیم برای آن که در طول طناب موج ایستاده تشکیل شود، باید رابطه‌ی ۱ــ۵ برقرار شود. برای برقراری این رابطه می‌توان طول طناب و یا نیروی کششی طناب و درنتیجه سرعت انتشار موج در طناب را تغییر داد.

ب: یک سر طناب ثابت است: با توجه به آن‌چه 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 به‌وجود نمی‌آید. در این حالت، شکل طناب مانند بخش‌های مختلف شکل ۱ــ۱۹ است. در این‌جا نیز ممکن است، بخش‌های مختلف شکل ۱ــ۱۹ را در یک شکل، مانند شکل ۱ــ۲۰ نشان داد.



شکل۱ــ۱۹

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 :

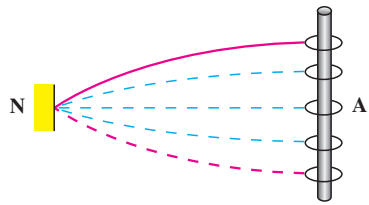
$$L = \frac{\lambda}{۴} \qquad (۱ــ۷)$$

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

$$L = \frac{v}{۴f}$$

$$f_1 = \frac{v}{4L} \qquad (۸ـ۱)$$

رابطه‌ی بالا، بسامد اصلی طناب را به‌دست می‌دهد.

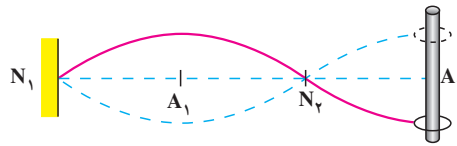


شکل ۱ـ۲۰

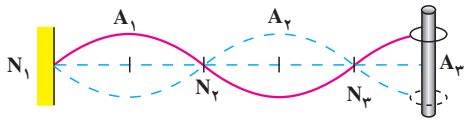
اگر در طول طناب، مانند شکل‌های ۱ـ۲۱ و ۱ـ۲۲، تعداد گره‌ها و شکم‌ها بیش‌تر باشد، داریم :

$$L = (2n-1)\frac{\lambda_{(2n-1)}}{4} \qquad (۹ـ۱)$$

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



شکل۱ـ۲۱



شکل۱ـ۲۲

یعنی در این حالت، طول طناب مضرب فردی از ربع طول موج است. با استفاده از رابطه‌ی $\lambda = \frac{v}{f}$ خواهیم داشت :

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

$$f_{(2n-1)} = (2n-1)\frac{v}{4L} = (2n-1)f_1 \qquad (۱۰ـ۱)$$

به ازای $n = 1$ در رابطه‌ی ۱ـ۱۰، بسامد اصلی و به ازای $n = 2, 3, \ldots$ هماهنگ‌های سوم، پنجم و... بسامد اصلی به‌دست می‌آیند. در این حالت (که یک سر طناب آزاد است) فقط مضرب‌های فرد بسامد اصلی در طناب و یا تار ایجاد می‌شوند.

مثال ۱ــ۲

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 به‌دست آورید.

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

پاسخ

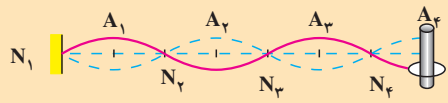
الف : در حالتی که یک سر طناب ثابت و سر دیگر آن آزاد است، تعداد گره‌ها برابر تعداد شکم‌ها است. در این حالت،n برابر تعداد گره (یا تعداد شکم) است.

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

$$N_1A_2 = ۱۵$$

$$۳\frac{\lambda}{۴} = ۱۵$$

$$\lambda = ۲۰cm$$



شکل ۱ــ۲۳

با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۹ داریم :

$$L = (۲n-۱)\frac{\lambda_{(۲n_۱)}}{۴} \quad و \quad n = ۴$$

$$L = (۲\times ۴-۱)\times \frac{۲۰}{۴} = ۳۵cm$$

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

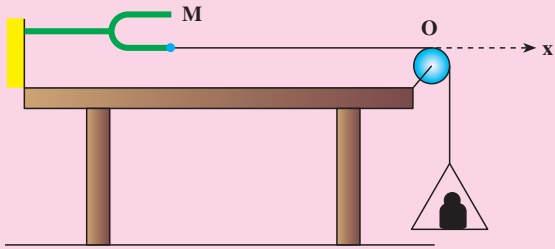
$$۰/۲ = \frac{v}{۴۰۰}$$

$$v = ۸۰m/s$$

فعالیت ۱ــ۱

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

مطابق شکل ۱ــ ۲۴ یک سر طناب نازکی را به دیاپازون 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 دیاپازون 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، به‌دست آورید. با کاهش وزنه‌ی درون کفه، حالت‌هایی را به‌وجود آورید که تعداد گره و شکم‌ها بیش‌تر شوند. با جایگزین کردن دیاپازونی که بسامد دیگری دارد چه تغییری در آزمایش رخ می‌دهد؟ نتیجه‌ی این آزمایش را چگونه توجیه می‌کنید؟

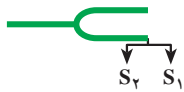


شکل ۱ــ۲۴

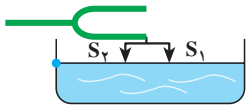
۱ــ۳ ــ برهم نهی موج‌ها در دو بُعد ــ تداخل موج‌ها در سطح آب

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 دیاپازون، دو چشمه‌ی موج S_1 و S_2 را ایجاد می‌کنیم (شکل ۱ــ۲۵). طول سوزن‌های S_1 و S_2 با هم برابرند.



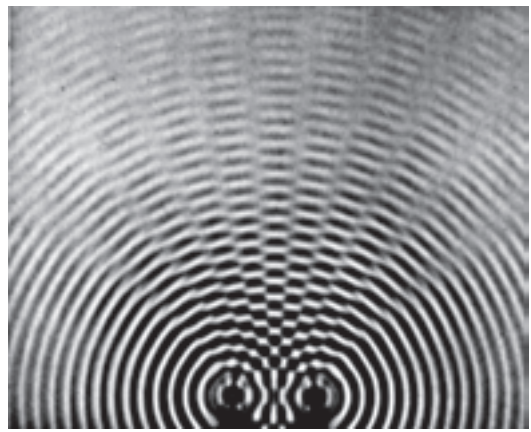
شکل ۱ــ۲۵



شکل ۱ــ۲۶

اکنون دیاپازون را مطابق شکل ۱ــ۲۶ 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 دیاپازون را به نوسان درآوریم، موج‌های دایره‌ای حاصل از هریک از دو چشمه‌ی S_1 و S_2 در سطح آب منتشر می‌شوند. در نتیجه به هر ذرّه‌ی 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 این‌جا هم مانند تشکیل موج‌های ایستاده روی طناب، بعضی از ذرّه‌های 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 این‌جا که سطح آن دو بُعدی است، نقطه‌های گره مشابه و نیز نقطه‌های شکم مشابه بی‌شماری وجود دارد.

شکل ۱ــ۲۷ تصویری را نشان می‌دهد که حاصل برهم نهی آزمایشی مشابه آزمایش یادشده‌ی بالا (به شکل ۱ــ۲۶ نگاه کنید) 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 ۱ــ ۲۷

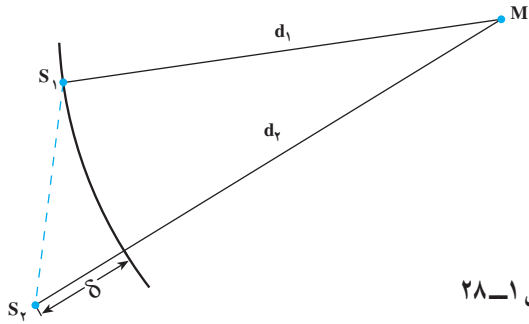
۱ــ۴ــ تحلیل ریاضی تداخل موج‌ها

شکل ۱ــ ۲۸ سطح آب درون تشتک را نشان می‌دهد. M یک نقطه از سطح آب تشتک است که با فاصله‌های d_1 و d_2 از دو چشمه‌ی موج S_1 و S_2 قرار دارد. اگر معادله‌ی نوسان دو چشمه به‌صورت $u_1 = A\sin\omega t$ باشد، فاز موج‌های حاصل از S_1 و S_2 وقتی به نقطه‌ی M می‌رسند، به ترتیب $\varphi_1 = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda}d_1$ و $\varphi_2 = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda}d_2$ و اندازه‌ی اختلاف فاز آن‌ها برابر است با :

$$|\Delta\varphi| = |\varphi_2 - \varphi_1| = \frac{2\pi}{\lambda}|d_2 - d_1| = \frac{2\pi}{\lambda}|\delta| \qquad (۱۱ــ۱)$$

در رابطه‌ی بالا $\delta = d_2 - d_1$ اختلاف راه نقطه‌ی M از دو چشمه‌ی موج است. این رابطه نشان می‌دهد که اختلاف فاز دوموجی که هم‌زمان به M می‌رسند، به این اختلاف راه بستگی دارد.

از طرف دیگر، وضعیت نوسانی نقطه‌ی M به اختلاف فاز دو موج در M، یعنی $|\Delta\varphi|$، بستگی دارد. در نتیجه، وضعیت نوسانی نقطه‌ی M به اختلاف راه $\delta = d_2 - d_1$ بستگی دارد.



شکل ۱ــ۲۸

الف : اگر اختلاف فاز $|\Delta\varphi|$ مضرب زوجی از π باشد، دو موج در نقطه‌ی M هم‌فازند و برهم‌نهی آن‌ها سازنده است. در این صورت نقطه‌ی M با بیشینه‌ی دامنه نوسان می‌کند و یکی از نقطه‌های «شکم» خواهد بود. پس داریم :

$$|\Delta\varphi| = \frac{2\pi}{\lambda}|\delta| = 2\pi n \qquad (۱۲ــ۱)$$

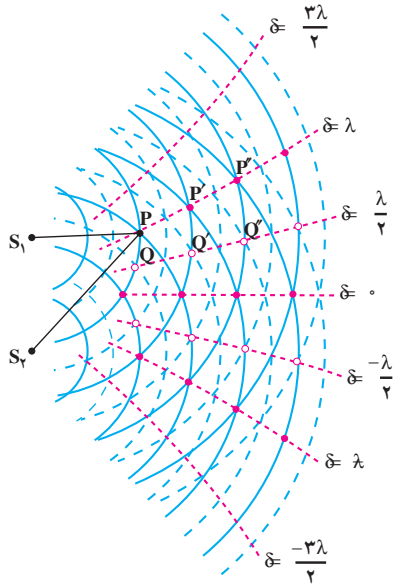
که در آن $n = 0, 1, 2, 3, \ldots$

از رابطه‌ی ۱ــ ۱۲ نتیجه می‌شود :

$$\delta = d_2 - d_1 = \pm n\lambda = \pm\, 2n\frac{\lambda}{2} \qquad (۱۳ــ۱)$$

بنابراین، **نقطه‌هایی از سطح آب که اختلاف راه آن‌ها از دو چشمه‌ی موج، مضرب**

زوجی از نصف طول موج است، در هر لحظه دو موج هم‌فاز دریافت می‌کنند که برهم نهی آن‌ها سازنده است. این نقطه‌ها با بیشینه‌ی دامنه نوسان می‌کنند. در شکل ۱ــ۲۹ این نقطه‌ها را با دایره‌های کوچک توپر نشان داده‌ایم.



شکل ۱ــ۲۹

ب : اگر اختلاف فاز $|\Delta\varphi|$ مضرب فردی از π باشد، دو موجی که در هر لحظه، هم‌زمان به M می‌رسند، در فاز مخالف‌اند و برهم نهی آن‌ها ویرانگر است. در این صورت نقطه‌ی M ساکن می‌ماند و یکی از نقطه‌های «گره» می‌شود. داریم :

$$|\Delta\varphi| = \frac{۲\pi}{\lambda}|\delta| = (۲n-۱)\pi \qquad (۱۴ــ۱)$$

که در آن $n = ۱, ۲, ۳, \ldots$

از رابطه‌ی ۱ــ۱۴ می‌توان اختلاف راه δ را برحسب طول موج به‌دست آورد، یعنی :

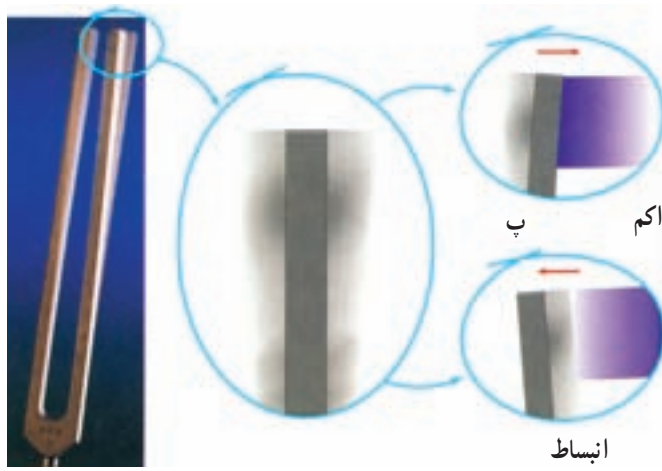
$$\delta = d_۲ - d_۱ = \pm(۲n-۱)\frac{\lambda}{۲} \qquad (۱۵ــ۱)$$

بنابراین، **به نقطه‌هایی از سطح آب که اختلاف راه آن‌ها از دو چشمه‌ی موج، مضرب فردی از نصف طول موج است، در هر لحظه دو موج می‌رسد که با یکدیگر در فاز مخالف‌اند و در نتیجه برهم نهی آن‌ها ویرانگر است. این نقطه‌ها ساکن می‌مانند.** در شکل ۱ــ۲۹ این نقطه‌ها را با دایره‌های توخالی نشان داده‌ایم.

۱ــ۵ــ موج صوتی

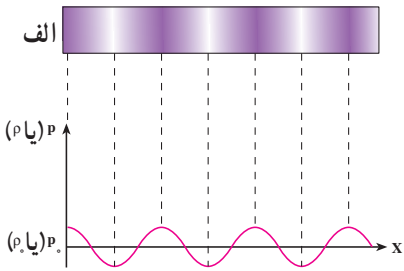
یکی از مهم‌ترین موج‌هایی که ما در زندگی روزمره با آن سروکار داریم موج صوتی است. برای مثال،از طریق این موج‌ها با یکدیگر گفتگو می‌کنیم، با به صدا در آوردن بوق ماشین، به عابری که از خیابان عبور می‌کند هشدار می‌دهیم و ... .

برای این که بدانیم موج‌های صوتی چگونه ایجاد می‌شوند فرایند تولید صوت به‌وسیله‌ی یک دیاپازون را تشریح می‌کنیم. یک دیاپازون را مطابق شکل ۱ــ۳۰ــ الف و ب درنظر بگیرید قبل از ارتعاش دیاپازون هوای مجاور آن در حال تعادل است و فشار و چگالی آن در همه‌جا ثابت و به ترتیب برابر P_0 و ρ_0 است. اکنون دیاپازون را مرتعش می‌کنیم. هنگامی که شاخه‌ی آن مطابق شکل ۱ــ۳۰ــپ 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 ۱ــ۳۰

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 دیاپازون برمی‌گردد، همان‌طور که در شکل ۱ــ۳۰ــ 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 به‌صورت یک تپ انبساطی (کم‌فشار) در



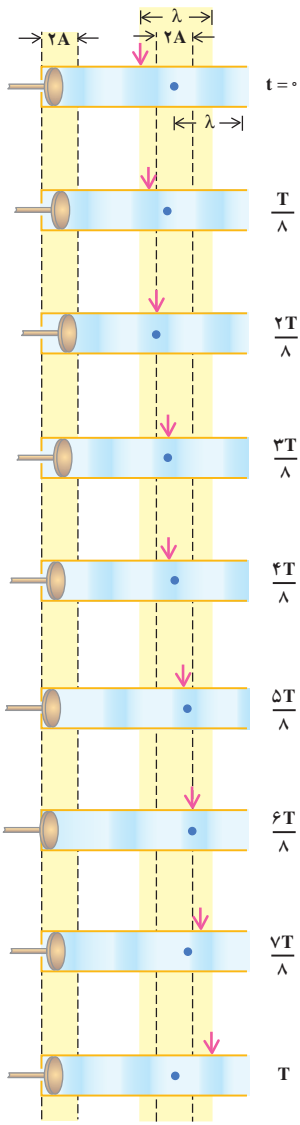
شکل ۱ــ۳۱

هوا منتشر می‌شود. بنابراین هنگامی که دیاپازون مرتعش می‌شود تپ‌های متوالی تراکمی و انبساطی (شکل ۱ــ۳۱) در هوا منتشر می‌کند. نمودار تغییرات فشار (چگالی) برحسب فاصله در یک لحظه از زمان در شکل ۱ــ۳۱ــ ب نشان داده شده است.

در مورد انتشار موج در طناب یا سطح آب دیدیم که آشفتگی یا تپ به‌صورت برجستگی و یا فرورفتگی بود. اما در حالت انتشار صوت در هوا، آشفتگی یا تپ به‌صورت لایه‌های تراکمی و انبساطی یا لایه‌های پرفشار و کم‌فشار است. همچنین، دیدیم که هنگام انتشار موج در محیط ذره‌های محیط منتقل نمی‌شوند، بلکه حول نقطه‌ی تعادل خود حرکت نوسانی انجام می‌دهند. مثلاً، در شکل ۴ــ۷ فیزیک (۱) 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 ۱ــ۳۲ 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 متراکم که درشکل ۱ــ۳۲ با پیکان مشخص شده است، درنظر بگیریم، می‌بینیم که با سرعت ثابت در هوا حرکت می‌کند، چون در انتشار صوت ذره‌های هوا در راستای انتشار نوسان می‌کنند. این **موج‌ها طولی‌اند.**

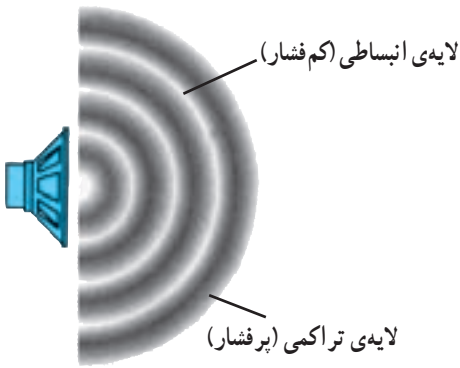


شکل ۱ــ۳۲

فعالیت ۱ــ۲

مثال‌هایی از انتشار صوت در مایع‌ها و جامدها ذکر کنید.

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



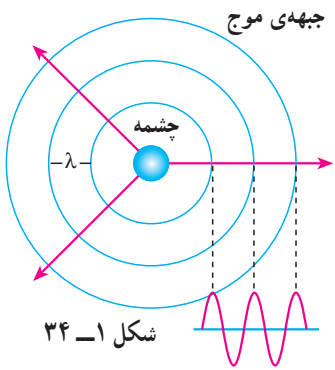
شکل ۱ــ۳۳

هنگامی که یک چشمه‌ی صوت مرتعش می‌شود، صوت ایجاد شده در تمام جهت‌ها منتشر می‌شوند. لایه‌های تراکمی (پرفشار) و انبساطی (کم‌فشار) یک موج صوتی که از یک بلندگوی کوچک در هوا منتشر می‌شود در شکل ۱ــ۳۳ نشان داده شده است.

پرسش ۱ــ۳

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

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 ۱ــ۳۴ نشان داده شده‌اند. جبهه‌های موج در این شکل نقاط پرفشار را نشان می‌دهند.



شکل ۱ــ ۳۴

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.

۱ــ۶ــ 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 ۱ــ۱ 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 ۱ــ۱ــ سرعت صوت در ماده‌های مختلف*

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

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

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

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \qquad (۱۶_۱)$$

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 به‌صورت نسبت ظرفیت گرمایی مولی گاز در فشار ثابت (C_{Mp}) به ظرفیت گرمایی مولی آن در حجم ثابت (C_{Mv}) تعریف می‌شود. مقادیر C_{Mp} و C_{Mv} و $\gamma = \frac{C_{Mp}}{C_{Mv}}$ و M برای گازهای مختلف در جدول ۱ــ۲ داده شده است.

جدول ۱ــ۲ــ ظرفیت گرمایی مولی در حجم و فشار ثابت γ و M

	گاز	C_{Mv} J/mol.K	C_{Mp} J/mol.K	γ	M g/mol
تک‌اتمی	He	۱۲/۵	۲۰/۸	۱/۶۷	۴
	Ar	۱۲/۵	۲۰/۸	۱/۶۷	۴۰
دو اتمی	H_2	۲۰/۴	۲۸/۸	۱/۴۱	۲
	N_2	۲۰/۸	۲۹/۱	۱/۴۰	۲۸
	O_2	۲۱/۱	۲۹/۴	۱/۳۹	۳۲

مثال ۱ــ۳

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

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۱۶ داریم :

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} = \sqrt{\frac{1/4(8/3)(273+27)}{29\times10^{-3}}} \simeq 347 m/s$$

تمرین ۱ــ۳

با استفاده از اطلاعات جدول ۱ــ۲، سرعت صوت را در گازهای اکسیژن، نیتروژن و هلیم در دمای صفر درجه‌ی سلسیوس محاسبه و نتیجه‌ی به‌دست آمده را با مقادیر جدول ۱ــ۱ 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 رفت‌وبرگشت 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 زیرآب، محل کشتی‌های غرق شده، زیردریایی‌ها و حتی محل تجمع گروهی از ماهی‌ها را که باهم حرکت می‌کنند می‌توان تعیین کرد.

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

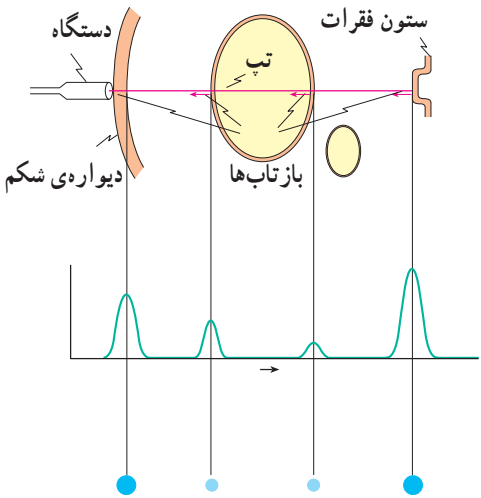
در کاربردهای بالا اغلب از بسامدهای بیش از ۲۰ kHz که در ناحیه‌ی فراصوتی قرار دارد استفاده می‌شود، زیرا این موج‌ها علاوه بر این که قابل شنیدن نیستند دارای طول موج کوتاه‌اند و اجسام با ابعاد کوچک را می‌توان با استفاده از آن‌ها آشکار کرد.

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

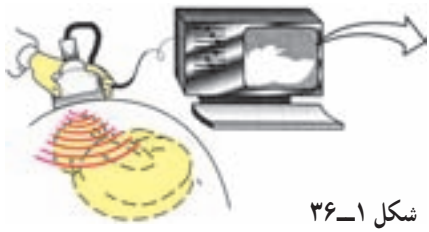
ماده‌ی ناخواسته متمرکز می‌شوند. برای مثال تابش متمرکز این موج‌ها بر روی سنگ کلیه باعث می‌شود که سنگ به پاره‌های کوچک شکسته شده و به‌تدریج از بدن دفع گردند. بدون اینکه احتیاجی به عمل جراحی باشد.

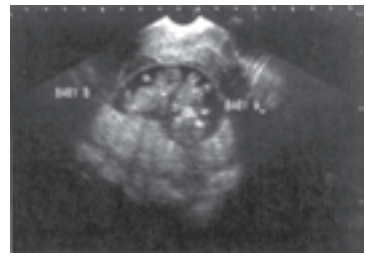
از موج‌های فراصوتی همچنین در تشخیص بیماری نیز استفاده می‌شود. بدین‌ترتیب که یک تپ فراصوتی به داخل بدن بیمار فرستاده می‌شود. این تپ از مرزها و فصل مشترک‌های بین اعضای داخل بدن بازتاب می‌یابد که با آشکارسازی آن می‌توان اطلاع لازم را در مورد بیماری عضو موردنظر کسب کرد. این روش برای تشخیص محل غده‌ها و سایر عوامل غیرعادی در بدن، عملکرد قلب و دریچه‌های آن، وضعیت جنین، سنگ کلیه و غیره به‌کار می‌رود.

روش کار به این ترتیب است که با دستگاه خاصی، مانند بلندگو، تپ الکتریکی را به ارتعاش‌های مکانیکی تبدیل می‌کنند و به این‌وسیله یک تپ صوتی ایجاد می‌شود. بخشی از این تپ از فصل مشترک بافت‌های مختلف در بدن بازتابیده می‌شود (شکل ۱ــ۳۵). آشکارسازی تپ‌های بازتابیده، با همان دستگاه صورت می‌گیرد که موج‌های صوتی را به تپ‌های الکتریکی تبدیل می‌کند. تپ‌ها را می‌توان روی یک مونیتور مشاهده کرد (شکل ۱ــ۳۶). تصویر یک جنین که با استفاده از فراصوت تهیه شده نیز در این شکل نشان داده شده است.



شکل ۱ــ۳۵


شکل ۱ــ۳۶



۱ــ۷ــ 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 ۱ــ۳۷ــ الف فقط یک گره و شکم در داخل لوله تشکیل می‌شود (در این شکل موج‌های صوتی داخل لوله برای سهولت نمایش به‌صورت موج‌های عرضی نشان داده شده‌اند. بیشینه‌ی دامنه در این شکل حالتی را نشان می‌دهد که در آن جابه جایی ذرات لایه‌ی هوا بیشینه است) در این حالت طول لوله، L ، با فاصله‌ی گره تا شکم برابر است یعنی :

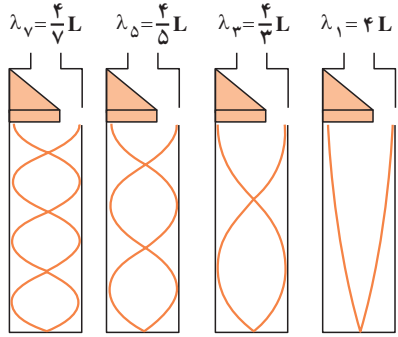
$$L = \frac{\lambda_1}{4} \qquad (۱ــ۱۷)$$

و یا طول موج صوت برابر است با :

$$\lambda_1 = 4L \qquad (۱ــ۱۸)$$

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

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L} \qquad (۱۹ــ۱)$$



شکل ۱ــ۳۷

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 ۱ــ۳۷ ــ ب، پ، ... تعداد بیش‌تری گره و شکم در لوله تشکیل می‌شود یعنی ممکن است در داخل لوله دوگره، سه گره، ... n گره تشکیل شود. در این صورت، همان‌گونه که در این شکل می‌بینید، طول لوله به ترتیب برابر است با $3\frac{\lambda_4}{4}$ ، $5\frac{\lambda_5}{4}$ ، ... ، $(2n-1)\frac{\lambda_{2n-1}}{4}$ 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 :

$$\lambda_{2n-1} = \frac{4L}{2n-1} \qquad \text{و} \qquad n = 1,2,3,... \qquad (۲۰ــ۱)$$

و بسامد این صوت برابر است با :

$$f_{2n-1} = \frac{(2n-1)v}{4L} = (2n-1)f_1 \qquad \text{و} \qquad n = 1,2,... \qquad (۲۱ــ۱)$$

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 ۱ــ۴

در یک لوله‌ی صوتی که یک انتهای آن بسته است، می‌خواهیم یک صوت اصلی با بسامد ۳۴۰ Hz ایجاد کنیم. الف : طول لوله باید چه‌قدر باشد. ب : بسامد هماهنگ‌های سوم و پنجم را حساب کنید. سرعت صوت در هوا را ۳۴۰m/s فرض کنید.

پاسخ

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

$$\lambda_1 = \frac{v}{f_1} = \frac{۳۴۰}{۳۴۰} = ۱ \ m$$

در این صورت با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۱۷ طول لوله برابر است با :

$$L_1 = \frac{\lambda}{۴} = ۰/۲۵ \ m$$

ب : با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۲۱ برای $n = ۲$ و $n = ۳$ داریم :

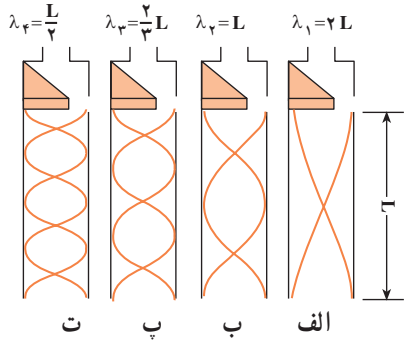
$$f_۳ = (۲ \times ۲ - ۱)۳۴۰ = ۱۰۲۰ \ Hz$$

$$f_۵ = (۲ \times ۳ - ۱) \times ۳۴۰ = ۱۷۰۰ \ Hz$$

ب: هر دو انتهای لوله باز است. در این حالت در هر دو انتها شکم تشکیل می‌شود. برای صوت اصلی، همان‌طور که در شکل ۱ــ۳۸ــ 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 این‌صورت داریم :

$$L = \lambda_1 / ۲ \qquad (۱ــ۲۲)$$

یعنی، طول موج صوت برابر با $\lambda = ۲L$ است.



شکل ۱ــ۳۸

در نتیجه بسامد اصلی برابر است با :

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{۲L} \qquad (۱ــ۲۳)$$

هماهنگ‌های دیگر این صوت هنگامی پدیدار می‌شوند که مطابق شکل ۱ــ۳۸ــب، پ و... در

داخل لوله دو گره ($L = ۴\frac{\lambda_۲}{۴}$)، سه گره ($L = ۶\frac{\lambda_۳}{۴}$)، ... n گره ($L = ۲n\frac{\lambda_n}{۴}$) تشکیل شود.

طول موج صوت فرودی هنگامی که n گره تشکیل شده است، از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$\lambda_n = \frac{۲L}{n} \qquad n = ۱, ۲, \ldots \qquad (۲۴_۱)$$

و بسامد این صوت برابر است با :

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n\frac{v}{۲L} = nf_۱ \qquad (۲۵_۱)$$

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 $f_۱$ ، $۲f_۱$ ، $۳f_۱$ و ... است.

تمرین ۱ــ۴

بسامد صوت اصلی و هماهنگ‌های دوم و سوم را در یک لوله‌ی صوتی به طول ۱m که هر دو انتهای آن باز است تعیین کنید. (سرعت صوت را در هوا ۳۴۰m/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 دیاپازون را در نزدیکی دهانه‌ی لوله به نوسان درآوریم. اگر بسامد نوسان این دیاپازون 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.

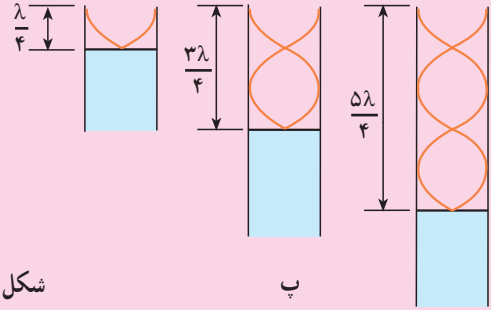
فعالیت ۱ــ۳

در شکل ۱ــ۳۹ــ 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 هریک از سه حالت شکل پ چگونه موج ایستاده تشکیل می‌شود؟

ب

الف



پ

شکل ۱ــ۳۹

فعالیت ۱ــ۴

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

فعالیت ۱ــ۵

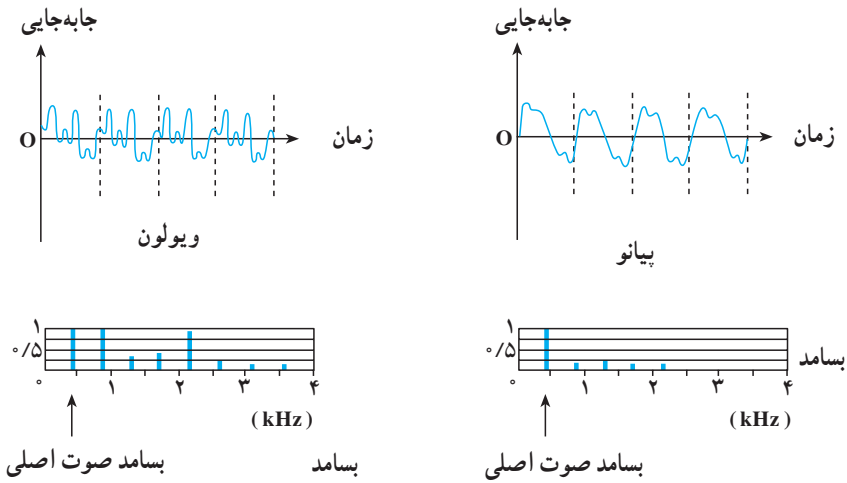
یک لوله‌ی صوتی باز بسازید که بسامدی برابر با ۴۳۵ هرتز (la_3 در گام طبیعی (به مطالعه‌ی آزاد زیر مراجعه کنید)) تولید کند.

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 طنین بیان می‌کنند. برای تعریف این مشخصه‌ها به بررسی صوتی که یک تار مرتعش تولید می‌کند، می‌پردازیم.

هنگامی که یک تار را مرتعش می‌کنیم، تنها هماهنگ اوّل آن ایجاد نمی‌شود، بلکه هماهنگ‌های دیگر آن نیز به‌وجود می‌آیند و از برهم نهی این هماهنگ‌ها یک موج مرکب ایجاد می‌شود. آن‌چه که ما پس از مرتعش کردن یک تار می‌شنویم از این موج مرکب حاصل می‌شود. در شکل ۱ــ۴۰ 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 ۴۴۰ 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. طنین صوت به‌شکل موج مرکب بستگی دارد. یعنی طنین 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 شنونده بستگی



شکل ۱ــ۴۰

دارد.

اکنون به توصیف صوت‌های موسیقی می‌پردازیم. برای این منظور لازم است چند مفهوم را تعریف کنیم.

۱ــ صوت موسیقی یا نت، صوتی است که (مانند شکل ۱ــ۴۰) از ارتعاش‌های منظم تشکیل شده است و اثر خوشایندی بر گوش انسان دارد.

۲ــ فاصله‌ی موسیقی، نسبت بسامد دو نت را فاصله‌ی موسیقی می‌نامند. تجربه نشان می‌دهد که هر فاصله‌ای برای انسان خوشایند نیست.

۳ــ 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 مبنا (do_1) که کمترین بسامد را دارد، به‌صورت زیر است :

$\frac{re}{do_1}=\frac{۹}{۸}$ ، $\frac{mi}{do_1}=\frac{۵}{۴}$ ، $\frac{fa}{do_1}=\frac{۴}{۳}$ ، $\frac{sol}{do_1}=\frac{۳}{۲}$ ، $\frac{la}{do_1}=\frac{۵}{۳}$ ، $\frac{si}{do_1}=\frac{۱۵}{۸}$ و $\frac{do_2}{do_1}=۲$ ، بسامد do_2 دو برابر بسامد do_1 است و اکتاو do_1 نامیده می‌شود. اگر do_2

را نت مبنا بگیریم، با رعایت فاصله‌های فوق می‌توان گام دوم را ساخت. به همین ترتیب می‌توان بر مبنای $do_۳$ که اکتاو $do_۲$ است گام سوم را ساخت و به همین ترتیب ادامه داد.

به‌عنوان مثال اگر بسامد نت مبنا را ۶۵/۲۵ هرتز اختیار کنیم، با استفاده از نسبت‌های بالا می‌توانیم بسامد نت‌های دیگر را به‌دست آوریم. در این‌صورت داریم :

$$\frac{re_۱}{do_۱} = \frac{۹}{۸}$$

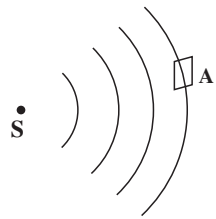
$$re_۱ = \frac{۹}{۸} do_۱ = ۷۳/۴۱ \, Hz$$

به همین ترتیب بسامدهای ۸۱/۵۶ ، ۸۷ ، ۹۷/۸۸ ، ۱۰۸/۷۵ و ۱۲۲/۳۴ هرتز به‌ترتیب برای $me_۱$ ، $fa_۱$ ، $sol_۱$ ، $la_۱$ ، $si_۱$ به‌دست می‌آیند. برای $do_۲$ که اکتاو $do_۱$ است بسامد ۱۳۰/۵ هرتز محاسبه می‌شود. اکنون می‌توانیم بر مبنای $do_۲$ گام بعدی را بسازیم. برای نتهای این گام به ترتیب مقدارهای ۱۴۶/۸۱، ۱۶۳/۱۳، ۱۷۴، ۱۹۵/۷۵، ۲۱۷/۵ ، ۲۴۴/۶۹ هرتز به‌دست می‌آیند. هریک از این نت‌ها اکتاو نت متناظر در گام اول است (چرا؟) به همین ترتیب برای گام سوم به‌ترتیب مقدارهای ۲۶۱، ۲۹۳/۶، ۳۲۶/۲۵، ۳۴۸، ۳۹۱/۵، ۴۳۵، ۴۸۹/۳۸ هرتز به دست می‌آیند. این مثال نت‌های گام طبیعی را بر مبنای قرارداد $la_۳ = ۴۳۵Hz$ به‌دست می‌دهد. اکنون به‌عنوان تمرین تعیین کنید که بسامدهای ۱۰۴۴ و ۸۷۰ هرتز بسامد چه نت‌هایی هستند و در کدام گام قرار دارند؟

۱ــ۸ــ شدت صوت

در بخش ۱ــ۱ 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 ($E = \frac{۱}{۲} m\omega^۲ A^۲$). این بیان در مورد موج‌های صوتی نیز درست است. در شکل ۱ــ۴۱ چشمه‌ی صوتی S را می‌بینیدکه 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. درنتیجه، شدت صوت I در مکانی که سطح A قرار گرفته با رابطه‌ی صفحه‌ی بعد بیان می‌شود :

$$I = \frac{E}{At} \qquad (۲۶_۱)$$



شکل ۱ــ۴۱

رابطه‌ی ۱ــ۲۶ را می‌توان با استفاده از تعریف توان ($P = \frac{E}{t}$) به‌صورت زیر نوشت :

$$I = \frac{P}{A} \qquad (۲۷_۱)$$

یکای شدت موج در SI وات بر مترمربع ($W/m^۲$) است.

مثال ۱ــ۵

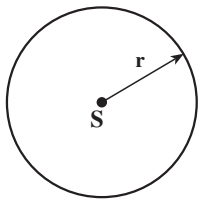
به سطح یک میکروفون که مساحت آن $۳cm^۲$ است در مدت ۵ ثانیه $۱/۵\times۱۰^{-۱۱}J$ انرژی صوتی می‌رسد. شدت صوت در سطح میکروفون چقدر است؟ (سطح میکروفون عمود بر راستای انتشار صوت است).

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۲۶ داریم

$$I = \frac{E}{At} = \frac{۱/۵\times۱۰^{-۱۱}}{۳\times۱۰^{-۴}\times۵} = ۱۰^{-۸}\ W/m^۲$$

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 ۱ــ۴۲).



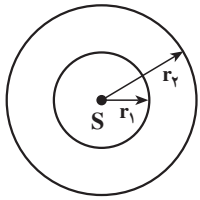
شکل ۱ــ۴۲

فرض کنید توان چشمه‌ی صوت P باشد. شدت صوت در روی کره‌ای به شعاع r چقدر است؟ اگر از اتلاف انرژی صوتی در هوا صرف‌نظر کنیم، در واحد زمان انرژی P به سطح کره‌ای به مساحت $۴\pi r^۲$ می‌رسد.

درنتیجه شدت صوت بر روی این کره برابر است با :

$$I = \frac{P}{۴\pi r^۲} \qquad (۲۸_۱)$$

این رابطه نشان می‌دهد که با دور شدن از چشمه‌ی S شدت صوت کاهش می‌یابد. حال برای این که ببینیم این کاهش به چه نسبتی صورت می‌گیرد، دو جبهه‌ی موج کروی به شعاع‌های $r_۱$ و $r_۲$ در نظر می‌گیریم (شکل ۱ــ۴۳).



شکل ۱ــ۴۳

انرژی‌ای که در واحد زمان به سطح کره‌ای با شعاع $r_۱$ می‌رسد ($P_۱$) با انرژی‌ای که در واحد زمان به سطح کره‌ای با شعاع $r_۲$ می‌رسد ($P_۲$) برابر است. بنابراین داریم :

$$P_۱ = P_۲ \qquad (۲۹_۱)$$

شدت صوت روی سطح کره‌ی ۱ برابر است با :

$$I_۱ = \frac{P_۱}{۴\pi r_۱^۲}$$

و روی سطح کره‌ی ۲ برابر است با :

$$I_۲ = \frac{P_۲}{۴\pi r_۲^۲}$$

با جایگذاری این رابطه‌ها در رابطه‌ی ۱ــ۲۹ داریم :

$$۴\pi r_۱^۲ I_۱ = ۴\pi r_۲^۲ I_۲$$

و یا

$$\frac{I_۲}{I_۱} = (\frac{r_۱}{r_۲})^۲ \qquad (۳۰_۱)$$

همان‌طور که این رابطه نشان می‌دهد، شدت صوت با مجذور فاصله از چشمه‌ی صوت نسبت عکس دارد.

مثال ۱ــ۶

شدت صوت یک سخنران در یک سالن در فاصله‌ی ۴ متری از او برابر $۱۰^{-۶}\ W/m^۲$ است. شدت صوت سخنران در فاصله‌ی ۲۰ متری چقدر است؟

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۳۰ داریم

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

با جایگذاری مقادیر r_2 و r_1 و I_1 داریم $\frac{I_2}{10^{-6}} = (\frac{4}{20})^2 = \frac{1}{25}$

$$I_2 = 4 \times 10^{-8}\ W/m^2$$

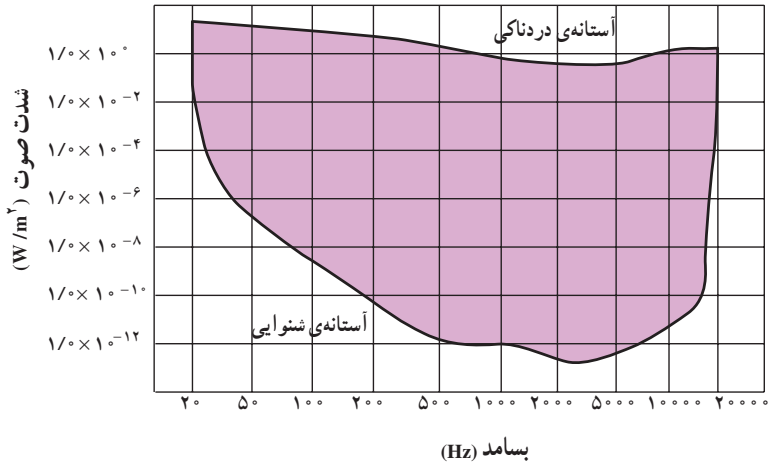
یعنی در مقایسه با فاصله‌ی ۴ متری، شدت صوت در فاصله‌ی ۲۰ متری ۲۵ مرتبه کاهش می‌یابد. به نظر شما آیا این بدان معنی است که صوت در فاصله‌ی ۴ متری ۲۵ بار بلندتر از صوت در فاصله‌ی ۲۰ متری شنیده می‌شود؟

شدت صوت برای برخی صداها در جدول ۱ــ۳ آمده است.

جدول ۱ــ۳ــ شدت صوت و تراز شدت صوت برای برخی صداها

صدا	شدت صوت W/m^2	تراز شدت صوت dB
شدت صوت مبنا	10^{-12}	۰
نفس‌کشیدن	10^{-11}	۱۰
برگ درختان در نسیم	10^{-10}	۲۰
صحبت‌کردن از فاصله‌ی یک متری	10^{-8}	۴۰
همهمه در فروشگاه	10^{-6}	۶۰
سروصدای خودروها در خیابان شلوغ	10^{-5}	۷۰
آستانه‌ی دردناکی (برای بسامد ۱۰۰۰Hz)	۱	۱۲۰
مسلسل	۱۰	۱۳۰
غرش هواپیمای جت درحین بلندشدن	10^2	۱۴۰
راکت فضایی، در موقع بلندشدن	10^5	۱۷۰

آهسته‌ترین صدایی (کم‌ترین شدت) را که انسان می‌تواند بشنود آستانه‌ی شنوایی می‌نامند، و بلندترین صدایی (بیشینه‌ی شدت) که انسان می‌تواند بشنود بدون این‌که 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، به‌صورت تابعی از بسامد، در شکل ۱ــ۴۴ مشاهده می‌کنید.



شکل ۱ــ۴۴

پرسش ۱ــ۴

با استفاده از نمودار شکل ۱ــ۴۴ تعیین کنید که آستانه‌ی شنوایی و دردناکی در بسامد ۱۰،۰۰۰ هرتز تقریباً چقدر 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 معنی آن نیست که بلندی صوت با شدت آن نسبت مستقیم دارد ؛ پس اگر شدت صوت دو برابر شود، بلندی‌صدایی که احساس می‌کنیم دو برابر نمی‌شود. در جدول ۱ــ۳ می‌بینید که شدت صوت در غرش هواپیما $۱۰^{۲}\ W/m^{۲}$ و شدت صوت در گفت‌وگوی بین دو نفر $۱۰^{-۸}\ W/m^{۲}$ است ؛ یعنی شدت غرش هواپیمای جت $۱۰^{۱۰}$ برابر شدت گفت‌وگو است. ولی می‌دانید که ما غرش هواپیما را هیچ‌گاه $۱۰^{۱۰}$ برابر بلندتر از گفت‌وگوی دو نفر احساس نمی‌کنیم. به این علت به تعریف **تراز شدت صوت** که درک انسان را از بلندی صوت بیان می‌کند نیاز داریم :

تراز شدت یک صوت عبارت است از لگاریتم (در پایه ده) نسبت شدت آن صوت به شدت صوت مبنا. تراز شدت صوت را با β نشان می‌دهند و یکای آن را به افتخار **بل** فیزیک‌دان امریکایی

مخترع تلفن، بل (B) و دسی‌بل (dB) نام‌گذاری کرده‌اند. هر بل برابر ده دسی‌بل است.

$$\beta = \log \frac{I}{I_0} \quad \text{بل (B)} \qquad (۳۱_۱)$$

$$\beta = ۱۰\log \frac{I}{I_0} \quad \text{دسی‌بل (dB)} \qquad (۳۲_۱)$$

I_0 شدت صوت مبنا است که برابر با آستانه‌ی شنوایی گوش سالم در بسامد ۱۰۰۰ هرتز ($۱۰^{-۱۲}\ W/m^۲$) در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۱ــ۳ شدت پاره‌ای از صوت‌ها برحسب دسی‌بل بیان شده است.

مثال ۱ــ۷

در جدول ۱ــ۳ شدت صوت آستانه‌ی دردناکی (برای بسامد ۱۰۰۰ Hz) $۱ W/m^۲$ ذکر شده است. تراز شدت صوت را برای آن به‌دست آورید.

پاسخ

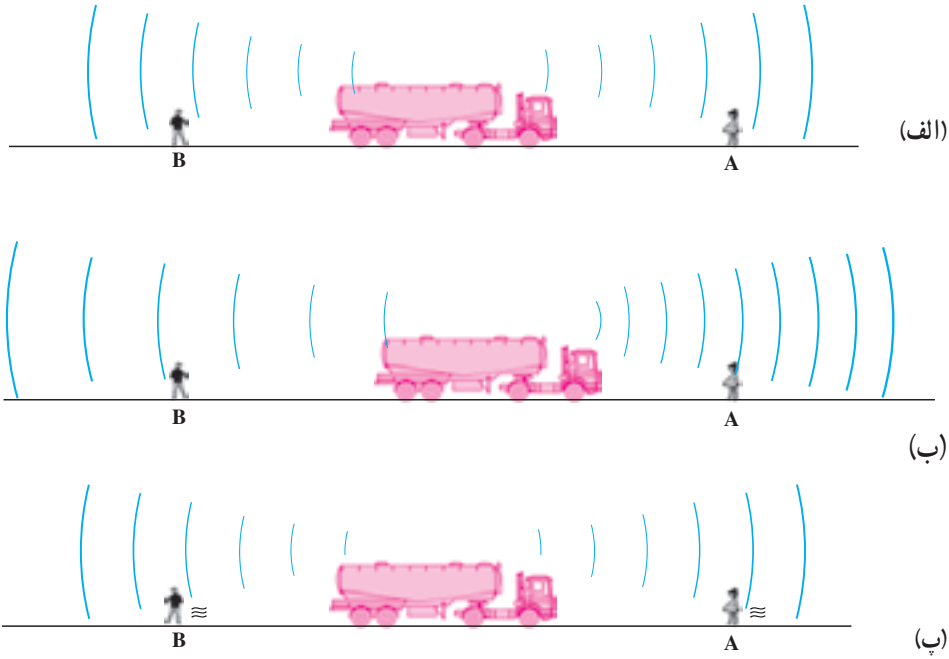
با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۳۲ داریم :

$$\beta = ۱۰\log \frac{I}{I_0} = ۱۰\log \frac{۱}{۱۰^{-۱۲}} = ۱۲۰\ dB$$

۱ــ۹ــ اثر دوپلر

آیا تاکنون توجه کرده‌اید که وقتی یک ماشین آتش‌نشانی یا آمبولانس آژیرکشان عبور می‌کند، صوت آن هنگامی که به شما نزدیک می‌شود با صوت آن هنگامی که از شما دور می‌شود متفاوت است؟ یا هنگامی که با ماشین در جاده حرکت می‌کنید، صدای بوق ماشینی که نزدیک می‌شود، با صدای بوق آن در هنگام دورشدن تفاوت دارد؟ برای بررسی این پدیده ماشینی را، مطابق شکل ۱ــ۴۵، در نظر بگیرید که دو ناظر A و B در جلو و پشت آن قرار دارند. در ابتدا فرض کنید که هم ناظرهای A و B و هم ماشین آتش‌نشانی، که آژیر می‌کشد، ساکن‌اند (شکل ۱ــ۴۵ــالف). این ماشین یک موج صوتی با بسامد f_s و دوره‌ی T_s گسیل می‌کند. جبهه‌های موج مربوط به (مثلاً) قله‌های این صوت (بیشینه‌ی تراکم) نیز در شکل ۱ــ۴۶ــ الف نشان داده شده‌اند.

اگر طول موج صوت را در هوا، هنگامی که چشمه ساکن است، با λ_s نشان دهیم داریم :



شکل ۱ــ۴۵

$$\lambda_s = vT_s = \frac{v}{f_s} \qquad (۱ــ۳۳)$$

که در آن v سرعت صوت در هواست.

اکنون دو حالت زیر را در نظر می‌گیریم.

الف : چشمه‌ی صوت به ناظر ساکن A نزدیک و از ناظر ساکن B دور می‌شود. ب : ناظر A به چشمه‌ی ساکن (ماشین آتش‌نشان) نزدیک و یا از آن دور می‌شود. هر یک از این دو حالت را بررسی می‌کنیم :

الف : چشمه‌ی صوت با سرعت v_s به ناظر A نزدیک می‌شود. در این حالت چشمه در بازه‌ی زمانی بین گسیل یک جبهه‌ی موج و جبهه‌ی موج بعدی، مسافت v_sT_s را طی می‌کند. یعنی، همان‌طور که در شکل ۱ــ۴۵ ــ ب نشان داده شده است، طول موج صوتی که به طرف ناظر A در حرکت است به اندازه‌ی v_sT_s از λ_s کوتاهتر است. پس، اگر طول موج این صوت را در هوا با λ_o نشان دهیم داریم :

$$\lambda_o = \lambda_s - v_sT_s \qquad (۱ــ۳۴)$$

بسامد این صوت را با f_o نمایش می‌دهیم یعنی، ناظر ساکن، صوت را با بسامد f_o می‌شنود.

اکنون می‌توان f_o را، با استفاده از رابطه‌ی طول موج و بسامد $(f_o = \frac{v}{\lambda_o})$ به دست آورد :

$$f_o = \frac{v}{\lambda_s - v_s T_s}$$

که با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۳۳ به‌صورت زیر درمی‌آید :

$$f_o = \frac{v}{\frac{v}{f_s} - v_s T_s} = \frac{v}{v - v_s} f_s \qquad (۱ــ۳۵)$$

مثال ۱ــ۸

یک خودروی پلیس در حالی که صوتی را با بسامد ۴۰۰۰Hz گسیل می‌کند با سرعت ۷۲ km/h به یک عابر ساکن نزدیک می‌شود ؛ بسامد صوتی را که عابر می‌شنود به‌دست آورید. سرعت صوت را در هوا ۳۴۰ m/s فرض کنید.

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۳۴ داریم :

$$f_o = \frac{v}{v - v_s} f_s$$

در این رابطه $v = ۳۴۰ m/s$ ، $v_s = ۷۲ km/h = ۲۰ m/s$ و $f_s = ۴۰۰۰ Hz$

است. درنتیجه :

$$f_o = \frac{۳۴۰}{۳۴۰ - ۲۰}(۴۰۰۰) = ۴۲۵۰ Hz$$

در همین حال، ماشین آتش‌نشانی از ناظر B دور می‌شود. در این صورت، همان‌طور که در شکل ۱ــ۴۵ــ ب نشان داده شده است، طول موج صوتی که به طرف ناظر B در حرکت است به اندازه‌ی $v_s T_s$ از λ_s بلندتر است (چرا؟). یعنی :

$$\lambda_o = \lambda_s + v_s T_s$$

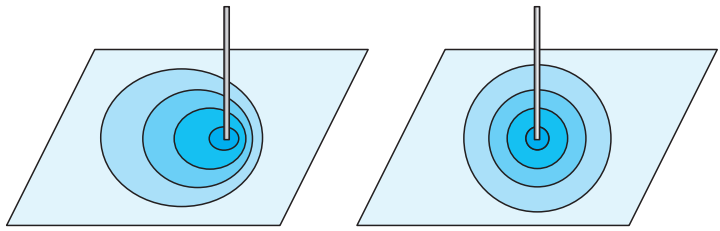
و برای بسامد صوتی که ناظر B می‌شنود، رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$f_o = \frac{v}{v + v_s} f_s \qquad (۱ــ۳۶)$$

ملاحظه می‌شود هنگامی که چشمه به طرف ناظر در حرکت است، بسامد صوتی که ناظر می‌شنود بیش‌تر از بسامد صوتی است که چشمه‌ی ساکن ایجاد می‌کند ؛ و بر عکس، در حالتی که چشمه از ناظر دور می‌شود، بسامد صوتی که ناظر می‌شنود کمتر از بسامد صوتی است که چشمه‌ی

ساکن ایجاد می‌کند. این تغییر بسامد، هم در حالتی که چشمه ساکن است و ناظر حرکت می‌کند (حالت ب) و هم در حالتی که هر دو حرکت می‌کنند رخ می‌دهد. به این تغییر بسامد که از حرکت چشمه، ناظر یا هر دو ناشی می‌شود اثر **دوپلر** می‌گویند.

دیدیم هنگامی که چشمه‌ی صوت در حرکت است، طول موج صوت در جلوی چشمه کوتاه‌تر و در پشت چشمه بلندتر از طول موج صوت در حالتی است که چشمه‌ی موج ساکن باشد. این پدیده در مورد موج‌های مکانیکی دیگر نیز رخ می‌دهد. شکل ۱ــ۴۶ــ الف میله‌ای را نشان می‌دهد که در بازه‌های زمانی یکسان روی سطح آب ضربه می‌زند و جبهه‌های موج دایره‌ای ایجاد می‌کند. در شکل ۱ــ۴۶ــ ب میله، در حین حرکت، بر روی سطح آب ضربه می‌زند. ملاحظه می‌شود که طول موج در جلوی میله کوتاه‌تر و در پشت آن بلندتر از طول موجی است که میله‌ی ساکن ایجاد می‌کند.



ب الف

شکل ۱ــ۴۶

تمرین ۱ــ۵

در مثال ۱ــ۸ فرض کنید که خودروی پلیس با همان سرعت از عابر دور می‌شود. عابر چه بسامدی را می‌شنود؟

ب : ناظر A با سرعت v_o به چشمه‌ی ساکن نزدیک می‌شود (شکل ۱ــ۴۵ــ پ). در این حالت، چون چشمه ساکن است، طول موج صوتی که ایجاد می‌کند برابر λ_s است، و چون ناظر با سرعت v_o به سوی آن در حرکت است، صوت با سرعت $v + v_o$ به او نزدیک می‌شود. درنتیجه، بسامد صوتی که ناظر A می‌شنود، با استفاده از رابطه‌ی $f = \frac{v}{\lambda}$ برابر خواهد بود با :

$$f_o = \frac{v + v_o}{\lambda_s}$$

که با توجه به رابطه‌ی ۱ــ۳۳ داریم :

$$f_o = \frac{v + v_o}{\frac{v}{f_s}} = \frac{v + v_o}{v} f_s \qquad (۳۷_۱)$$

یعنی، در این حالت، بسامد صوتی که ناظر A می‌شنود بیش‌تر از بسامد صوتی است که چشمه‌ی ساکن ایجاد می‌کند.

حال اگر ناظر B با سرعت v_o از چشمه‌ی ساکن دور شود، در این حالت نیز طول موج صوت برابر λ_s است صوت با سرعت $v - v_o$ به ناظر نزدیک می‌شود.

درنتیجه، بسامد صوتی که ناظر می‌شنود، با انجام محاسباتی نظیر حالت قبل، از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$f_o = \frac{v - v_o}{v} f_s \qquad (۳۸_۱)$$

ملاحظه می‌شود که در این حالت بسامد صوتی که ناظر A می‌شنود، کمتر از بسامد صوتی است که چشمه‌ی ساکن ایجاد می‌کند.

تمرین ۱ــ۶

شخصی یک سوت را با بسامد ۷۰۰ هرتز به صدا درمی‌آورد. سرنشین خودرویی که با سرعت ۳۶ km/h، الف : به او نزدیک می‌شود. ب : از او دور می‌شود، چه بسامدی را می‌شنود؟

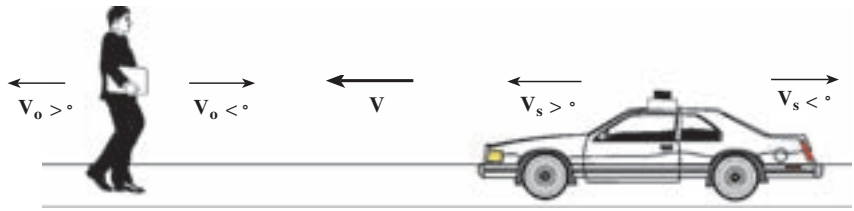
پرسش ۱ــ۵

در رابطه‌ی ۱ــ۳۸، اگر $v_o > v$ باشد، f_o منفی می‌شود. این نتیجه را چگونه می‌توان تحلیل کرد؟

در حالت کلی که چشمه‌ی صوت و ناظر هر دو در حرکت‌اند، بسامدی که ناظر می‌شنود از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$f_o = \frac{v - v_o}{v - v_s} f_s \qquad (۳۹_۱)$$

در این رابطه، v، سرعت صوت به طرف ناظر را مثبت فرض کرده‌ایم. علامت v_o و v_s در مقایسه با v مشخص می‌شود. اگر v_o یا v_s با v هم‌جهت باشند، مثبت و در غیر این صورت منفی خواهند بود (شکل ۱ــ۴۷).



شکل ۱ــ۴۷

تمرین ۱ــ۷

با توجه به قرارداد بالا، رابطه‌های ۱ــ۳۵، ۱ــ۳۶، ۱ــ۳۷ و ۱ــ۳۸ را از رابطه‌ی ۱ــ۳۹ به‌دست آورید.

تمرین‌های فصل اول

۱ــ جرم یک سیم پیانو به طول ۰/۸ متر برابر ۶ گرم و نیروی کشش آن ۴۳۲N است. این سیم به گونه‌ای مرتعش می‌شود که در طول آن، دو شکم تشکیل می‌شود ؛ بسامد صوتی که ایجاد می‌شود، محاسبه کنید. بسامد اصلی این سیم چند هرتز است؟

۲ــ در سطح آب درون یک تشتک دو چشمه‌ی موج، S_1 و S_2 ، ارتعاش‌هایی با بسامد ۲۰Hz ایجاد می‌کنند. فاصله‌ی یک نقطه‌ی M در سطح آب از دو چشمه $d_1 = 12/5cm$ و $d_2 = 50cm$ است. اگر سرعت انتشار موجود در سطح آب ۵ m/s باشد، دو موجی که با هم به این نقطه می‌رسند، نسبت به هم در چه وضعی خواهند بود؟

۳ــ انرژی جزئی از طناب به جرم m از رابطه‌ی $E = \frac{1}{2}m\omega^2A^2$ به دست می‌آید. نشان دهید اگر سرعت انتشار در طناب برابر v باشد، انرژی موج در طولی از طناب که برابر یک طول موج است از رابطه‌ی $E = 2\pi^2\mu vfA^2$ به دست می‌آید.

اگر دامنه‌ی موج 5cm و بسامد آن 4Hz، سرعت انتشار 20m/s و جرم واحد طول طناب

$۰/۲ kg/m$ باشد، انرژی موج را در یک طول موج محاسبه کنید. ($\pi^۲ \simeq ۱۰$)

۴ــ کدام یک از عامل‌های زیر بر سرعت صوت در هوا مؤثر است؟

الف : شکل موج ب : دامنه‌ی موج پ : بسامد موج ت : دمای هوا

۵ــ آزمایشی برای اندازه‌گیری سرعت صوت در آب طراحی کنید.

۶ــ دلفین، مانند خفاش، از خود فراصوت گسیل می‌کند. طول موج صوت دلفین با بسامد $۴\times ۱۰^۵ Hz$ در آب چه‌قدر است؟

۷ــ ناظری در سطح زمین ایستاده است. صدای رعد ۵ ثانیه پس از مشاهده‌ی برق به گوش او می‌رسد. اگر دمای هوا $۲۷^\circ C$ باشد، فاصله‌ی ناظر از محلّ ایجاد رعد و برق چه‌قدر است؟

۸ــ دانش‌آموزی بین دو صخره‌ی قائم ایستاده است و فاصله‌ی او از صخره‌ی نزدیک‌تر ۴۸۰ متر است. دانش‌آموز فریاد می‌زند و اوّلین پژواک صدای خود را پس از ۳ ثانیه و صدای پژواک دوم را ۲ ثانیه بعد از پژواک اول می‌شنود.

الف : سرعت صوت در هوا را به دست آورید.

ب : فاصله‌ی بین دو صخره را محاسبه کنید.

۹ــ یک انتهای لوله‌ای صوتی، باز و انتهای دیگر آن، بسته است. الف : طول لوله برای این که هوای داخل لوله در بسامد اصلی $۶۰ Hz$ به تشدید درآید. چه‌قدر است؟ ب : با رسم شکل، هماهنگ اصلی و هماهنگ‌های سوم و پنجم آن را نمایش دهید. پ : طول موج صوت اصلی و هماهنگ‌های سوم و پنجم آن را تعیین کنید. (سرعت صوت را $۳۴۰ m/s$ در نظر بگیرید.)

۱۰ــ تمرین ۹ را در حالتی که هر دو انتهای لوله‌ی صوتی باز است، حل کنید.

۱۱ــ طول یک لوله‌ی صوتی که هر دو انتهای آن باز است، $۱/۷ m$ است. بسامد هماهنگ سوم این لوله را محاسبه کنید. (سرعت صوت را $۳۴۰ m/s$ در نظر بگیرید.)

۱۲ــ یک چشمه‌ی صوت، موج‌های کروی در هوا گسیل می‌کند. الف : نسبت شدت صوت در دو نقطه را که فاصله‌ی آن‌ها از چشمه‌ی صوت $d_۱$ و $۲d_۱$ است، محاسبه کنید. ب : کاهش شدت صوت گسیل شده از چشمه عملاً بیش‌تر از آن است که در قسمت (الف) به دست می‌آید. علت چیست؟

۱۳ــ دو نفر به فاصله‌های $d_۱$ و $d_۲$ از یک چشمه‌ی صوت ایستاده‌اند. تراز شدت صوت برای این دو نفر به ترتیب $۲۰ dB$ و $۱۰ dB$ است. نسبت $\frac{d_۲}{d_۱}$ را حساب کنید.

۱۴ــ در فاصله‌ی $۲۰ m$ از چشمه‌ی صوتی تراز شدت صوت $۶۰ dB$ 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؟

۱۵ــ دو قطار با سرعت یکسان ۳۴m/s به طرف یک‌دیگر در حرکت‌اند، یکی از آن‌ها صوتی را با بسامد ۵۰۰Hz گسیل می‌کند. بسامد صوتی که مسافر قطار دیگر می‌شنود، چه‌قدر است؟ (سرعت صوت را ۳۳۴m/s فرض کنید.)

۱۶ــ یک ماشین آتش‌نشانی با سرعت ۴۰m/s به یک اتومبیل که با سرعت ۲۰m/s در حرکت است، نزدیک می‌شود و از آن سبقت می‌گیرد. بسامد صوتی را که راننده‌ی اتومبیل می‌شنود، در دو حالت زیر حساب کنید :

الف : قبل از رسیدن ماشین آتش‌نشانی به اتومبیل

ب : بعد از عبور ماشین آتش‌نشانی از آن. بسامد آژیر ماشین آتش‌نشانی ۸۵۵Hz و سرعت صوت در هوا ۳۴۰m/s است.

۱۷ــ یک چشمه‌ی صوت با سرعت ۳۰m/s در حرکت است. بسامد چشمه‌ی صوت ۶۰۰Hz و سرعت صوت در هوا ۳۳۰m/s است. طول موج صوت را در جلو و عقب این چشمه حساب کنید.

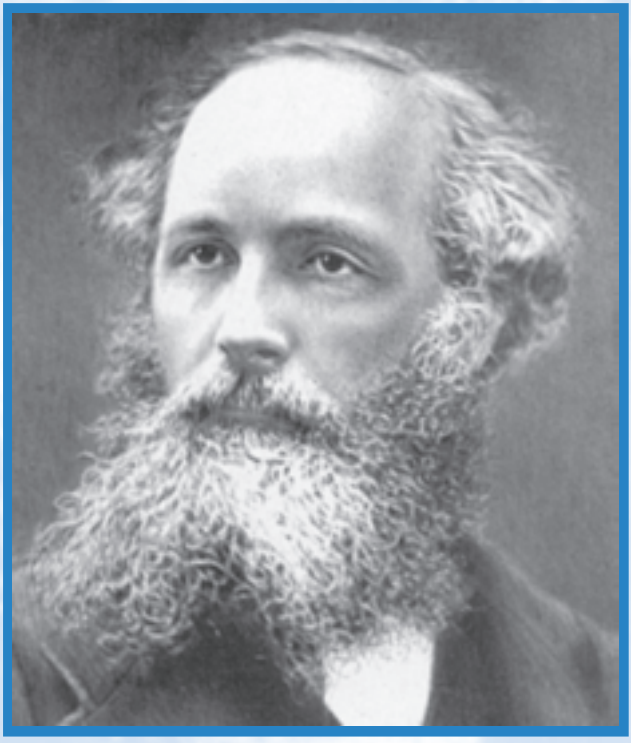
۱۸ــ خودرویی با سرعت ۷۲km/h در جاده‌ای در حال حرکت است. صدای آژیر خودرو با بسامد ۶۸۰Hz به صخره‌ای واقع در جلوی مسیر خودرو برخورد می‌کند. صوت بازتاب شده با چه بسامدی به گوش راننده می‌رسد؟ (سرعت صوت را ۳۴۰m/s در نظر بگیرید.)

۱۹ــ یک پرده صماخ به قطر ۰/۷۵ سانتی‌متر به مدت ۲ ساعت صوتی با تراز شدت ۹۰dB را جذب می‌کند. در این مدت، پرده‌ی گوش چه مقدار انرژی بر حسب ژول جذب کرده است؟

۲۰ــ سرعت صوت در بافت‌های بدن تقریباً مساوی سرعت صوت در آب دریاست، (۱۵۰۰m/s) قسمتی از یک موج فراصوت که به داخل خون فرستاده می‌شود، به وسیله‌ی گلبول‌های خون بازتابیده می‌شود. اگر بسامد پژواک برگشتی ۴۰۰Hz بیش‌تر از بسامد ۲MHz اولیه باشد، سرعت حرکت خون چه مقدار است؟ (توجه کنید که در این‌جا دو جابه‌جایی دوپلری وجود دارد.)

۲

موج‌های الکترومغناطیسی



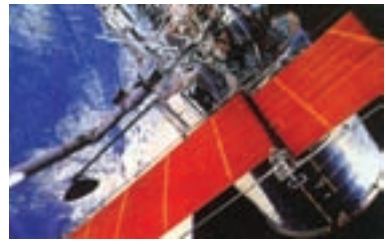
جیمز کلارک ماکسول

(۱۸۷۹ـ۱۸۳۱م)

موج های الکترو مغناطیسی

نگاهی به فصل: آیا می‌دانید انرژی حیاتی مورد نیاز گیاهان، جانوران، انسان و ... از چه طریق و چگونه به زمین می‌رسد؟

آیا می‌دانید رادیو، تلویزیون، تلفن، بی‌سیم، ماهواره‌ها و ... بر چه اساسی کار می‌کنند؟

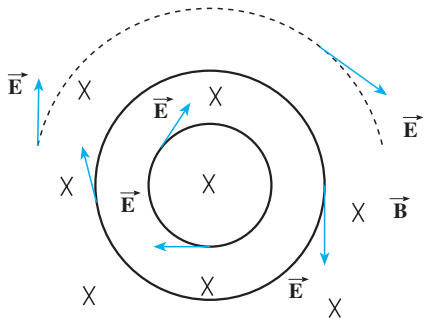


شکل ۲ــ۱

هر موجود زنده‌ای در زمین به انرژی خورشید نیاز دارد، به‌طوری که بدون انرژی خورشید حیات روی کره‌ی زمین از بین می‌رود. این انرژی از طریق موج‌های الکترومغناطیسی به زمین می‌رسد و در تمام ارتباطات راه دور این موج‌ها به کار گرفته می‌شوند. با استفاده از سرعت بالای این امواج می‌توان خبر رخ دادن هر حادثه را کم‌تر از چند دهم ثانیه به هر نقطه از زمین رساند.

مایکل فارادی دانشمند انگلیسی (۱۸۶۷ــ۱۷۹۱میلادی) و جیمز کلارک ماکسول فیزیک‌دان اسکاتلندی (۱۸۷۹ــ۱۸۳۱میلادی) نقش عمده‌ای در کشف پدیده‌های الکترومغناطیسی و مطالعه بر روی آن‌ها داشتند.

در فیزیک ۳ و آزمایشگاه با قانون فارادی آشنا شدیم و دیدیم که اگر شار مغناطیسی گذرنده از یک مدار بسته تغییر کند، نیروی محرکه‌ای را در مدار ایجاد می‌کند که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار متناسب است. مثلاً اگر در شکل ۲ــ۲ میدان مغناطیسی $\vec{B}$ تغییر کند، در اثر تغییر شار یک نیروی محرکه در مدار القا می‌شود. در واقع و به‌طور عمیق‌تر می‌توان گفت که در اثر تغییر میدان مغناطیسی یک میدان الکتریکی القایی در فضا ایجاد می‌شود که خط‌های آن در این شکل نشان



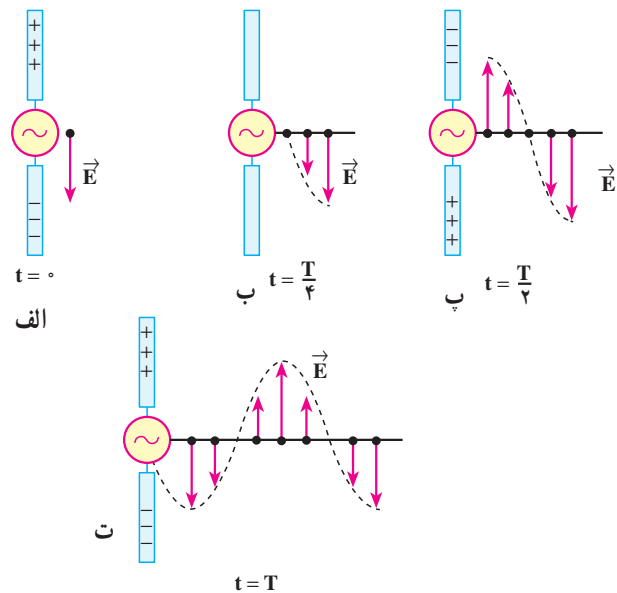
شکل ۲ــ۲

داده شده‌اند این میدان حتی هنگامی که مدار نیز وجود ندارد ایجاد می‌شود، یعنی میدان الکتریکی را تنها بارهای الکتریکی تولید نمی‌کنند، بلکه در اثر تغییر میدان مغناطیسی نیز به‌وجود می‌آید. در فیزیک ۳ و آزمایشگاه همچنین دیدیم که، هنگامی که میدان الکتریکی داخل یک رسانا وجود دارد، در آن اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد می‌کند درنتیجه می‌توان گفت، «نیروی محرکه‌ی القایی از این میدان الکتریکی القایی حاصل می‌شود.» ماکسول پیش‌بینی کرد **همان‌طورکه در اثر تغییر میدان مغناطیسی در فضا، میدان الکتریکی تولید می‌شود، در اثر تغییر میدان الکتریکی نیز میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود.** یعنی علاوه‌بر جریان الکتریکی و آهنربا تغییر میدان الکتریکی نیز می‌تواند منشأ میدان مغناطیسی باشد. ماکسول با توجه به کارهای اورستد، آمپر، هانری و فارادی مبانی علم الکتریسیته و مغناطیس را تدوین کرد و وجود موج‌های الکترومغناطیسی و انتشار آن‌ها در فضا را پیش‌بینی کرد. بعدها هرتز فیزیک‌دان آلمانی (۱۸۹۴ـ۱۸۵۷میلادی) وجود این موج‌ها را به‌طور تجربی نشان داد.

۲ـ۱ـ چگونگی تشکیل موج‌های الکترومغناطیس توسط یک آنتن

موج‌های الکترومغناطیس از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تشکیل شده‌اند. **عامل اصلی ایجاد موج‌های الکترومغناطیسی، ذرات باردار شتاب‌دارند** یعنی وقتی ذره‌ی بارداری شتاب‌دار می‌شود بخشی از انرژی خود را به‌صورت موج‌های الکترومغناطیسی گسیل می‌کند، گسیل موج‌های الکترومغناطیسی توسط اجسام را **تابش** می‌نامند.

در آنتن، یک منبع ولتاژ متناوب برای ایجاد نوسان بار الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد و این شیوه‌ای مرسوم برای شتاب‌دارکردن ذرات است. از آنتن‌ها به‌عنوان چشمه‌ی موج‌های الکترومغناطیس در ایستگاه‌های رادیویی، مخابراتی و ... استفاده می‌شود. شکل ۲ـ۳ نحوه‌ی تولید یک موج الکترومغناطیس را در یک آنتن



شکل ۲ـ۳ـ میدان الکتریکی ناشی از نوسان بارهای الکتریکی در آنتن با سرعت نور از آنتن دور می‌شود.

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 $t = ۰$ بار روی میله‌ی بالایی بیشینه و مثبت و روی میله‌ی پایینی بیشینه و منفی است. سپس بار این میله‌ها کاهش می‌یابد و در لحظه‌ی $t = \frac{T}{۴}$ به صفر می‌رسد (شکل ۲ــ۳ــ 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 $t = \frac{T}{۲}$ به یک مقدار بیشینه برسد (شکل ۲ــ۳ــ پ). تغییر بار میله‌ها به همین ترتیب ادامه می‌یابد.

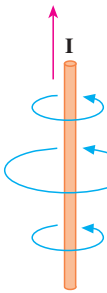
در زمان $t = ۰$ بار مثبت در میله‌ی بالایی و بار منفی در میله‌ی پایینی بیشینه است (شکل ۲ــ۳ــالف). پس میدان الکتریکی حاصل از این بارها نیز بیشینه است. میدان الکتریکی ایجاد شده در نزدیکی آنتن، در این لحظه، در این شکل نشان داده شده است.

با کاهش بار روی میله‌ها، شدت میدان الکتریکی در نزدیکی میله‌ها، کاهش می‌یابد و میدان الکتریکی بیشینه‌ی رو به پایینی که در لحظه‌ی $t = ۰$ تولید شده بود از میله دور می‌شود. هنگامی که بارهای مثبت و منفی روی میله‌ها صفر است (مانند شکل ۲ــ۳ــ ب) میدان الکتریکی نیز صفر است. این وضعیت $\frac{۱}{۴}$ دوره ($t = \frac{T}{۴}$) بعد از شروع نوسان پیش می‌آید. با ادامه‌ی این عمل، میله‌ی بالایی، بعد از زمان $t = ۲\frac{T}{۴}$، دارای بیش‌ترین مقدار بار منفی و میله‌ی پایینی دارای بیش‌ترین بار مثبت می‌شود. در این حالت میدان الکتریکی ایجاد شده رو به بالاست (شکل ۲ــ۳ــ پ) و با ادامه‌یافتن نوسان بار الکتریکی روی میله‌ها میدان الکتریکی مطابق شکل ۲ــ۳ــ ت تشکیل می‌شود. در تمام این مراحل میدان الکتریکی نزدیکِ آنتن با نوسان بار الکتریکی روی آن هم فاز است، یعنی، جهت میدان الکتریکی در زمانی که 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 ۲ــ۳ الگویی 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 به‌صورت دایره‌هایی هم‌مرکز به دور آنتن‌اند (شکل ۲ــ۴). این خط‌ها بر میدان الکتریکی تولید شده در هر نقطه عمودند. با عوض‌شدن جهت جریان، جهت میدان مغناطیسی نیز وارونه می‌شود و با تغییر جریان نسبت به زمان، میدان مغناطیسی نیز همانند میدان الکتریکی در اطراف آنتن تغییر می‌کند.



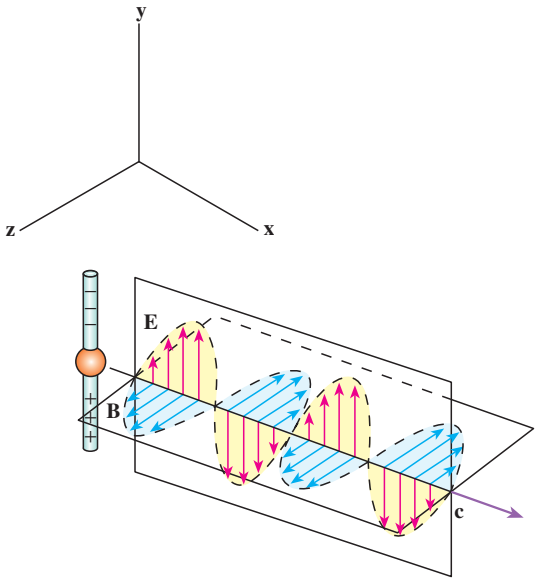
شکل ۲ــ۴ــ چگونگی تشکیل خطوط میدان مغناطیسی در اطراف یک آنتن که از آن جریان الکتریکی متغیر می‌گذرد.

تا این‌جا دیدیم که نوسان بارهای الکتریکی روی میله‌ها، در فضا میدان الکتریکی و مغناطیسی متغیر تولید می‌کند. اما علاوه‌بر این‌ها دو پدیده‌ی دیگر نیز رخ می‌دهد. همان‌طورکه دیدیم :

الف : میدان مغناطیسی متغیر با زمان، میدان الکتریکی تولید می‌کند.

ب : میدان الکتریکی متغیر با زمان ــ همان‌طور که ماکسول پیش‌بینی کرده بود ــ میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند.

این میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی القایی هم‌فازند ؛ یعنی، در هر نقطه هر دو میدان هم‌زمان با هم بیشینه یا کمینه می‌شوند (شکل ۲ــ۵). علاوه‌بر این میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر یک‌دیگر و هر دوی آن‌ها بر راستای حرکت موج عمودند.



شکل ۲ــ۵ــ 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.

درنتیجه‌ی این دو پدیده و مواردی که در بالا ذکر شد، یک موج الکترومغناطیسی ایجاد می‌شود که در فضا منتشر می‌شوند(شکل ۲ــ۵) .

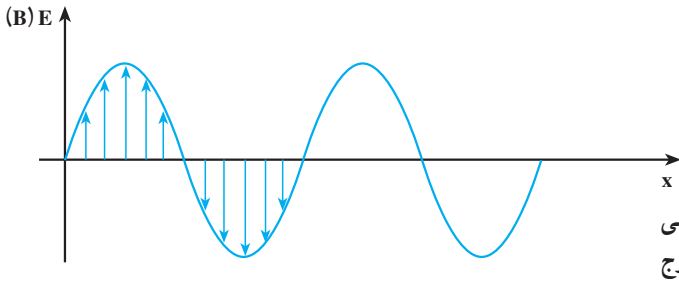
موج‌های الکترومغناطیسی نیز، مانند موج‌های مکانیکی، در زمان و مکان تغییر می‌کنند، با این تفاوت که در موج‌های مکانیکی ذره‌های تشکیل‌دهنده‌ی محیط نوسان می‌کنند و در موج‌های الکترومغناطیسی، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در هر نقطه از فضا به‌طور نوسانی تغییر می‌کنند. همین موضوع سبب

می‌شود که موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار خود الزاماً به محیط مادی نیاز نداشته باشند و در خلأ نیز منتشر شوند.

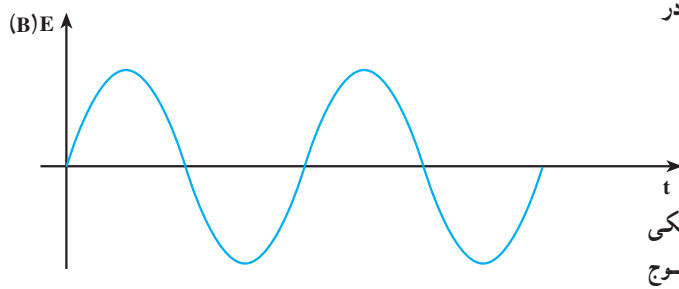
برای بیان چگونگی انتشار موج‌های الکترومغناطیسی نیز می‌توانیم، همان‌طور که در مورد موج‌های مکانیکی انجام دادیم، از نمودارهای میدان‌های الکتریکی (و یا مغناطیسی) برحسب مکان یا زمان استفاده کنیم. ابتدا تغییرات میدان الکتریکی را توصیف می‌کنیم.

یک موج الکترومغناطیسی را در نظر می‌گیریم که در جهت محور x منتشر می‌شود. نمودار میدان الکتریکی برحسب مکان این موج در شکل ۲ــ۶ رسم شده است. این نمودار، میدان الکتریکی را در تمام نقطه‌ها در امتداد محور x و **در یک لحظه** نشان می‌دهد. می‌بینید که در جهت محور x، میدان الکتریکی افزایش می‌یابد تا به یک مقدار بیشینه برسد، سپس کاهش می‌یابد و صفر می‌شود و در ادامه، همین تغییرات در جهت عکس صورت می‌گیرد.

تغییرات میدان الکتریکی در یک نقطه از فضا را نیز می‌توان با استفاده از نمودار میدان الکتریکی برحسب زمان نشان داد. این نمودار در شکل ۲ــ۷ 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 ۲ــ۶ و ۲ــ۷ به دست خواهد آمد.

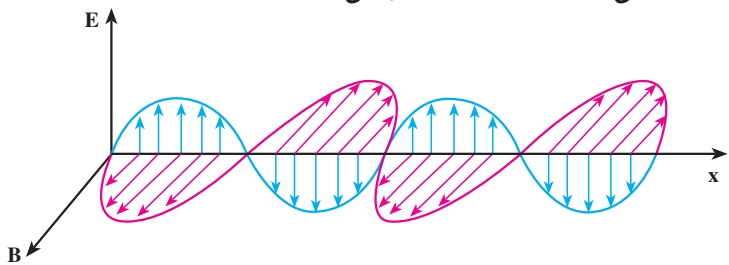


شکل ۲ــ۶ــ نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی) برحسب مکان، یک موج الکترومغناطیسی در امتداد محور x، در یک لحظه از زمان.



شکل ۲ــ۷ــ نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی) برحسب زمان، یک موج الکترومغناطیسی در یک نقطه از محور x.

در شکل ۲ــ۸ نمودارهای میدان الکترومغناطیسی برحسب مکان که در آن هم میدان الکتریکی و هم میدان مغناطیسی نشان داده شده است را می‌بینید.



شکل ۲ــ۸ــ نمودار میدان الکترومغناطیسی برحسب مکان

تعریف‌هایی که قبلاً در مورد موج‌های مکانیکی بیان کردیم، در مورد موج‌های الکترومغناطیسی هم به‌کار می‌روند. مثلاً تعداد نوسان‌های میدان الکتریکی (و یا مغناطیسی) در واحد زمان و در هر نقطه از فضا، **بسامد** و زمانی که طول می‌کشد تا میدان الکتریکی (و یا مغناطیسی) یک نوسان کامل انجام دهد، **دوره** نامیده می‌شود. به همین ترتیب، **طول موج** 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 $v = \lambda f$ به‌دست می‌آید.

پرسش ۲ــ۱

با توجه به شکل ۲ــ۵ توضیح دهید که موج‌های الکترومغناطیسی طولی‌اند یا عرضی؟

۲ــ۲ــ سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی

میدان مغناطیسی و الکتریکی حاصل از جریان نوسانی در یک آنتن به‌طور هم‌زمان به تمام نقاط نمی‌رسد، بلکه با سرعت مشخصی منتشر می‌شوند. ابتدا این میدان‌ها در نقاط نزدیک و سپس به نقاط دورتر می‌رسند. ماکسول نشان داد که سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی در خلأ از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \qquad (۱ــ۲)$$

که در آن ε_0 ضریب گذردهی الکتریکی در خلأ و μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ است. از فیزیک(۳) و آزمایشگاه به یاد دارید که $\varepsilon_0 \simeq ۸/۸۵ \times ۱۰^{-۱۲}\ C^۲/N.m^۲$ و $\mu_0 = ۴\pi \times ۱۰^{-۷}\ T.m/A$ است.

با قرار دادن مقادیر بالا در رابطه‌ی ۲ــ۱ سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیس در خلأ به‌دست می‌آید :

$$c = \frac{۱}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = \frac{۱}{\sqrt{۸/۸۵ \times ۱۰^{-۱۲} \times ۴\pi \times ۱۰^{-۷}}} \simeq ۳ \times ۱۰^{۸}\ m/s$$

که این مقدار برابر سرعت انتشار نور در خلأ است.

۲ــ۳ــ 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 هریک از این ناحیه‌ها تابش به طریق خاصی تولید و آشکار می‌شود. جدول ۲ــ۱ 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 ۲ــ۹ 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.

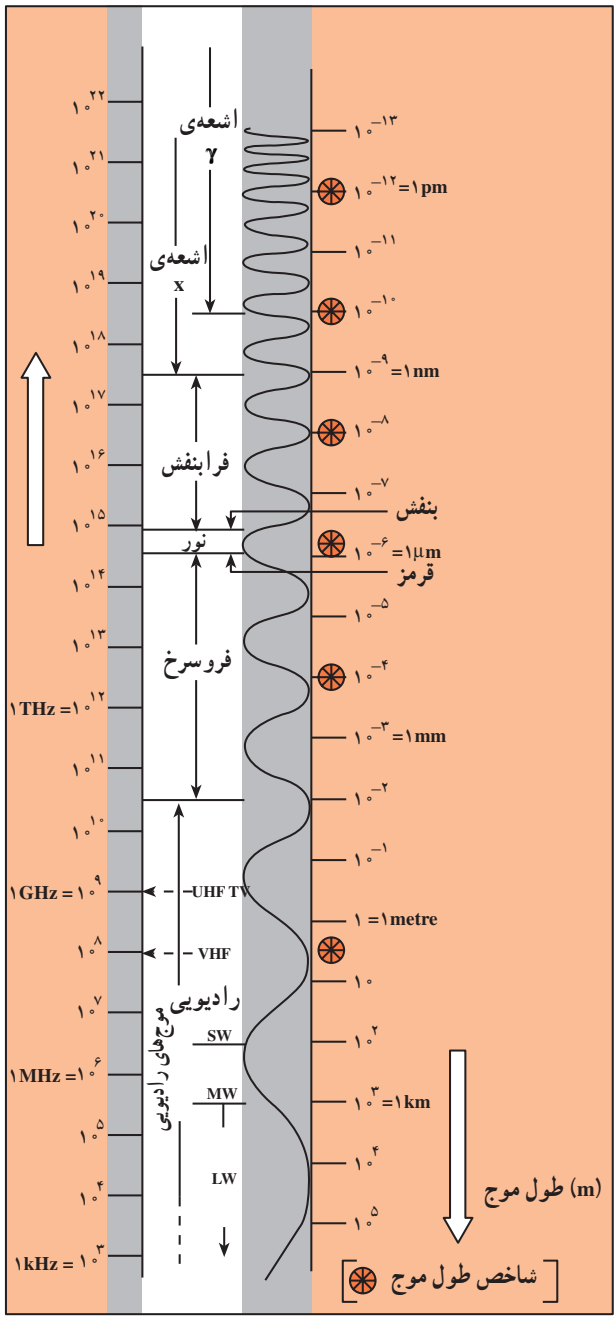
جدول ۲ــ۱ــ نحوه‌ی تولید، آشکارسازی و کاربرد طیف موج‌های الکترومغناطیسی

نام و حدود طول موج	چشمه	وسایل آشکارسازی	بعضی از ویژگی‌های خاص و کاربرد
پرتو گاما (γ) $1Pm = 10^{-12} m$	هسته‌ی مواد رادیواکتیو و پرتوهای کیهانی	شمارش‌گر گایگر ــ مولر و فیلم عکاسی	فوتون‌های با انرژی بسیار بالا و با قدرت نفوذ بسیار زیاد، خیلی خطرناک کاربرد : بافت‌های سرطانی را ازبین می‌برد، برای پیدا کردن ترک در فلزات، برای ضدعفونی‌کردن تجهیزات و وسایل
پرتوی ایکس (X) $100Pm = 10^{-10} m$	لامپ پرتو X	فیلم عکاسی و صفحه‌ی فلوئورسان	فوتون‌های بسیار پرانرژی و با قدرت نفوذ زیاد، خیلی خطرناک کاربرد : استفاده در پرتونگاری، استفاده در مطالعه‌ی ساختار بلورها، معالجه‌ی بیماری‌های پوستی، استفاده در پرتو درمانی
فرابنفش (uv) $10nm = 10^{-8} m$	خورشید، جسم‌های خیلی داغ، جرقه‌ی الکتریکی، لامپ بخار جیوه	فیلم عکاسی، فوتوسل	ویژگی‌ها : توسط شیشه جذب می‌شود، سبب بسیاری از واکنش‌های شیمیایی می‌شود، یاخته‌های زنده را از بین می‌برد. کاربرد : لامپ‌های uv در پزشکی
نور مرئی $0/6\mu m = 6\times10^{-7} m$ (سبز)	خورشید، جسم‌های داغ، لیزرها	چشم، فیلم عکاسی، فوتوسل	ویژگی‌ها : در دیدن اجسام نقش اساسی دارد، برای رشد گیاهان و عمل فتوسنتز نقش حیاتی دارد. کاربرد : در سیستم‌های مخابراتی (لیزر و تارهای نوری) مورد استفاده قرار می‌گیرد.
فروسرخ (IR) $100\mu m = 10^{-4} m$	خورشید، جسم‌های گرم و داغ	فیلم‌های مخصوص عکاسی	ویژگی : هنگامی که جذب می‌شود، پوست را گرم می‌کند. کاربرد : برای گرم‌کردن، برای فیلم‌برداری و عکاسی در مه و تاریکی، عکاسی IR توسط ماهواره‌ها
رادیویی 3m(VHF)	اجاق‌های مایکروویو، آنتن‌های رادیویی و تلویزیونی	رادیو و تلویزیون	کاربرد : در آشپزی، رادیو، تلویزیون، مخابرات ماهواره‌ای و در رادارها برای آشکارسازی هواپیما، موشک و کشتی

پرسش ۲ــ۲

با استفاده از شکل ۲ــ۹ موج‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی را به ترتیب افزایش طول موج، نام ببرید.

در شکل ۲ــ۹ 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 بر عکس بلندترین طول موج مربوط به موج‌های رادیویی است که در حدود 10^{5} m است.



شکل ۲ــ۹ــ طیف موج‌های الکترومغناطیسی

مثال ۲ــ۱

محدوده‌ی طول موج، امواج الکترومغناطیسی مرئی از ۰/۴ میکرون ($1=10^{-6}\,m$ میکرون) مربوط به طول موج بنفش تا ۰/۷ میکرون مربوط به طول موج نور قرمز است. محدوده‌ی بسامد نور مرئی را به‌دست آورید.

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی $c=\lambda f$ داریم :

$$f_{\text{بنفش}}=\frac{c}{\lambda_{\text{بنفش}}}=\frac{3\times10^{8}}{4\times10^{-7}}=7/5\times10^{14}\,Hz$$

$$f_{\text{قرمز}}=\frac{c}{\lambda_{\text{قرمز}}}=\frac{3\times10^{8}}{7\times10^{-7}}\simeq 4/3\times10^{14}\,Hz$$

یعنی گستره‌ی بسامد نور مرئی بین $4/3\times10^{14}\,Hz$ تا $7/5\times10^{14}\,Hz$ است.

فعالیت ۲ــ۱

جمله‌های زیر را کامل کنید.

۱ــ میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر یک دیگر ...

۲ــ میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هر دو بر ..... عمودند بنابراین موج‌های الکترومغناطیسی از نوع موج‌های .....

۳ــ نوسان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با یکدیگر .....

۴ــ موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار نیاز به ..... و انرژی را از محلی به محل دیگر منتقل می‌کنند.

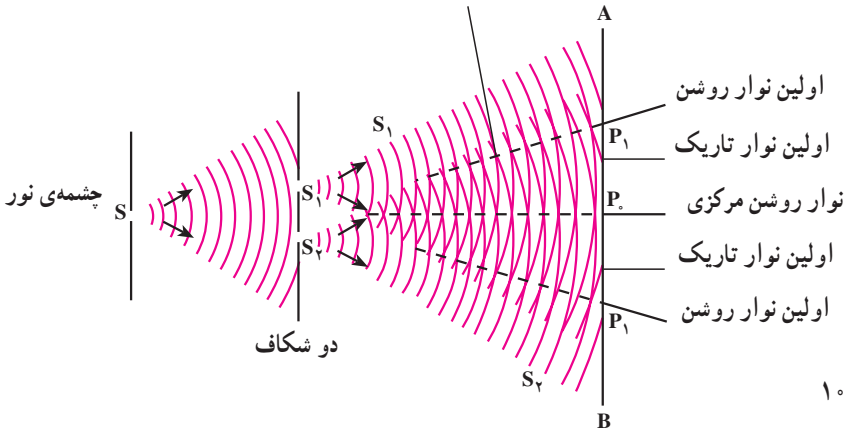
۵ــ همه‌ی موج‌های الکترومغناطیسی با سرعت ..... منتشر می‌شوند.

۲ــ۴ــ 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 به‌وجود 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 ۲ــ۱۰ 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 ۲ــ۱۰

دو موجی که به نقطه‌ی P_0 روی محور تقارن دو شکاف می‌رسند، هم‌فازاند. زیرا آن‌ها دو راه مساوی S_1P_0 و S_2P_0 را تا پرده پیموده‌اند. تداخل این دو موج سازنده است و درنتیجه در محل P_0 روی پرده یک نوار روشن تشکیل می‌شود. این نوار روشن را نوار روشن مرکزی می‌نامیم. برای این که ببینیم در چه شرایطی نوار روشن و در چه شرایطی نوار تاریک تشکیل می‌شود نقطه‌ی P را در شکل ۲ــ۱۱ در نظر می‌گیریم. پرتوهایی که از S_1 و S_2 به این نقطه می‌رسند، دو راه نامساوی S_1P و S_2P را می‌پیمایند. اختلاف فاز پرتوها را می‌توان از روی اختلاف راه آن‌ها تعیین کرد.

$$\Delta\varphi = k(d_2 - d_1) = \frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1)$$

اگر $\Delta\varphi$ مضرب زوجی از π باشد یعنی

$$\Delta\varphi = \pm\ ۲n\pi,\quad n = ۰,۱,\cdots \qquad (۲-۲)$$

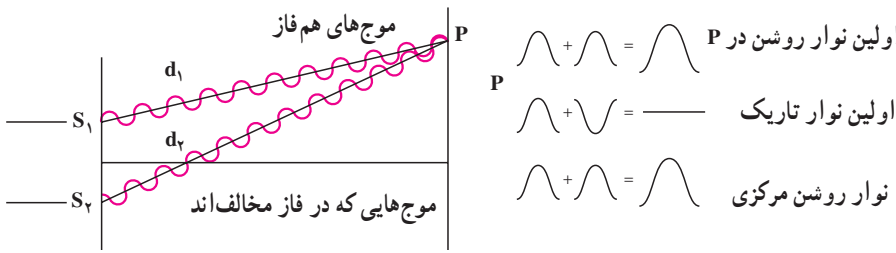
یا :

$$\frac{۲\pi}{\lambda}(d_۲ - d_۱) = \pm ۲n\pi$$

$$d_۲ - d_۱ = \pm n\lambda = \pm\ ۲n\frac{\lambda}{۲}$$

در این صورت دو پرتویی که به پرده می‌رسند هم‌فازاند و تداخل سازنده ایجاد می‌شود و در این نقطه‌ها نوار روشن تشکیل می‌شود. در رابطه‌ی ۲ــ۲ به‌ازای $n = ۰$ ، اختلاف راه و اختلاف فاز صفر است و نوار روشنی که تشکیل می‌شود همان نوار مرکزی است.

به‌ازای $n = ۱$ ، اختلاف فاز ۲π است و اولین نوار روشن در دو طرف نوار مرکزی به‌دست می‌آید و به همین ترتیب می‌توان نوارهای روشن بعدی را به‌ازای $n = ۲,۳,\cdots$ به‌دست آورد.



شکل ۲ــ۱۱

حال اگر $\Delta\varphi$ مضرب فردی از π باشد یعنی :

$$\Delta\varphi = \pm\ (۲m-۱)\pi\ ,\quad m = ۱,۲,\cdots \qquad (۲-۳)$$

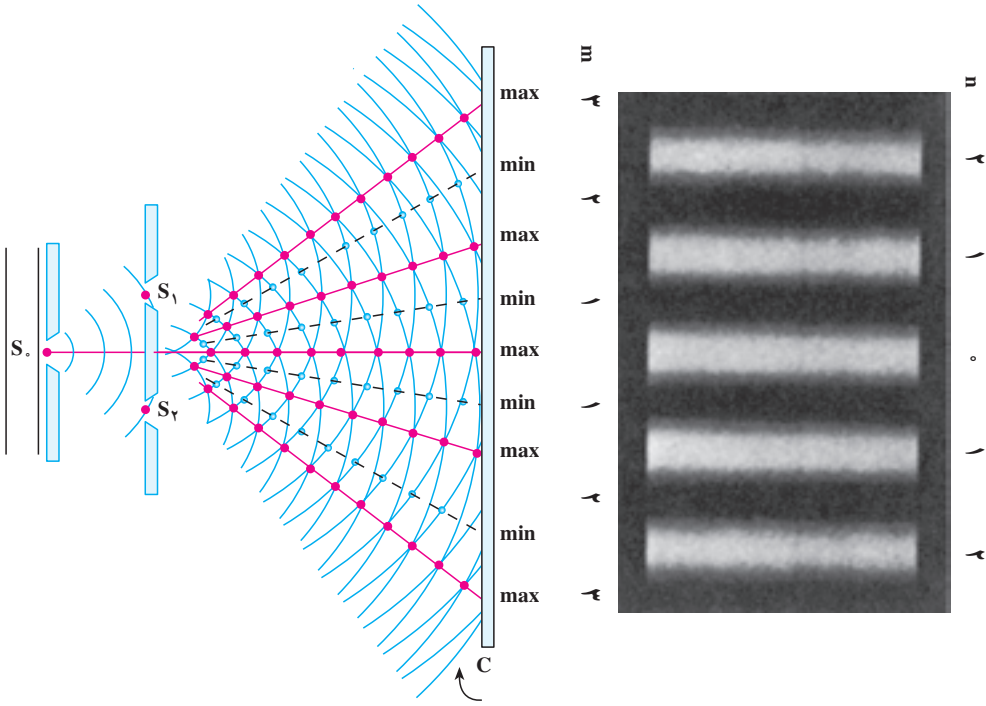
یا :

$$\frac{۲\pi}{\lambda}(d_۲ - d_۱) = \pm(۲m-۱)\pi$$

$$d_۲ - d_۱ = \pm(۲m-۱)\frac{\lambda}{۲}$$

در این صورت دو موجی که به پرده می‌رسند در فاز مخالف هم خواهند بود و تداخل ویرانگر صورت می‌گیرد و درنتیجه در این نقاط نوار تاریک خواهیم داشت. در رابطه‌ی ۲ــ۳، $m = ۱$ 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.

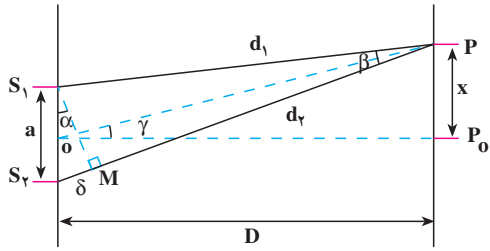
نوارهای روشن و تاریک را که روی پرده تشکیل می‌شوند طرح تداخلی می‌نامند. شکل ۲ــ۱۲ طرح تداخلی دو شکاف یانگ را نشان می‌دهد. در دو طرف شکل، شماره‌ی نوارهای روشن که با مقادیر مختلف n و شماره‌ی نوارهای تاریک که با مقادیر مختلف m داده می‌شوند نیز آمده است.



شکل ۲ــ۱۲

اندازه‌گیری طول موج: با استفاده از آزمایش یانگ می‌توان طول موج نور را اندازه‌گیری کرد. در شکل ۲ــ۱۳ 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 nام 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_2 و PS_1 برابر است با :

$$\delta = S_2M = d_2 - d_1$$



شکل ۲ــ۱۳

اگر فاصله‌ی پرده از صفحه‌ی دو شکاف بسیار بزرگ‌تر از فاصله‌ی دو شکاف یعنی $D >> a$ باشد، زاویه‌ی γ و نیز زاویه‌ی β (بین پرتوهایی که به P می‌رسند) بسیار کوچک خواهند بود و می‌توان

S_1M را عمود بر S_2P و OP در نظر گرفت. در این صورت زاویه‌های α و γ با یکدیگر برابرند، درنتیجه :

$$\tan\alpha = \tan\gamma \quad \text{و} \quad \tan\gamma = \frac{x}{D}$$

چون زاویه‌ی α کوچک است :

$$\tan\alpha = \sin\alpha = \frac{\delta}{a}$$

بنابراین :

$$\frac{x}{D} = \frac{\delta}{a} \qquad (۲ــ۴)$$

برای نوار روشن nام :

$$\frac{x}{D} = \frac{n\lambda}{a} \qquad (۲ــ۵)$$

که از آن رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$\lambda = \frac{xa}{nD} \qquad (۲ــ۶)$$

با اندازه‌گیری، فاصله‌ی نوار روشن از نوار مرکزی می‌توان طول موج را اندازه گرفت.

پرسش ۲ــ۳

به نظر شما اگر آزمایش یانگ را با نور سفید انجام دهیم، طرح تداخلی چگونه خواهد بود؟

مثال ۲ــ۲

آزمایش یانگ را با نور زرد سدیم انجام داده‌ایم. فاصله‌ی دو شکاف یانگ از یکدیگر $a = ۱/۲mm$ و فاصله‌ی شکاف تا پرده ۱/۲m است. اگر فاصله‌ی نوار روشن بیستم از وسط نوار مرکزی ۱۱/۸mm باشد، طول موج نور زرد سدیم چند متر است؟

پاسخ

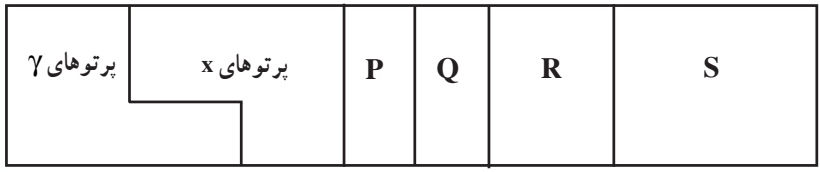
با استفاده از رابطه‌ی ۲ــ۶ داریم :

$$\lambda = \frac{a}{n}\frac{x}{D} = \frac{۱/۲\times۱۰^{-۳}\times۱۱/۸\times۱۰^{-۳}}{۲۰\times۱/۲} \simeq ۵/۹\times۱۰^{-۷}m$$

$$= ۰/۵۹\mu m$$

تمرین‌های فصل دوم

۱ــ شکل ۲ــ۱۴ طیف موج‌های الکترومغناطیسی را با یک مقیاس تقریبی نشان می‌دهد.



شکل ۲ــ۱۴

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؟

۲ــ چهار وجه اشتراک و دو تفاوت برای نور فروسرخ و امواج رادیویی بیان کنید.

۳ــ 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؟

۴ــ الف : از یک ایستگاه رادیویی موج الکترومغناطیسی به طول موج ۷۵m گسیل می‌شود. بسامد این موج را حساب کنید.

ب : موج‌های رادیویی با بسامد ۱۲MHz چه طول موجی دارند؟

۵ــ الف : طول موج نور نارنجی $۶/۴۲\times۱۰^{-۷}\,m$ است، بسامد این نور چند هرتز است؟

ب : بسامد نور قرمز در حدود $۴/۲۸\times۱۰^{۱۴}\,Hz$ است، طول موج این نور در هوا و آب را حساب کنید. (سرعت نور را در هوا $۳\times۱۰^{۸}\,m/s$ و در آب را $۲/۲۵\times۱۰^{۸}\,m/s$ فرض کنید.)

۶ــ گستره‌ی طول موج‌های رادیویی زیر را به‌دست آورید.

الف : باند AM در گستره‌ی بسامدی ۵۴۰ تا ۱۶۰۰ کیلوهرتز

ب : باند FM در گستره‌ی بسامدی ۸۸ تا ۱۰۸ مگاهرتز

۷ــ آزمایش یانگ را با نور تک‌رنگ سبز انجام داده و نوارهای تداخلی بر روی پرده‌ی موازی با سطح شکاف‌ها تشکیل داده‌ایم. برای این‌که 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.

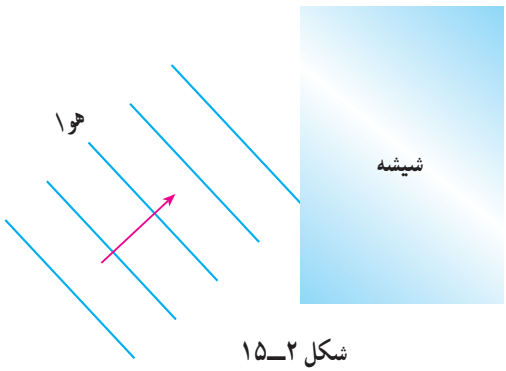
۴) فاصله‌ی دو شکاف را از هم کم کنیم.

۸ــ اگر آزمایش یانگ عیناً در آب انجام گیرد چه تغییری در وضعیت نوارها نسبت به هوا حاصل می‌شود؟ توضیح دهید.

۹ــ یک صافی مقابل چراغ جیوه قرار می‌دهیم، به‌طوری که تمام طول موج‌ها به جز ناحیه‌ی سبز آن جذب می‌شود. با این نور سبز طرح تداخلی آزمایش یانگ را به فاصله‌ی دو شکاف $a = ۰/۶mm$ روی پرده‌ای به فاصله $D = ۲/۵m$ از دو شکاف تشکیل می‌دهیم. اگر فاصله‌ی دو نوار روشن پهلوی هم ۲/۲۷mm باشد، طول موج نور سبز را حساب کنید.

۱۰ــ در آزمایش دو شکاف یانگ، فاصله‌ی دو شکاف ۰/۴mm و فاصله‌ی پرده تا دو شکاف ۸۰cm است. اگر طول موج نور ۰/۶μm باشد فاصله‌ی نوار دهم روشن از نوار مرکزی را حساب کنید.

۱۱ــ در شکل ۲ــ۱۵ موج‌های نور فرودی از هوا وارد شیشه می‌شوند. بعضی از آن‌ها در سطح جدایی دو محیط بازتابیده و بعضی شکسته شده و وارد شیشه می‌شوند. کدام‌یک از کمیت‌های زیر برای موج‌های بازتابیده و موج‌های شکسته شده یکسان است؟



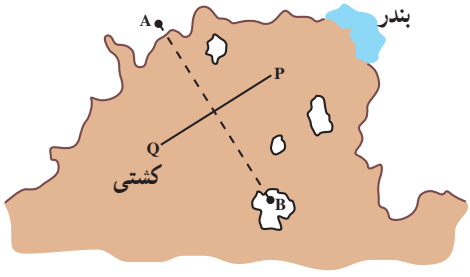
شکل ۲ــ۱۵

الف : سرعت ب : طول موج

پ : امتداد ت : شدت نور

ث : بسامد

۱۲ــ در شکل ۲ــ۱۶ 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 ۱/۵ MHZ است.



شکل ۲ــ۱۶

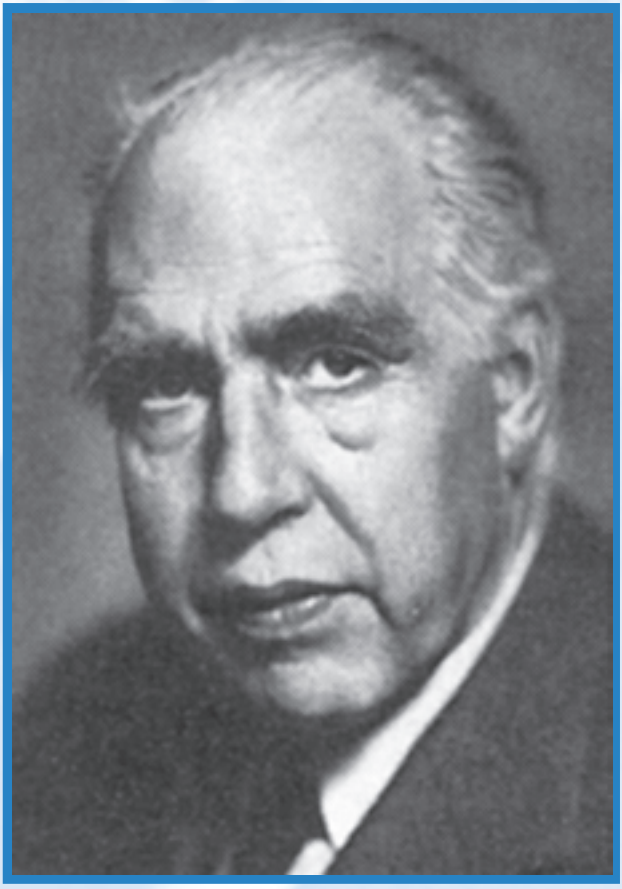
الف : طول موج این سیگنال‌ها چند متر است؟

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.

۳

آشنایی با فیزیک اتمی



نیلس بور
(۱۹۶۲ـ۱۸۸۵م)

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. ازجمله دیدیم که به کمک قانون‌های نیوتون می‌توان حرکت هر جسم را تحت تأثیر نیروهای وارد برآن پیش‌بینی کرد، و یا با استفاده از قانون گرانش، نیروی گرانشی بین جرم‌های مختلف را مشخص نمود، و یا با استفاده از قانون کولن، نیروی الکتریکی بین بارهای الکتریکی را به‌دست آورد، و بالاخره با استفاده از قانون فارادی، می‌توان اثرهای مغناطیسی جریان‌های الکتریکی را توجیه کرد.

شما می‌توانید با مراجعه به کتاب‌های فیزیک خود که تاکنون خوانده‌اید، قانون‌های دیگری را که فرا گرفته‌اید، به این فهرست بیفزایید.

فیزیک‌دانان تا آخر 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، مشاهده می‌شود. ذره‌هایی که اتم‌ها را می‌سازند، ذره‌های زیر ــ 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.

۳ــ۱ــ نظریه‌ی کوانتومی

در سال ۱۹۰۰میلادی، 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.

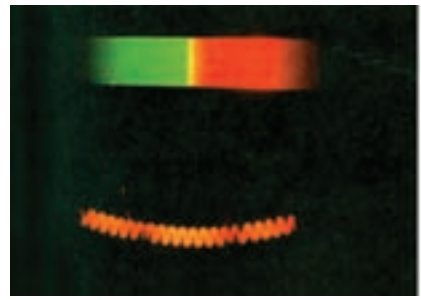
گسیل موج‌های الکترومغناطیسی از سطح جسم‌ها را ***تابش گرمایی*** نیز می‌نامند. در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که چگونه می‌توان با عبور یک نور سفید از منشور، آن را به رنگ‌های مختلف (که در نتیجه طول موج‌های مختلف دارند) تجزیه کرد و طیف آن را به‌دست آورد. اگر بین طول موج‌هایی که در یک طیف وجود دارد فاصله‌ای نباشد آن طیف را **طیف پیوسته** می‌گوییم.

آزمایش نشان می‌دهد که تابش گسیل شده از هر جسم به دمای آن و برخی از خصوصیت‌های سطح آن بستگی دارد، و در آن همه‌ی طول موج‌ها از فروسرخ، مرئی و فرابنفش به‌صورت یک طیف پیوسته وجود دارد.

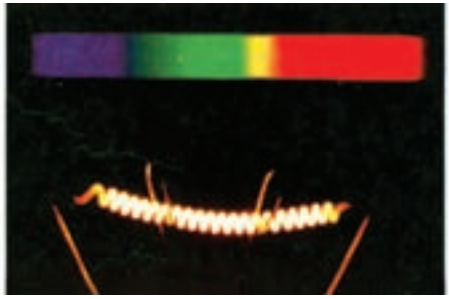
در دمای پایین، مثلاً در دمای اتاق یا کمی بالاتر، بیش‌تر تابش گسیل شده دارای طول موج‌هایی در ناحیه‌ی فروسرخ است، به همین دلیل ما نمی‌توانیم با چشم خود وجود این تابش را تشخیص دهیم و فقط گرمای آن را حس می‌کنیم. هرچه دمای جسم بالاتر رود، طول موج‌هایی که بیش از همه تابش می‌شود، به‌تدریج از طول موج‌های بلند به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر و به طرف نور مرئی نزدیک می‌شوند. وقتی دمای جسم به اندازه‌ی کافی بالا رود، از آن نور قرمزرنگی گسیل می‌شود، (شکل ۳ــ۱).

در دماهای باز هم بالاتر، اجسامی ــ مانند رشته‌ی تنگستن داغ درون لامپ روشنایی ــ نور سفید (یعنی نوری با طیف پیوسته، که همه‌ی طول موج‌های نور مرئی را در طیف خود دارد) گسیل می‌کنند(شکل ۳ــ۲).

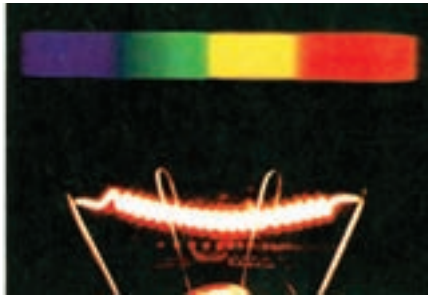
شکل ۳ــ۱



الف



ب



پ

شکل ۳ــ۲ــ 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 ۳ــ۱

آیا می‌توانید بگویید در جایی که نشسته‌اید تابش گسیل شده از چه اجسامی بر شما می‌تابد (فرود می‌آید)؟ آیا از خود شما نیز در این حال تابش گسیل می‌شود؟

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. به‌عبارت دیگر یک جسم برای هر طول موج ضریب جذب خاصی دارد.

$$a_\lambda = \frac{\text{انرژی تابشی جذب شده با طول موج } \lambda}{\text{انرژی تابشی فرودی با طول موج } \lambda} \qquad (۱ـ۳)$$

پیداست که a_λ نمی‌تواند بزرگ‌تر از یک باشد. امّا 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 آن‌صورت برای آن $a_\lambda = ۱$ است.

جسم سیاه: جسمی که بتواند همه‌ی طول موج‌های تابش فرودی را به‌طور کامل جذب کند، یعنی برای آن داشته باشیم :

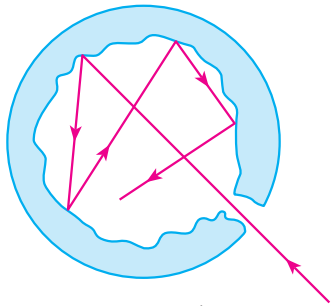
برای همه‌ی طول موج‌ها $a_\lambda = ۱$

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 غیرمرئی کمتر از یک باشد.

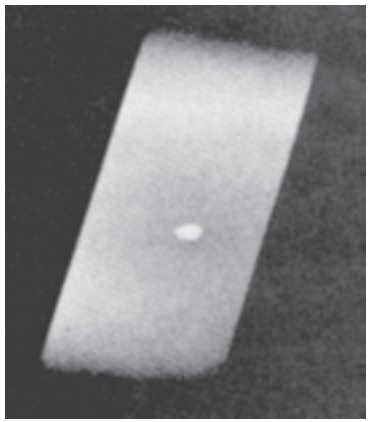
شدت تابشی: دیدیم که هر جسم همواره در حال گسیل تابش است و طول موج و انرژی تابش گسیل‌شده از آن هم به دما و هم به ویژگی‌های سطح آن جسم بستگی دارد. **بنابه تعریف شدت تابشی یک جسم برابر است با مقدار کل انرژی موج‌های الکترومغناطیسی‌ای که در بازه‌ی زمانی یک ثانیه از واحد سطح آن جسم گسیل می‌شود.**

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. به‌عبارت 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 به‌دست می‌آورند که در سطح یک جسم توخالی مانند شکل ۳ـ۳ سوراخ ریزی ایجاد می‌کنند. سطح این سوراخ با تقریب بسیار خوبی ویژگی جسم سیاه را دارد، یعنی همه‌ی



شکل ۳ــ۳

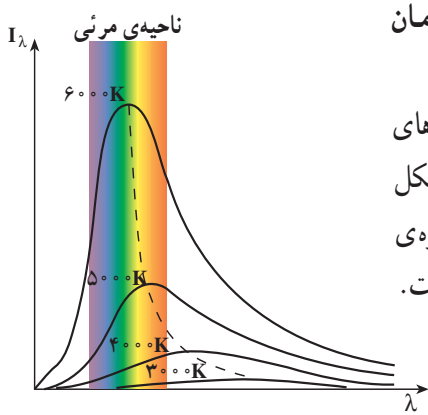


شکل ۳ــ۴

تابش فرودی را جذب می‌کند. به این صورت که همه‌ی تابشی که بر سطح سوراخ فرود می‌آید به درون کاواک (فضای درونی جسم تو خالی) 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 است. حال، از چنین سوراخی می‌توان به عنوان یک جسم سیاه استفاده کرد. شکل ۳ــ۴ این را به‌خوبی نشان می‌دهد. در این شکل سوراخ بسیار ریزی که در جدار یک لوله‌ی توخالی از جنس تنگستن ایجاد شده نشان داده شده است. این لوله آن‌قدر گرم شده است که از خود نور مرئی گسیل می‌کند. تفاوت بین شدت تابشی سوراخ و شدت تابشی گسیل‌شده از بقیه‌ی قسمت‌های سطح در شکل به‌خوبی مشخص شده است.

مقدار تابش گسیل شده را با کمیتی به نام **تابندگی** مشخص می‌کنند. **تابندگی یک جسم در هر طول موج برابر است با مقدار انرژی موج‌های الکترومغناطیسی با طول موج‌های بین λ و $\lambda+\Delta\lambda$ که در واحد زمان از واحد سطح جسم گسیل می‌شود.**

تابندگی جسم سیاه (I_λ) در طول موج‌ها و دماهای مختلف به‌دقت اندازه‌گیری شده و نتیجه‌ی آن در شکل ۳ــ۵ برای چهار دمای مختلف رسم شده است. گستره‌ی طول موج‌های مرئی نیز در این شکل مشخص شده است.



شکل ۳ــ۵ــ تابندگی پرتوی گسیل شده از جسم سیاه بر حسب طول موج

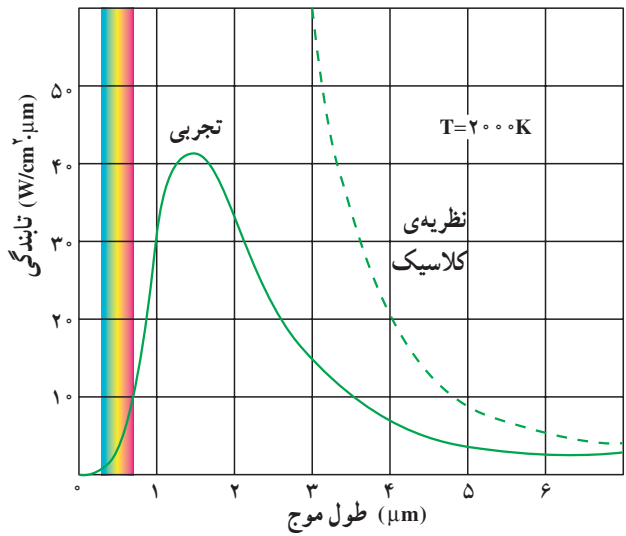
فعالیت ۳ــ۱

با بررسی شکل ۳ــ ۵ در گروه خود، الف : تابندگی جسم سیاه را برای یک طول موج معین، در دماهای مختلف، با یک‌دیگر مقایسه کنید. ب : مشخص کنید که آیا در یک دمای معین همه‌ی طول موج‌ها با تابندگی یکسان تابش می‌شوند یا نه؟ پ : اگر نتیجه‌ی دیگری از این بررسی به‌دست آورده‌اید به کلاس گزارش کنید.

همان‌طور که در شکل ۳ــ۵ می‌بینید ***هرچه دمای جسم سیاه بیش‌تر باشد، بیشینه‌ی منحنی، یعنی طول موجی که با بیش‌ترین تابندگی گسیل می‌شود، به طرف طول موج‌های کوتاه‌تر می‌رود، علاوه بر این شدت تابشی کل گسیل شده نیز با افزایش دما بیش‌تر می‌شود.***

ناتوانی فیزیک کلاسیک در توجیه نظری تابش جسم: در فصل موج‌های الکترومغناطیسی دیدیم که چگونه حرکت شتاب‌دار ذره‌های باردار در آنتن منجر به گسیل موج الکترومغناطیسی در فضا می‌شود. تابش گرمایی که از سطح یک جسم گسیل می‌شود نیز از نوسان‌های ذره‌های بارداری که درون جسم و در نزدیکی سطح آن، واقع‌اند سرچشمه می‌گیرد.

تا ابتدای سده‌ی بیستم میلادی، فیزیک‌دانان نتوانسته بودند با به‌کار بردن قانون‌ها و مفهوم‌های فیزیک کلاسیک، از جمله موج‌های الکترومغناطیسی گسیل شده از سطح یک جسم منحنی‌های تجربی شکل ۳ــ ۵ را توجیه کنند. به‌عبارت دیگر از محاسبه‌های آنان منحنی‌هایی به‌دست می‌آمد که با نتیجه‌های تجربی شکل ۳ــ ۵ سازگاری نداشت. در شکل ۳ــ۶ منحنی حاصل از محاسبه‌های نظری براساس فیزیک کلاسیک (خط چین) همراه با یک منحنی تجربی برای دمای ۲۰۰۰ کلوین نشان داده شده است.



شکل ۳ــ ۶

فعالیت ۳ــ۲

در گروه خود دو منحنی شکل ۳ــ۶ را مورد بحث قرار دهید و موارد ناسازگاری بین آن دو را مشخص کنید.

همان‌طور که از شکل ۳ــ۶ 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.

$$\lambda_m T = \text{مقدار ثابت} = ۲/۹ \times ۱۰^{-۳}\ m.K \qquad (۳ــ۲)$$

واژه‌ی جابه‌جایی در این قانون به چگونگی حرکت یا جابه‌جایی بیشینه‌ی تابندگی با تغییر دمای جسم سیاه مربوط است.

مثال ۳ــ۱

دمای بدن انسان $۳۷^\circ C$ است با محاسبه نشان دهید بیشینه‌ی تابندگی بدن انسان در چه ناحیه‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی است.

پاسخ

$$\lambda_m T = ۲/۹ \times ۱۰^{-۳}\ m.K$$

$$\lambda_m = \frac{۲/۹ \times ۱۰^{-۳}}{۲۷۳ + ۳۷}$$

$$\lambda_m \simeq ۹/۳۵ \times ۱۰^{-۶}\ m$$

با استفاده از شکل ۲ــ۹، 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 بپردازیم.

کمیّت کوانتومی: ما در زندگی روزمره با کمیت‌های متفاوتی سروکار داریم که برخی از آن‌ها مقدارهای پیوسته و برخی دیگر مقدارهای گسسته اختیار می‌کنند. برای مثال طول یک پارچه، مساحت یک زمین و یا حجم یک ظرف کمیت‌های پیوسته‌اند و هر مقداری را می‌توانند اختیار کنند. می‌توانیم ۲ متر یا ۲/۲ متر و یا ۲/۲۵ متر و ... پارچه داشته باشیم. از سوی دیگر، کمیت‌هایی مانند تعداد دانش‌آموزان یک کلاس و یا تعداد سکه‌های موجود در صندوق یک دستگاه تلفن سکه‌ای 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 کمیّت‌های گسسته را «کوانتومی» می‌نامند. کمترین مقدار یک کمیت کوانتومی را مقدار پایه یا «کوانتوم» آن کمیت می‌خوانند.

برای مثال در مبحث الکتریسیته دیده‌ایم که مقدار بار الکتریکی موجود در یک جسم باردار مضرب درستی از بار یک الکترون ($e = ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹} C$) است. به این ترتیب می‌گوییم که بار الکتریکی هر جسم باردار یک کمیّت کوانتومی است و هر کوانتوم آن برابر بار الکتریکی یک الکترون است.

نظریه‌ی پلانک درباره‌ی تابش: بنابر نظریه‌ی پلانک مقدار انرژی‌ای که جسم به‌صورت موج‌های الکترومغناطیسی گسیل می‌کند 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 :

$$E = nhf \qquad (۳_۳)$$

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 به‌کمک تطبیق نتیجه‌ی محاسبه با منحنی‌های تجربی مربوط به تابش جسم سیاه صورت گرفت. هم‌اکنون مقدار پذیرفته شده برای این ثابت برابر با $h = ۶/۶۳ \times ۱۰^{-۳۴} Js$ است.

hf ***کوانتوم انرژی*** تابشی گسیل شده با بسامد f است و n که تعداد کوانتوم‌ها را مشخص می‌کند، عدد کوانتومی نام دارد.

در رابطه‌ی ۳ــ۳ اگر ثابت پلانک را برحسب ژول ثانیه قرار دهیم، انرژی برحسب ژول به‌دست می‌آید. ولی در بحث درباره‌ی اجزای سازنده‌ی اتم‌ها، ژول به دلیل آن‌که یکای بزرگی است مناسب نیست و معمولاً از یکای دیگری برای انرژی به نام الکترون ولت (eV) استفاده می‌شود. **یک الکترون ولت بنابه تعریف برابر تغییر مقدار انرژی یک الکترون تحت ولتاژ یک ولت است.** درحالی که یک ژول برابر است با مقدار انرژی بار الکتریکی برابر یک کولن تحت ولتاژ یک ولت است. در نتیجه رابطه‌ی بین الکترون ولت و ژول به‌صورت زیر است :

$$۱eV = ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹} J = (۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹} C) \times (۱V) = \text{انرژی یک الکترون تحت ولتاژ یک ولت}$$

تمرین ۳ــ۱

ثابت پلانک را برحسب eVs به‌دست آورید.

تمرین ۳ــ۲

نور زرد با بسامد تقریبی $۶\times۱۰^{۱۴}\,Hz$، بسامد اصلی نور خورشید را تشکیل می‌دهد. انرژی‌ای که هر کوانتوم این نور (فوتون) حمل می‌کند برحسب eV چقدر است؟

تمرین ۳ــ۳

انرژی یک کوانتوم رنگ معینی از نور مرئی، برابر $۵\times۱۰^{-۱۹}\,J$ است. رنگ این نور را مشخص کنید.

تمرین ۳ــ۴

بیش‌ترین طول موج گسیلی که از بدن انسان تابش می‌شود برابر $\lambda = ۹۴۰\,\mu m$ است.

الف : بسامد این تابش چقدر است؟

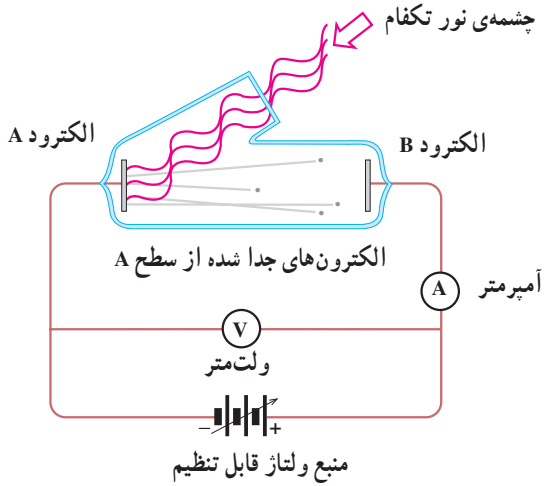
ب : نوع موج الکترومغناطیسی را تعیین کنید.

پ : انرژی‌ای که توسط هر کوانتوم این موج الکترومغناطیسی حمل می‌شود برحسب eV چقدر است؟

۳ــ۲ــ فوتون و پدیده‌ی فوتوالکتریک

در سال ۱۸۸۷ میلادی، هانریش هرتز دانشمند آلمانی، مشاهده کرد که وقتی نوری با طول موج بسیار کوتاه ــ مانند نور فرابنفش ــ به کلاهک فلزی یک 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.

برای بررسی پدیده‌ی فوتوالکتریک از دستگاهی مطابق شکل ۳ــ۷ استفاده می‌کنیم. در این دستگاه دو الکترود فلزی A و B در یک محفظه‌ی خلأ قرار دارند و از بیرون به یک منبع ولتاژ قابل تنظیم متصل شده‌اند. الکترود A در مقابل یک چشمه‌ی نور تکفام (تک بسامد) قرار دارد.



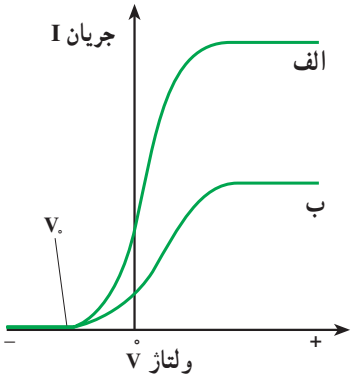
شکل ۳ــ۷

آزمایش نشان می‌دهد که اگر نوری بر الکترود A بتابد هر قدر هم که ولتاژ بالا باشد، جریانی درمدار مشاهده نمی‌شود. ولی هنگامی که نوری با بسامد مناسب به الکترود A بتابد جریان در مدار برقرار می‌شود.

وجود این جریان را می‌توانیم به این صورت تفسیر کنیم که تاباندن نور باعث جدا شدن فوتوالکترون‌ها از سطح الکترود A و گسیل آن‌ها شده است. اگر این الکترون‌ها انرژی جنبشی کافی داشته باشند، به الکترود B می‌رسند و جریان برقرار می‌شود.

با تغییر دادن ولتاژ V می‌توانیم منحنی تغییرات جریان I را برحسب V به‌دست آوریم.

در شکل ۳ــ ۸ منحنی تغییرات جریان برحسب ولتاژ برای دو مقدار مختلف شدت نور فرودی بر الکترود A نشان داده شده است. بسامد نور فرودی در هر دو حالت یکسان است. مقدارهای مثبت V مربوط به شرایطی است که الکترود B به پایانه‌ی مثبت منبع ولتاژ متصل است.



شکل ۳ــ ۸

همان‌گونه که منحنی (الف) نشان می‌دهد برای مقدارهای 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 الکترود 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 الکترود 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 مقدارهای منفی V (یعنی وقتی که الکترود B به پایانه‌ی منفی منبع ولتاژ متصل شده است) جهت جریان عوض نمی‌شود. با کاهش ولتاژ V، جریان (مثبت) کاهش می‌یابد، تا این‌که به‌ازای یک ولتاژ V_0- که ***ولتاژ متوقف‌کننده*** نامیده می‌شود، جریان صفر می‌شود و به‌ازای مقدارهای کمتر از V_0- جریان هم‌چنان صفر می‌ماند.

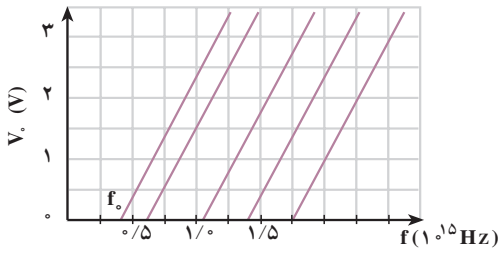
برای بیان این وضعیت می‌توان گفت که برای مقدارهای منفی V، الکترود A، که اکنون به پایانه‌ی مثبت متصل است، فوتوالکترون‌ها را به سوی خود می‌کشد و از انرژی جنبشی آن‌ها می‌کاهد. در نتیجه تعداد کمتری از آن‌ها می‌توانند به B برسند. در ولتاژ V_0- هیچ فوتوالکترونی به B نمی‌رسد.

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 متوقف کننده 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 ۳ــ۸ به‌دست می‌آوریم تنها با این تفاوت که ولتاژ متوقف کننده مقدار دیگری خواهد داشت. یعنی ***مقدار ولتاژ متوقف‌کننده به بسامد نور فرودی*** بستگی دارد.

اگر در دستگاه شکل ۳ــ۷ جنس الکترود فلزی A را تغییر دهیم، بازهم همین نتیجه‌ها را به‌دست می‌آوریم ولی در این مورد نیز مقدار ولتاژ متوقف‌کننده تغییر می‌کند، به عبارت دیگر **مقدار ولتاژ متوقف‌کننده به جنس الکترود 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 ۳ــ۹

درشکل ۳ــ۹ منحنی تغییرات ولتاژ متوقف‌کننده برحسب بسامد پرتوی نور فرودی، برای چند فلز مختلف، نشان داده شده است. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که هرقدر بسامد پرتوی فرودی بر الکترود A کمتر باشد، ولتاژ قطع‌کننده نیز کمتر خواهد بود. مقدارهای ولتاژ قطع‌کننده برای هر فلز بر روی یک خط‌راست قرار دارد. همان‌گونه که در شکل می‌بینید هر خط، محور بسامد را، در بسامد معینی که آن را با f_0 نشان می‌دهیم قطع می‌کند. تجربه نشان می‌دهد که اگر بسامد پرتوی تابیده بر الکترود فلزی A از f_0 مربوط به آن فلز کمتر باشد، پدیده‌ی فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. از این رو f_0 را بسامد قطع می‌نامند.

ناتوانی فیزیک کلاسیک در تفسیر پدیده‌ی فوتوالکتریک: این پدیده که تاباندن نور بر یک فلز باعث جدا شدن الکترون‌های آن می‌شود، با برداشت‌های فیزیک کلاسیک کاملاً قابل قبول است. زیرا با توجه به آن که نور نیز از جنس موج‌های الکترومغناطیسی است، می‌توان نتیجه گرفت که میدان الکتریکی آن موج‌ها، بر الکترون نیروی $-e\vec{E}$ وارد می‌کند، در نتیجه الکترون‌ها شتاب پیدا می‌کنند و انرژی جنبشی آن‌ها افزایش می‌یابد و تعدادی از آن‌ها که انرژی کافی کسب می‌کنند می‌توانند از فلز خارج شوند. حال اگر انرژی جنبشی فوتوالکترون به هنگام خروج از سطح الکترود A برابر K_A و به‌هنگام رسیدن به الکترود B برابر K_B باشد، و بین دو الکترود ولتاژ V برقرار باشد، بنابر قضیه‌ی کار ــ انرژی داریم :

$$eV = K_B - K_A \qquad (۴ــ۳)$$

که در آن eV کار نیروی وارد بر الکترون از سوی میدان الکتریکی بین الکترودها در تغییر مکان از A به B است. اگر ولتاژ V منفی باشد (یعنی الکترود B به پایانه‌ی منفی منبع ولتاژ متصل شده باشد) K_B کمتر از K_A خواهد بود.

اگر این ولتاژ منفی برابر ولتاژ متوقف‌کننده باشد($V = -V_0$) ، تنها آن الکترون‌هایی که بیش‌ترین انرژی جنبشی را دارند می‌توانند تا نزدیکی الکترود B برسند. برای این الکترون‌ها داریم $K_A = K_{\text{بیشینه}}$ ، این الکترون‌ها جذب الکترود B نمی‌شوند و برمی‌گردند. لذا برای آن‌ها داریم $K_B = 0$

در نتیجه از رابطه‌ی ۳ــ۴ داریم :

$$-eV_{\circ} = -K_{\text{بیشینه}} \Rightarrow eV_{\circ} = K_{\text{بیشینه}} \qquad (۵ــ۳)$$

بنابراین با داشتن ولتاژ متوقف کننده، بیشینه‌ی انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها به هنگام خروج از الکترود A مشخص می‌شود.

فیزیک کلاسیک در تفسیر نتیجه‌های تجربی مربوط به پدیده‌ی فوتوالکتریک با دو مشکل روبه‌رو شد.

۱ــ بنابر قانون‌های فیزیک کلاسیک، با افزایش شدت نور فرودی بر الکترود A، و در نتیجه افزایش میدان الکتریکی مربوط به موج الکترومغناطیسی، می‌توانیم $K_{\text{بیشینه}}$ را افزایش دهیم. درحالی که در منحنی شکل ۳ــ۸ دیدیم که $V_{\circ}$ و در نتیجه $K_{\text{بیشینه}}$ مستقل از شدت نوری است که بر الکترود A می‌تابد.

۲ــ اگر شدت نور برای گسیل فوتوالکترون‌ها از الکترود A کافی باشد، اثر فوتوالکتریک باید در هر بسامدی رخ دهد. در حالی که دیدیم اگر بسامد نوری که بر A فرود می‌آید کمتر از بسامد قطع باشد، اثر فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.

تفسیر کوانتومی پدیده‌ی فوتوالکتریک: پیش از این دیدیم که بنابر 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 فوتوالکتریک، 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

$$E = hf \qquad (۶ــ۳)$$

براساس پیشنهاد اینشتین انرژی یک موج الکترومغناطیسی با بسامد f تنها می‌تواند مضرب درستی از انرژی یک فوتون باشد، یعنی :

$$E = nhf \qquad (۷ــ۳)$$

در این صورت می‌گوییم این موج از n فوتون تشکیل شده است.

مثال ۳ــ۲

الف : انرژی فوتون نور زرد با طول موج ۵۸۹ nm را برحسب الکترون ولت به‌دست آورید. ثابت پلانک برابر است با $h = ۴/۱۴\times۱۰^{-۱۵}\ eVs$.

ب : تعداد فوتون‌هایی را که در یک ثانیه از یک لامپ زرد ۶۰ واتی گسیل می‌شوند محاسبه کنید.

پاسخ

الف : موج‌های الکترومغناطیسی با سرعت نور حرکت می‌کنند. از این رو داریم :

$$\lambda f = c$$

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

$$= \frac{۴/۱۴\times۱۰^{-۱۵}\times۳\times۱۰^{۸}}{۵۸۹\times۱۰^{-۹}}$$

$$= ۲/۱۱\ eV$$

ب :

$$E_T = Pt = ۶۰\times۱ = ۶۰J = ۳۷/۵\times۱۰^{۱۹}eV$$

$$E_T = nhf = nE$$

$$۳۷/۵\times۱۰^{۱۹} = n\times۲/۱۱$$

$$n \simeq ۱/۸\times۱۰^{۲۰}$$

یعنی در هر ثانیه $۱/۸\times۱۰^{۲۰}$ فوتون از این لامپ گسیل می‌شود که عدد بسیار بزرگی است.

اینشتین همچنین فرض کرد که در اثر فوتوالکتریک، یک فوتون (با انرژی hf) به‌طور کامل توسط الکترون جذب می‌شود و انرژی خود را به الکترون می‌دهد. در نتیجه انرژی جنبشی فوتوالکترون گسیل شده به هنگام خروج از سطح فلز برابر است با :

$$K = hf - W \qquad (۸ــ۳)$$

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_0 باشد، انرژی جنبشی سریع‌ترین فوتوالکترون‌های گسیل‌شده از آن برابر خواهد بود با :

$$K_{\text{بیشینه}} = hf - W_0 \qquad (۹ــ۳)$$

W_0 را **تابع کار** فلز می‌نامند، و همان‌گونه که گفتیم، حداقل کار لازم برای خارج کردن یک الکترون از فلز است.

با استفاده از رابطه‌ی ۳ــ۵ می‌توانیم رابطه‌ی ۳ــ ۹ را به‌صورت زیر بنویسیم :

$$eV_0 = hf - W_0 \qquad (۱۰ــ۳)$$

فعالیت ۳ــ۳

با بحث و بررسی در گروه خود، نشان دهید که دو مشکلی که در تفسیر کلاسیکی نتیجه‌های تجربی پدیده‌ی فوتوالکتریک وجود داشت در رابطه‌ی۳ــ۱۰ وجود ندارد.

رابطه‌ی۳ــ۱۰، بین ولتاژ متوقف کننده‌ی V_0 و بسامد فوتون فرودی بر الکترود A ، یک رابطه‌ی خطی است و منحنی آن یک خط راست است که کاملاً با منحنی‌های تجربی در شکل۳ــ۹ سازگار است.

فعالیت ۳ــ ۴

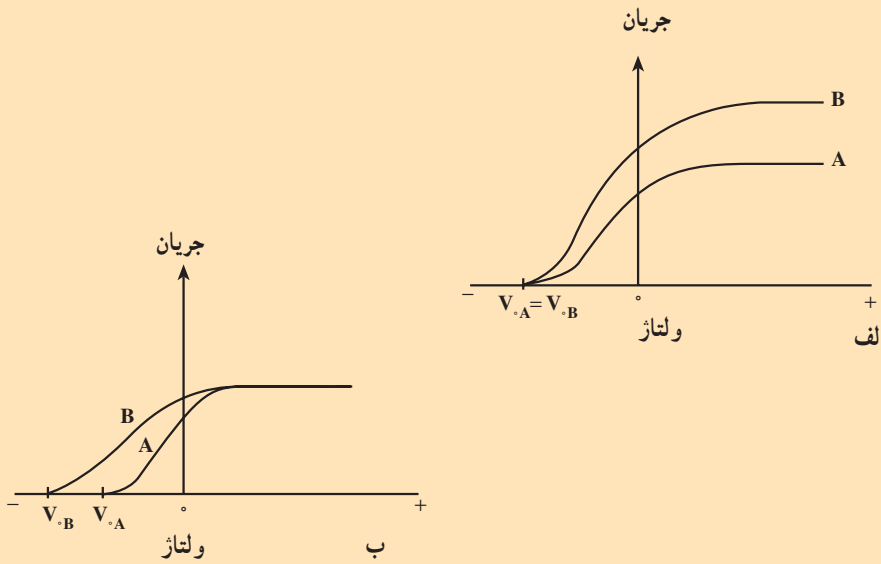
منحنی تغییرات V_0 بر حسب بسامد f را با استفاده از رابطه‌ی ۳ــ۱۰ رسم کنید. با بحث و بررسی درگروه خود مشخص کنید که شیب این خط و طول از مبدأ آن، هریک چه کمیت‌هایی را مشخص می‌کنند؟

در رابطه‌ی۳ــ۱۰ اگر hf از W_0 کوچک‌تر باشد، هیچ الکترونی از فلز خارج نمی‌شود. در نتیجه hf حداقل می‌تواند برابر W_0 باشد. به این ترتیب بسامد قطع از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$f_0 = \frac{W_0}{h} \qquad (۱۱ــ۳)$$

مثال ۳ــ۳

شکل۳ــ۱۰ الف و ب به ترتیب منحنی تغییرات جریان برحسب ولتاژ را برای دو شدت مختلف و هم‌چنین دو باریکه نور فرودی با تعداد فوتون‌های یکسان در واحد زمان در پدیده‌ی فوتوالکتریک نشان می‌دهد. توضیح دهید هر یک از این منحنی‌ها در چه شرایطی می‌توانند برقرار باشند.



شکل ۳ــ۱۰

پاسخ:

با توجه به این که در منحنی «الف» شدت نور فرودی متفاوت و ولتاژ متوقف‌کننده برای هر دو حالت یکسان است، نتیجه می‌گیریم که بسامد پرتوهای فرودی یکسان است. در صورتی که در منحنی «ب» تعداد فوتون‌های باریکه‌های نور فرودی در واحد زمان برای هر دو حالت یکسان است و ولتاژ متوقف کننده متفاوت است؛ بنابراین، بسامد پرتوهای فرودی متفاوت است. به این ترتیب این منحنی می‌تواند برای دو باریکه‌ی فرودی با تعداد فوتون‌های یکسان در پدیده‌ی فوتو الکتریک برقرار باشد. علاوه بر این منحنی «ب» نشان می‌دهد که $V_{\circ B} > V_{\circ A}$ ؛ این، یعنی بسامد پرتوهای فرودی B بزرگ‌تر از بسامد پرتوهای فرودی A است (چرا؟).

مثال ۳ــ۴

تابع کار تنگستن $۴/۵۲\,eV$ است.

الف : بسامد و طول موج قطع تنگستن را حساب کنید.

ب : بیشینه انرژی جنبشی الکترون‌ها را هنگامی که طول موج $۱۹۸\,nm$ به‌کار می‌رود، حساب کنید. ولتاژ متوقف‌کننده در این حالت چقدر است؟

پاسخ

الف : بسامد قطع برابر است با

$$f_{\circ} = \frac{W_{\circ}}{h} = \frac{۴/۵۲ \times ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}\,J}{۶/۶۳ \times ۱۰^{-۳۴}\,J.s}$$

$$= ۱/۰۹ \times ۱۰^{۱۵}\,s^{-۱}$$

با توجه به رابطه‌ی $\lambda_{\circ} = \frac{c}{f_{\circ}}$ ، طول موج قطع برابر است با

$$\lambda_{\circ} = \frac{۳ \times ۱۰^{۸}}{۱/۰۹ \times ۱۰^{۱۵}} = ۲/۷ \times ۱۰^{-۷}\,m$$

$$= ۲۷۰\,nm$$

ب :

$$K_{\text{بیشینه}} = hf - W_{\circ}$$

$$= \frac{hc}{\lambda} - W_{\circ}$$

$$= \frac{۱۲۴۰\,eV.nm}{۱۹۸\,nm} - ۴/۵۲\,eV$$

$$= ۱/۷۴eV \simeq ۲/۷ \times ۱۰^{-۱۹}\,J$$

ولتاژ متوقف‌کننده متناظر با $K_{\text{بیشینه}}$ است. بنابراین

$$V_{\circ} = \frac{K_{\text{بیشینه}}}{e} = \frac{۱/۷۴eV}{e} = ۱/۷۴\ V$$

تمرین ۳ــ۵

طول موج قطع برای اثر فوتوالکتریک در یک فلز معین برابر $۲۵۴\,nm$ است.

الف : تابع کار این فلز برحسب الکترون ــ ولت چقدر است؟

ب : آیا اثر فوتوالکتریک به ازای $\lambda > 254nm$ مشاهده خواهد شد یا به ازای $\lambda < 254nm$؟ چرا؟

تمرین ۳ــ۶

تابع کار فلز روی $4/31eV$ است. هرگاه نور بر سطحی از جنس روی بتابد و فوتوالکترون‌ها مشاهده شوند،

الف : بلندترین طول موجی که سبب گسیل فوتوالکترون‌ها می‌شود چقدر است؟

ب : وقتی نور به طول موج $220nm$ به‌کار گرفته شود ولتاژ متوقف‌کننده چقدر است؟

۳ــ۳ــ طیف اتمی

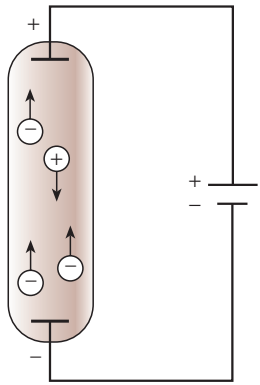
علاوه‌بر آن‌چه تا این‌جا به آن‌ها اشاره کردیم، پدیده‌های دیگری نیز هستند که فیزیک کلاسیک قادر به تفسیر آن‌ها نبود. لذا فیزیکدانان با فرض‌های غیرکلاسیکی ــ مانند فرضیه‌های پلانک و اینشتین که در بالا به آن‌ها اشاره شد ــ توانستند این پدیده‌ها را به‌خوبی تفسیر کنند. توصیف این پدیده‌ها فراتر از سطح این کتاب است، و ما در این‌جا تنها به عنوان نمونه طیف گسیل شده از اتم‌ها را که بر مبنای فیزیک کلاسیک قابل تفسیر نیست، ذکر می‌کنیم.

در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه با پاشیدگی نور در منشور آشنا شدید و دیدید که نیوتون برای نخستین بار با گذراندن نور خورشید از منشور «طیف نور سفید» را تشکیل داد. نیوتون نشان داد که نور سفید آمیزه‌ای از رنگ‌های مختلف است. اکنون می‌دانیم نور سفید از طول موج‌های مختلفی، از نور بنفش با طول موج حدود $0/4\mu m$ تا نور قرمز با طول موج حدود $0/7\mu m$، تشکیل شده است. طیف نور سفید که یک طیف پیوسته است در شکل ۳ــ۱۱ نشان داده شده است.

شکل ۳ــ۱۱

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 ۳ــ۱۲ــ الف به‌صورت لوله‌های باریک شیشه‌ای هستند که درون آن‌ها یک گاز رقیق در فشار کم وجود دارد. دو الکترود به نام‌های کاتد و آند در دو انتهای لوله قرار دارند. اگر بین این دو الکترود ولتاژ بالایی برقرار شود، اتم‌های گاز درون لامپ مطابق شکل ۳ــ۱۲ــ ب و پ شروع به گسیل نور می‌کنند. نوری که از لامپ‌های حاوی بخارعنصرهای متفاوت گسیل می‌شود، با یک دیگر تفاوت دارد. برای مثال نوری که اتم‌های بخار جیوه گسیل می‌کنند، همان‌گونه که در شکل ۳ــ۱۲ نشان داده شده است به رنگ نیلی ــ آبی است. اگر این نور را مطابق شکل۳ــ۱۳ 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

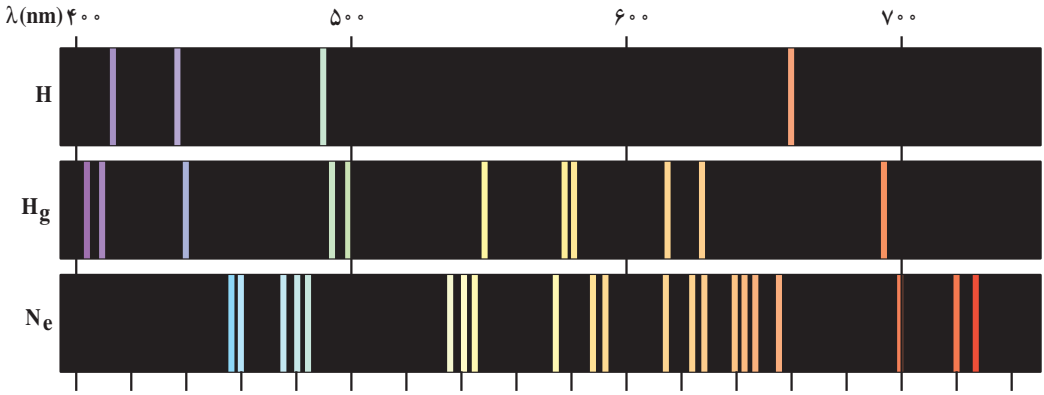
ب

پ

شکل۳ــ۱۲

اگر درون لامپ به جای بخار جیوه، بخار عنصر دیگری باشد، بازهم در طیف حاصل خط‌های رنگی جدا ازهم دیده می‌شود، ولی این خط‌ها هم ازنظر تعداد و هم ازنظر طول موج با خط‌های طیف حاصل از لامپ بخار جیوه تفاوت دارد. طیف نور گسیل شده از بخار هر عنصر را ***طیف اتمی*** آن عنصر می‌نامند. پس می‌توان گفت که طیف اتمی عنصرهای مختلف باهم تفاوت دارد. طیف اتمی چند عنصر در شکل ۳ــ۱۴نشان داده شده است. طیف اتمی حاصل از نور گسیل شده از بخار عنصرها را طیف گسیلی (یا نشری) آن اتم‌ها می‌نامند.

شکل۳ــ۱۳



شکل۳ــ۱۴

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 امّا 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 فرانهوفر، فیزیکدان آلمانی، کشف کرد که اگر به‌دقت به طیف خورشید بنگریم، خط های تاریکی در طیف پیوسته‌ی آن مشاهده خواهیم کرد (شکل ۳ــ۱۵). 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 جوّ 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.

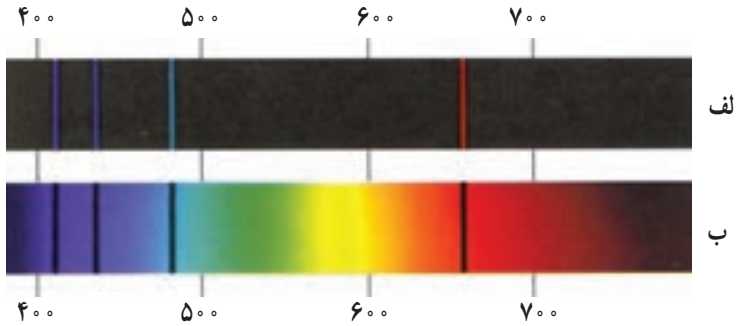
در اواسط سده‌ی نوزدهم، معلوم شد که اگر نور سفید از داخل بخار عنصری عبور کند و سپس طیف آن تشکیل شود، در طیف آن، خط‌های تاریکی ظاهر می‌شود. این خط‌ها (طول موج‌ها) توسط اتم‌های بخار عنصر جذب شده‌اند. مطالعه‌ی طیف‌های گسیلی و جذبی عنصرهای مختلف نشان می‌دهد که :

۱ــ 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.

۲ــ اتم هر عنصر دقیقاً همان‌طول موج‌هایی را از نور سفید جذب می‌کند، که اگر دمای آن به‌اندازه‌ی کافی بالا رود و یا به هرصورت دیگر برانگیخته شود، آن‌ها را تابش می‌کند.

شکل ۳ــ۱۵ــ خط‌های تاریکی که در طیف خورشید دیده می‌شود، خط‌های فرانهوفر نام دارد. طول موج‌های مربوط توسط جو خورشید از نور تابشی خورشید حذف شده است.

طیف‌های گسیلی (نشری) و جذبی اتم هیدروژن در شکل ۳ــ۱۶ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳ــ۱۶

الف ــ طیف گسیلی، خط‌های روشن معرف طول موج‌های گسیلی هستند.

ب ــ 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 اثرانگشت افراد می‌تواند برای شناسایی اتم‌ها از یکدیگر به‌کار رود.

فعالیت ۳ــ 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 ***طیف نمایی*** می‌نامند. طیف نمایی 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 قابل‌قبولی برای تفسیر طیف اتمی وجود نداشت. به‌عبارت دیگر، این که چرا هر عنصر طیف مخصوص به خود را دارد، سؤالی بود که در فیزیک کلاسیک پاسخی برای آن یافت نمی‌شد.

درک ساز و کار جذب و گسیل نور به وسیله‌ی اتم‌ها از دیدگاه فیزیک کلاسیک آسان است. زیرا بنابر نظریه‌های کلاسیکی یک اتم در صورتی ***نور گسیل*** می‌کند که به طریقی ــ مانند برخورد با سایر اتم‌ها یا توسط میدان‌های الکتریکی ــ به الکترون‌های آن انرژی داده شود. در نتیجه الکترون‌ها

با به‌دست آوردن انرژی ارتعاش می‌کنند و موج‌های الکترومغناطیسی به‌وجود می‌آورند ؛ یعنی نور گسیل می‌کنند. اما این که چرا اتم‌های همه‌ی عنصرها موج‌های الکترومغناطیسی با طول موج‌های یکسان گسیل نمی‌کنند، و این که چرا هر عنصر طول موج خاص خود را دارد از دیدگاه فیزیک کلاسیک قابل توجیه نیست.

درمورد جذب نور هم، از دیدگاه فیزیک کلاسیک، می‌توان گفت که وقتی نور به یک اتم می‌تابد، نوسان میدان الکتریکی ناشی از نور فرودی، باعث می‌شود که الکترون‌های اتم شروع به ارتعاش کنند و نور فرودی را جذب کنند. ولی باز هم در این دیدگاه هیچ توجیه قانع‌کننده‌ای برای این که «***چرا هر عنصر تنها طول موج‌های خاصی را که مشخصه‌ی آن عنصر است جذب می‌کند و بقیه‌ی طول موج‌ها را جذب نمی‌کند؟***» وجود ندارد.

نیلس بور، فیزیکدان دانمارکی، در سال ۱۹۱۳میلادی با بیان فرضیه‌هایی درباره‌ی اتم‌ها، طیف اتمی را توجیه کرد و بار دیگر نشان داد که تجدید نظر اساسی در فیزیک کلاسیک ضروری است.

رابطه‌ی ریدبرگ ــ بالمر: اتم هیدروژن ساده‌ترین اتم‌هاست و طیف آن اولین طیفی بود که به‌طور کامل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آنگستروم تا سال ۱۸۸۵میلادی طول موج چهارخط از طیف اتم هیدروژن را با دقت زیاد اندازه گرفت. این طول موج‌ها در شکل ۳ــ۱۶ نشان داده شده‌اند. بالمر که یک معلم سوئیسی بود، این اندازه‌گیری‌ها را مطالعه کرد و نشان داد که طول موج خط‌های این طیف را می‌توان با دقت بسیار زیاد از رابطه‌ی زیر به‌دست آورد :

$$\lambda = ۳۶۴/۵۶ \frac{n^۲}{n^۲ - ۴} \qquad (۳ــ۱۲)$$

که در آن λ طول موج خط‌های طیف برحسب نانومتر (nm) و n یکی از عددهای صحیح زیر است :

$$n = ۳, ۴, ۵, ۶$$

گفتنی است که بالمر این رابطه را صرفاً با بررسی رابطه‌های ریاضی مختلف و بدون هیچ‌گونه تجربه‌ی فیزیکی به‌دست آورد.

مثال ۳ــ۵

طول موج خط‌های طیفی شکل ۳ــ۱۵ را به کمک رابطه‌ی بالمر به‌دست آورید.

پاسخ

داریم : $\lambda = ۳۶۴/۵۶ \frac{n^۲}{n^۲ - ۴}$

برای $n = ۳$ به‌دست می‌آوریم.

$$\lambda_۱ = ۳۶۴/۵۶ \frac{۹}{۹-۴} = ۶۵۶/۲ \text{ nm}$$

برای $n = ۴$ داریم :

$$\lambda_۲ = ۳۶۴/۵۶ \frac{۱۶}{۱۶-۴} = ۴۸۶/۰ \text{ nm}$$

و به همین ترتیب

$$n = ۵ \Rightarrow \lambda_۳ = ۴۳۴/۰ \text{ nm}$$

$$n = ۶ \Rightarrow \lambda_۴ = ۴۱۰/۱۳ \text{ nm}$$

توفیق بالمر درخصوص 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 به‌دست می‌آیند :

$$\lambda = ۳۶۴/۵۶ \frac{n^۲}{n^۲ - ۹} \qquad (۱۳_۳)$$

و یا

$$\lambda = ۳۶۴/۵۶ \frac{n^۲}{n^۲ - ۱۶} \qquad (۱۴_۳)$$

کار عمده در زمینه‌ی جستجو برای طیف کامل اتم هیدروژن توسط ریدبرگ در حدود سال ۱۸۹۰میلادی انجام شد. وی توانست برخی از خط‌های مربوط به رابطه‌های (۳ــ۱۱و۳ــ۱۲) را نیز مشاهده کند. ریدبرگ کار کردن با عکس طول موج را مناسب‌تر تشخیص داد، لذا رابطه‌ی بالمر (معادله‌ی۳ــ۱۲) را به صورت زیر نوشت :

$$\frac{۱}{\lambda} = R_H \left(\frac{۱}{۲^۲} - \frac{۱}{n^۲} \right) \qquad (۱۵_۳)$$

که در آن R_H ثابت ریدبرگ برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود و مقدار آن برابر است با $R_H = ۰/۰۱۰۹(nm)^{-۱}$.

طول موج تمامی خط‌های طیف اتم هیدروژن را می‌توان از رابطه‌ی زیر که به رابطه‌ی ریدبرگ معروف است به‌دست آورد.

$$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n > n' \qquad (۱۶\text{ـ}۳)$$

با قرار دادن $n' = 2$ رابطه‌ی بالمر (۳ـ۱۵) به‌دست 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 به‌دست می‌آیند.

به ازای $n' = 1$ داریم :

$$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 2, 3, 4, \ldots$$

این رشته را «رشته‌ی لیمان» می‌نامند.

همچنین به ازای $n' = 3$ داریم :

$$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 4, 5, 6, \ldots$$

این رشته را نیز «رشته‌ی پاشن» می‌نامند. در جدول ۳ـ۱ رشته‌های طیف اتم هیدروژن داده شده‌اند.

جدول ۳ـ۱

نام رشته	مقدار n'	رابطه‌ی ریدبرگ مربوط	مقدارهای n	گستره‌ی طول موج
لیمان	۱	$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	$n = 2, 3, 4, \ldots$	فرابنفش
بالمر	۲	$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	$n = 3, 4, 5, \ldots$	فرابنفش و مرئی
پاشن	۳	$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	$n = 4, 5, 6, \ldots$	فروسرخ
براکت	۴	$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	$n = 5, 6, 7, \ldots$	فروسرخ
پفوند	۵	$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	$n = 6, 7, 8, \ldots$	فروسرخ

مثال ۳ــ۶

طول موج اولین خط طیفی اتم هیدروژن در رشته‌ی لیمان را که برای آن $n' = ۱$ و $n = ۲$ است به‌دست آورید و تعیین کنید که این خط در کدام گستره‌ی موج‌های الکترومغناطیسی واقع است.

پاسخ

برای $n' = ۱$ و $n = ۲$ طبق رابطه‌ی ریدبرگ داریم :

$$\frac{۱}{\lambda} = R_H\left(\frac{۱}{۱} - \frac{۱}{۴}\right) = \frac{۳}{۴}R_H$$

در نتیجه طول موج این خط برابر است با :

$$\lambda = \frac{۴}{۳R_H} = \frac{۴}{۳\times ۰/۰۱۰۹(nm)^{-۱}} = ۱۲۱nm$$

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 ریدبرگ برای طیف اتم هیدروژن، لزوم داشتن الگویی برای اتم را نشان می‌داد. الگویی که بتوان به کمک آن این نتیجه‌های تجربی را توجیه کرد.

۳ــ۴ــ الگوهای اتمی

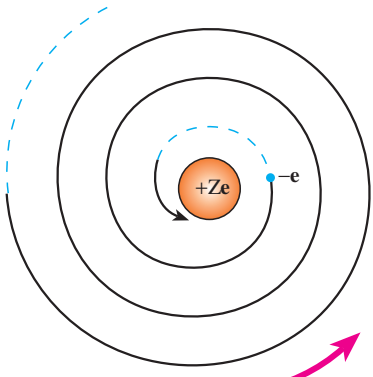
الگوی اتمی تامسون: تامسون، دانشمند انگلیسی که با آزمایش‌هایی موفق به کشف الکترون در سال ۱۸۹۶ میلادی شده بود، نخستین الگوی اتمی را در سال ۱۸۹۹ میلادی ارائه داد. در این الگو، اتم به صورت توزیع کروی یکنواختی از جرم و بار مثبت در نظر گرفته شد که الکترون‌ها (بارهای منفی) مانند کشمش‌های درون یک کیک کشمشی درون آن قرار دارند.

اگر چه تامسون براساس الگوی کیک کشمشی توانست برخی از ویژگی‌های اتم‌ها را توجیه کند، ولی رادرفورد با آزمایش‌هایی که به منظور تأیید و تکمیل الگوی کیک کشمشی تامسون انجام داد، به نتیجه‌هایی دست یافت که با چنین الگویی سازگار نبود. آزمایش‌های وی نشان دادند که بار مثبت اتم باید در بخش کوچکی در مرکز اتم متمرکز باشد. رادرفورد براساس این نتیجه‌ها در سال ۱۹۱۲میلادی الگوی دیگری برای ساختار اتم ارائه کرد.

الگوی اتمی رادرفورد: در الگوی اتمی رادرفورد 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، به‌گونه‌ای که می‌توان گفت فضای بین هسته و الکترون‌ها خالی است. رادرفورد در الگویی که برای اتم ارائه کرد به این که الکترون‌ها در اتم چگونه حرکت می‌کنند اشاره‌ای نکرد. اشکال اساسی این الگو آن است که اگر آن الکترون‌ها را نسبت به هسته ساکن فرض کنیم، باید تحت تأثیر نیروی ربایشی الکتریکی بین هسته و الکترون، روی هسته سقوط کنند و در نتیجه اتم ناپایدار باشد، یعنی ساختار داخلی آن درهم فرو ریزد که این موضوع کاملاً خلاف چیزی است که در عمل وجود دارد.

اگر هم فرض کنیم که الکترون‌ها ــ مانند سیاره‌های منظومه‌ی خورشیدی که به دور خورشید در حرکت‌اند ــ به دور هسته در گردش باشند، باز هم این حرکت به دلیل زیر پایدار نمی‌ماند.

در فصل قبل در قسمت تولید موج‌های الکترومغناطیسی دیدیم، حرکت شتابدار بارهای الکتریکی در آنتن موج الکترومغناطیسی تولید می‌کند. حرکت الکترون به دور هسته نیز یک حرکت شتابدار است، از این‌رو بنابر 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 بیفتد (شکل۳ــ۱۷).



شکل ۳ــ۱۷

بدین‌ترتیب الگوی رادرفورد برای اتم، با تجربه سازگار نیست. زیرا اولاً نمی‌تواند پایداری حرکت الکترون‌ها در مدارهای اتمی و در نتیجه پایداری اتم‌ها را توضیح دهد و ثانیاً قادر به توجیه طیف گسسته‌ی اتمی نیست.

الگوی اتمی بور: نیلس‌بور، 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 ــ بالمر برای طیف اتم هیدروژن، با الهام گرفتن از نظریه‌های کوانتومی پلانک و اینشتین الگویی برای اتم هیدروژن که یک الکترون دارد ارائه کرد. در این الگو، بور پیشنهاد کرد که قانون‌های مکانیک و قانون‌های الکترومغناطیسی کلاسیک، در مقیاس‌های اتمی باید همراه با فرضیه‌هایی در نظر گرفته شوند. این فرضیه‌ها را می‌توان به صورت ساده در چهار اصل زیر بیان کرد :

۱ــ الکترون، تنها روی مدارهای دایره‌ای با شعاع‌های معینی حرکت می‌کند، این مدارها «مدارهای مانا» نامیده می‌شوند.

حرکت الکترون با جرم m و بار $-e$ روی یک مدار دایره‌ای به شعاع r به مرکز هسته‌ی با بار $+e$ در شکل ۳ــ۱۸ نشان داده شده است. نیروی مرکزگرا این حرکت از ربایش الکتریکی بین الکترون و هسته است، و برابر است با $\frac{ke^2}{r^2}$ $\left(k=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}=9\times10^9\ N.m^2/C^2\right)$. شتاب حرکت الکترون همان‌گونه که در مبحث حرکت دایره‌ای دیدیم برابر است با $\frac{v^2}{r}$ که در آن v سرعت حرکت الکترون روی مسیر دایره‌ای است. در نتیجه با استفاده از قانون دوم نیوتون داریم :

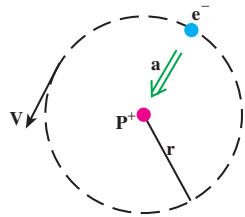
$$\frac{ke^2}{r^2}=\frac{mv^2}{r} \qquad (۱۷_۳)$$

از آن‌جا که انرژی پتانسیل الکترون در میدان الکتریکی هسته برابر $\frac{-ke^2}{r}$ است در نتیجه انرژی کل (پتانسیل + جنبشی) الکترون در این مدار برابر است با :

$$E=K+U=\frac{1}{2}mv^2-\frac{ke^2}{r} \qquad (۱۸_۳)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۳ــ۱۷ به‌دست می‌آوریم :

$$K=\frac{1}{2}mv^2=+\frac{ke^2}{2r} \qquad (۱۹_۳)$$



شکل ۳ــ۱۸

در نتیجه انرژی کل الکترون روی یک مدار مانا با شعاع r برابر است با :

$$E = -\frac{ke^2}{2r} \qquad (۲۰_۳)$$

۲ــ 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.

۳ــ شعاع مدارهای مانا مقدارهای مشخص گسسته‌ای می‌توانند داشته باشند. اگر شعاع اولین مدار را برابر a_0 بگیریم شعاع‌های مجاز از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آیند.

$$r_n = a_0 n^2 \qquad n = 1, 2, 3, \ldots \qquad (۲۱_۳)$$

که در آن n یک عدد صحیح است.

علاوه بر این بور برای کوچک‌ترین شعاع مدار الکترون در اتم هیدروژن، یعنی a_0، که آن را شعاع اتم بور نیز می‌نامند مقدار زیر را به‌دست آورد :

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 mke^2} \qquad (۲۲_۳)$$

که در آن h ثابت پلانک، k ثابت کولن، e بار الکترون و m جرم الکترون است.

مثال ۳ــ۷

شعاع اتم بور را محاسبه کنید.

پاسخ

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 mke^2}$$

$$= \frac{(6/63\times10^{-34}\,\mathrm{J.s})^2}{4\times(3/14)^2\times(9\times10^{-31}\,\mathrm{kg})\times(9\times10^{9}\,\mathrm{N.m^2/C^2})(1/6\times10^{-19}\,\mathrm{C})^2}$$

$$= 0/529\times10^{-10}\,\mathrm{m} = 0/0529\,\mathrm{nm}$$

اکنون اگر به کمک رابطه‌ی ۳ـ۲۰ مقدار انرژی الکترون در مدار مجاز nام را محاسبه کنیم، به‌دست می‌آوریم :

$$E_n = -\frac{2\pi^2 mk^2 e^4}{h^2} \times \frac{1}{n^2} \qquad n = 1, 2, \ldots \qquad (۲۳ـ۳)$$

بدین ترتیب الکترون تنها مجاز است انرژی‌ای برابر با یکی از مقدارهایی که از رابطه‌ی ۳ـ۲۳ به‌دست می‌آید داشته باشد. هر یک از این مقدارهای مجاز را یک ***تراز انرژی*** می‌نامند.

۴ـ 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 ترازانرژی بالاتر به یک تراز انرژی پایین‌تر برود. در این صورت انرژی فوتون موج الکترومغناطیسی گسیل شده برابراختلاف انرژی بین دو تراز است، یعنی:

$$hf = E_{n_1} - E_{n_2} \qquad (۲۴ـ۳)$$

رابطه‌ی ۳ـ۲۳ را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم :

$$E_n = -\frac{E_R}{n^2} \qquad (۲۵ـ۳)$$

که در آن با استفاده از مقدار کمیت‌های ثابت k، m، e و h داریم :

$$E_R = \frac{2\pi^2 k^2 me^4}{h^2} = 2/17 \times 10^{-18} J = 13/6 eV$$

این مقدار انرژی را **یک ریدبرگ** می‌نامند. یک ریدبرگ برابر ۱۳/۶ الکترون ولت و $2/17 \times 10^{-18}$ 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 (۳ـ۲۵) به‌ازای $n = 2, 3, \ldots$ به‌دست می‌آید :

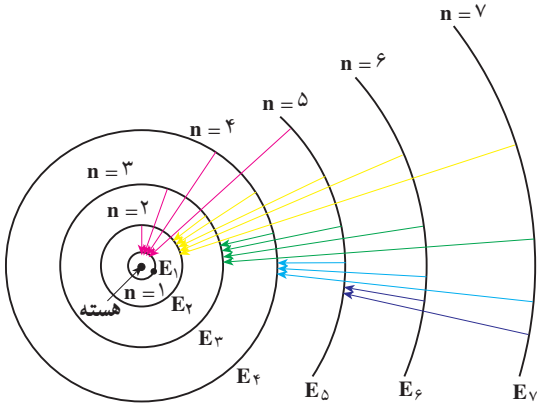
$$n = 2 \Rightarrow E_2 = -\frac{E_R}{4} = -3/4 eV = \frac{-1}{4} \text{ ریدبرگ}$$

و

$$n = 3 \Rightarrow E_3 = -\frac{E_R}{9} = -1/5 eV = -\frac{1}{9} \text{ ریدبرگ}$$

و به همین ترتیب برای 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.

مدارهای الکترون در الگوی بور برای اتم هیدروژن در شکل ۳ــ۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۳ــ۱۹

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 ریدبرگ ــ بالمر نیز به‌درستی توضیح داده شد.

مثال ۳ــ۸

هنگامی که الکترون در اتم هیدروژن از مدار $n_۱$ به مدار $n_۲$ $(n_۱ > n_۲)$ می‌رود.

الف : بسامد فوتون موج الکترومغناطیسی گسیل شده را به‌دست آورید.

ب : طول موج این فوتون را محاسبه و نتیجه را با رابطه‌ی ریدبرگ مقایسه کنید.

پاسخ

الف : با استفاده از رابطه‌های ۳ــ۲۴ و ۳ــ۲۵ داریم :

$$f = \frac{E_{n_۱} - E_{n_۲}}{h} = \frac{E_R}{h}\left(\frac{۱}{n_۲^۲} - \frac{۱}{n_۱^۲}\right)$$

ب : داریم :

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

که در آن c سرعت نور است. در نتیجه :

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{E_R}{h}\left(\frac{۱}{n_۲^۲} - \frac{۱}{n_۱^۲}\right)$$

از این رابطه نتیجه می‌گیریم :

$$\frac{۱}{\lambda} = \frac{E_R}{hc}\left(\frac{۱}{n_۲^۲} - \frac{۱}{n_۱^۲}\right)$$

از سوی دیگر داریم :

$$\frac{E_R}{hc} = \frac{۲/۱۷\times۱۰^{-۱۸}}{۶/۶۳\times۱۰^{-۳۴}\times۳\times۱۰^{۸}} = ۱/۰۹\times۱۰^{۷}\,m^{-۱} = ۰/۰۱۰۹(nm)^{-۱}$$

که همان ثابت ریدبرگ است.

در نتیجه با فرضیه‌های بور می‌توانیم رابطه‌ی تجربی ریدبرگ را به‌دست آوریم و طیف اتمی هیدروژن را توجیه کنیم. به این ترتیب وقتی الکترون از یکی از مدارهای با $n_۱ > ۲$ به مدار $n_۲ = ۲$ می‌رود، یکی از خط‌های رشته‌ی بالمر را گسیل می‌کند.

تمرین ۳ــ۷

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 $n_۱$ به تراز انرژی $n_۲$ $(n_۲ > n_۱)$ منتقل کنیم، باید به آن مقداری انرژی درست برابر اختلاف انرژی دو تراز بدهیم. هر چه اختلاف $n_۱$ با $n_۲$ بیش‌تر باشد، انرژی داده شده به الکترون نیز باید بیش‌تر باشد. این مقدار انرژی را الکترون با جذب فوتونی که درست همین مقدار انرژی دارد به‌دست می‌آورد.

فعالیت ۳ــ۶

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 ۳ــ۲۳ نیز به همین معناست.

انرژی الکترون در مدار اول بور برابر $E_1 = -13/6\,eV$ است ؛ و این بدان معنی است که برای آن که الکترونی را که در حالت پایه‌ی اتم هیدروژن است کاملاً از قید هسته رها کنیم، باید به آن $13/6\,eV$ انرژی بدهیم. این مقدار انرژی را ***انرژی بستگی*** الکترون در تراز اول اتم هیدروژن می‌نامیم. این مقدار با تجربه به خوبی سازگار است.

تمرین ۳ــ۸

انرژی بستگی الکترون را در هر یک از حالت‌های برانگیخته‌ی E_2 و E_3 اتم هیدروژن به‌دست 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 هلیم یک بار یونیده (هلیمی که یک الکترون از دست داده باشد)، لیتیم دوبار یونیده، و الی آخر، را محاسبه کنیم. در این صورت انرژی‌های مجاز از رابطه‌ی ۳ــ۲۶ به‌دست می‌آید.

$$E_n = -E_R \frac{Z^2}{n^2} \qquad (۳ــ۲۶)$$

که در آن Z تعداد پروتون‌های هسته‌ی اتم می‌باشد.

مثال ۳ــ۹

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 $n = 3 \to n = 2$ و $n = 4 \to n = 2$.
انرژی این تابش‌ها و طول موج‌های متناظر با آن‌ها عبارت‌اند از :

$$E_3 - E_2 = -(13/6\,eV)(4^2)\left(\frac{1}{9} - \frac{1}{4}\right) = 30/2\,eV$$

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{۱۲۴۰eV.nm}{۳۰/۲eV} = ۴۱\ nm$$

$$E_۴ - E_۲ = -(۱۳/۶eV)(۴^۲)(\frac{۱}{۱۶} - \frac{۱}{۴}) = ۴۰/۸eV$$

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{۱۲۴۰eV.nm}{۴۰/۸eV} = ۳۰/۴\ nm$$

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.

۳ــ۵ــ آشنایی با لیزر

بیش از ۴۰ سال از ساخت نخستین لیزر یاقوتی توسط مایمن[۱] و نخستین لیزر گازی هلیم ــ 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 فنّاوری امکان ساخت اولین لیزر را فراهم کند. از آن پس کاربرد لیزر در زمینه‌های مختلف به سرعت افزایش یافت به‌طوری که هم‌اکنون در بسیاری از وسیله‌های مورد استفاده‌ی ما در زندگی و صنعت، از قبیل دستگاه‌های بازخوانی اطلاعات از روی لوح‌های فشرده، چاپگرها، شبکه‌های مخابرات کابل نوری، دستگاه‌های برش فلزات (شکل ۳ــ۲۰ــالف) و ... کاربرد زیادی پیدا کرده است. در حرفه‌ی پزشکی نیز جهت انجام پاره‌ای امور همچون جراحی، بخیه‌ی بافت‌های بدن، اصلاح دید چشم (شکل ۳ــ۲۰ــ ب) و ... کاربرد زیادی دارد.

۱ــ T.H.Maiman

الف

ب

شکل ۳ــ۲۰

فعالیت ۳ــ۷

به اتفاق دیگر اعضای گروه خود، فهرستی دیگر از کاربردهای لیزر در زندگی، صنعت و فنّاوری تهیه کنید و به کلاس درس ارائه دهید.

در بخش‌های قبل دیدیم که هرگاه در یک اتم الکترون‌ها روی مدارهای مانا حرکت کنند، تابشی از آن اتم گسیل نمی‌شود. همچنین دیدیم برای آن‌که الکترونی را از حالت n_1 به حالت n_2 $(n_2 > n_1)$ منتقل کنیم، باید به آن مقدار معینی انرژی بدهیم، که در این صورت گفته می‌شود، اتم به حالت برانگیخته رفته است و آن را به صورت زیر نمایش می‌دهیم :

$$\text{اتم}^* \longrightarrow \text{فوتون} + \text{اتم}$$

علامت ستاره حاکی از حالت برانگیخته است. بر هم کنش فوتون با اتم را جذب می‌نامیم که در نمودارهای شکل ۳ــ۲۱ نشان داده شده است. شکل ۳ــ۲۱ــ الف اتم را قبل از دریافت تابش و شکل ۳ــ۲۱ــ ب اتم را پس از دریافت تابش نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینید یکی از الکترون‌هایی

الف ب

شکل ۳ــ۲۱

که در تراز E_1 قرار دارد با جذب انرژی hf به تراز E_2 می‌رود. به‌عبارت دیگر :

$$E_1 + hf = E_2$$

یا

$$\Delta E = E_2 - E_1 = hf$$

لازم به ذکر است که، اتم تنها فوتون‌هایی را جذب می‌کند که انرژی آن‌ها، hf ، با اختلاف انرژی بین ترازهای اتمی، ΔE ، برابر باشد. همچنین دیدیم که هرگاه اتم در حالت برانگیخته باشد با گسیل یک فوتون به حالت پایین‌تر می‌رود. این برهم کنش **گسیل خودبه‌خود** نامیده می‌شود و آن‌را به صورت زیر نمایش می‌دهیم :

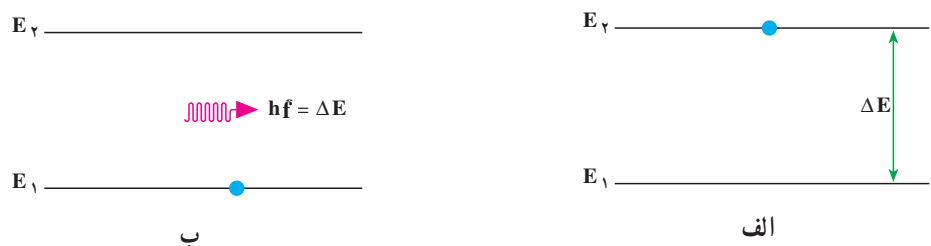
$$\text{فوتون} + \text{اتم} \longrightarrow \text{اتم}^*$$

این برهم کنش در نمودارهای شکل ۳ــ۲۲ نشان داده شده است. شکل ۳ــ۲۲ــ الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۳ــ۲۲ــ 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 درحالت برانگیخته است. آنگاه یک فوتون با انرژی hf که برابر اختلاف انرژی دو تراز اتم 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 :

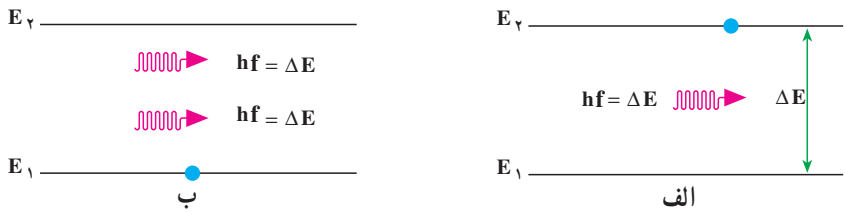
$$\text{۲ فوتون} + \text{اتم} \longrightarrow \text{فوتون} + \text{اتم}^*$$



شکل ۳ــ۲۲

این برهم کنش در نمودارهای شکل ۳ــ۲۳ نشان داده شده است. شکل ۳ــ۲۳ــ الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۳ــ۲۳ــ ب اتم را در حالت پایه نشان می‌دهد. توجه به این نکته ضروری

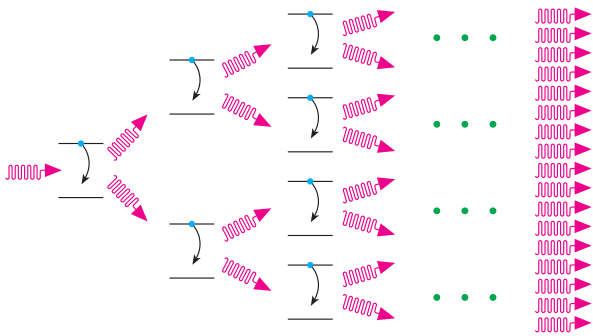
است که اگر اتم در حالتی که در شکل ۳ــ۲۳ــ الف نشان داده شده است به حال خود هم گذاشته می‌شد، سرانجام الکترون با تابش یک فوتون به حالت پایین‌تر یا پایه می‌رفت، در حالی که با تابش یک فوتون به آن، نه تنها این فرایند سریع‌تر انجام می‌شود بلکه همان‌طور که در شکل ۳ــ۲۳ــ ب نیز دیده می‌شود، فوتون گسیل شده از اتم، با فوتون فرودی هم‌جهت، همفاز و هم‌انرژی است.



شکل ۳ــ۲۳

اکنون فرض کنید مجموعه‌ای از اتم‌های یکسان، که همگی در یک حالت برانگیخته‌اند، در اختیار داریم (شکل ۳ــ۲۴). فوتونی با انرژی مناسب به اتم اول فرود می‌آید و سبب گسیل القایی یک فوتون هم‌جهت، همفاز و هم‌انرژی با فوتون فرودی می‌شود. به این ترتیب دو فوتون که به لحاظ ویژگی‌های فیزیکی کاملاً مشابه‌اند به‌وجود می‌آید. اینک هر یک از این دو فوتون باعث فرایند گسیل القایی دیگری می‌شوند، و 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، اساس‌کار لیزر[۱] را تشکیل می‌دهد. توجه داشته باشید که شکل ۳ــ۲۴ صرفاً طرح‌واره‌ای از فرایند گسیل القایی را نشان می‌دهد.



شکل ۳ــ۲۴

۱ــ کلمه‌ی لیزر از سر، حرف واژه‌های انگلیسی درعبارت زیر گرفته شده و به معنای «تقویت نور به روش گسیل القایی تابش» است.

Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (**LASER**)

تمرین‌های فصل سوم

۱ــ چند پدیده را نام ببرید که فیزیک کلاسیک قادر به توجیه آن نیست.

۲ــ دمای سطح خورشید حدود ۶۰۰۰K است.

الف) بیشینه‌ی تابندگی خورشید در چه طول موجی است؟

ب) انرژی هر فوتون در این طول موج چند الکترون ولت است؟

پ) این طول موج در چه ناحیه‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی است؟

۳ــ یکی از سازوکارهای تعیین وضعیت یک ماهواره، مبتنی بر آشکارسازی امواج گسیل شده از سطح زمین است. اگر دمای سطح زمین را $27^{\circ}C$ فرض کنیم، طول موج دریافتی توسط این آشکارساز چه مقدار و در چه محدوده‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی خواهد بود؟

۴ــ توضیح دهید تغییر هر یک از کمیت‌های زیر چه تأثیری در نتیجه‌ی پدیده‌ی فوتوالکتریک دارد.

الف) دو برابر کردن بسامد نور فرودی

ب) دو برابر کردن طول موج نور فرودی

پ) دو برابرکردن شدت نور فرودی در یک بسامد معین

۵ــ طول موج قطع فوتوالکتریک یک سطح فلزی برابر ۳۲۵/۶nm است. به ازای چه طول موجی، ولتاژ متوقف کننده برابر ۰/۹۷V است؟

۶ــ فوتون‌هایی به سطح یک قطعه سدیم که تابع کار آن ۲/۲eV است فرود می‌آید و موجب گسیل فوتوالکترون‌هایی از سطح این فلز می‌شود. هرگاه ولتاژ متوقف کننده‌ای برابر ۵V اعمال شود، جریان ناشی از فوتوالکترون‌ها قطع می‌شود. طول موج فوتون‌های فرودی چقدر است؟

۷ــ انرژی لازم برای جداکردن یک الکترون از سطح فلز سدیم برابر با ۲/۲۸eVاست.

الف : آیا فوتون‌هایی با طول موج ۶۸۰nm قادر به جداکردن الکترون از سطح این فلز هستند؟

ب : طول موج قطع برای گسیل فوتوالکترون از سطح فلز سدیم چقدر است و این طول موج مربوط به چه رنگی است؟

۸ــ در چه مواردی یک جسم، طیف پیوسته یا ناپیوسته گسیل می‌کند؟

۹ــ 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؟

۱۰ــ آیا ممکن است به کمک طیف خورشید، عناصر موجود در خورشید را شناسایی کرد؟

توضیح دهید.

۱۱ ــ ضعف مدل اتمی رادرفورد را در مورد پایداری اتم توضیح دهید. بور چگونه پایداری اتم هیدروژن را توضیح داد؟

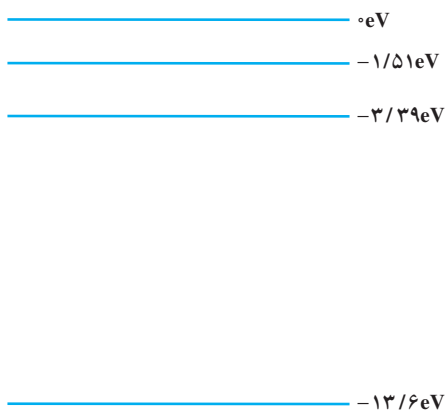
۱۲ ــ ناپیوسته بودن طیف گسیلی اتم هیدروژن را براساس مدل اتمی بور توضیح دهید.

۱۳ــ در پدیده‌ی شفق قطبی مولکول‌های اکسیژن و نیتروژنِ 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 ۶۳۰nm است. رنگ و انرژی این فوتون‌ها را تعیین کنید.

۱۴ــ طول موج رشته‌ی لیمان مربوط به اتم هیدروژن را با استفاده از رابطه‌ی ریدبرگ حساب کنید. مکان این خطوط را در طیف موج‌های الکترومغناطیسی مشخص کنید.

۱۵ ــ چه جنبه‌هایی از مدل بور در مورد اتم هیدروژن الف : کلاسیکی، و ب : غیرکلاسیکی است؟

۱۶ــ شکل ۳ــ۲۵ تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می‌دهد.



شکل ۳ــ۲۵

الف : چرا تراز ۱۳/۶eV−، تراز پایه نامیده می‌شود.

ب : نشان دهید که کم‌ترین طول موج تابش الکترومغناطیسی گسیل شده از اتم هیدروژن تقریباً ۹۰nm است.

پ : کدام گذار (بین دو تراز) می‌تواند به گسیل فوتونی با طول موج ۶۶۰nm منجر شود؟

۱۷ــ اگر الکترون در اتم هیدروژن در تراز $n = 4$ باشد چه طول موج‌هایی را می‌تواند تابش کند؟

۱۸ــ یک لامپ بخار سدیم، فوتون‌هایی با طول موج ۵۸۹ nm گسیل می‌کند. اگر توان تابشی لامپ ۶W باشد در هر ثانیه چند فوتون از این لامپ گسیل می‌شود؟

۱۹ــ طول موج فوتون‌های گسیلی از یک لامپ نارنجی رنگ برابر ۶۰۰nm است. بسامد و انرژی فوتون‌های گسیلی را حساب کنید. انرژی را بر حسب ژول و همچنین الکترون ــ ولت بیان کنید.

۲۰ــ انرژی یونش، انرژی لازم برای خارج کردن یک الکترون از اتم است. انرژی یونش را در موارد زیر حساب کنید.

الف : حالت پایه‌ی اتم هیدروژن $(n = ۱)$

ب : تراز $n = ۳$ اتم هیدروژن.

۲۱ــ با استفاده از رابطه‌ی بور اختلاف انرژی $\Delta E(n_۱ \to n_۲) = E_{n_۱} - E_{n_۲}$ را حساب کنید و نشان دهید که :

الف : $\Delta E(۴ \to ۲) = \Delta E(۴ \to ۳) + \Delta E(۳ \to ۲)$

ب : $\Delta E(۴ \to ۱) = \Delta E(۴ \to ۲) + \Delta E(۲ \to ۱)$

۲۲ــ یک اتم هیدروژن درحالت $n = ۶$ 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 $\Delta n = ۱$ مجاز باشند، در این‌صورت چند نوع فوتون با انرژی مختلف گسیل خواهد شد؟

۲۳ــ 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؟

۲۴ــ توان باریکه‌ی نور خروجی از یک لیزر گازی هلیم نئون برابر ۰/۵ میلی‌وات است. اگر توان ورودی این لیزر ۵۰W باشد،

الف : بازده این لیزر را حساب کنید.

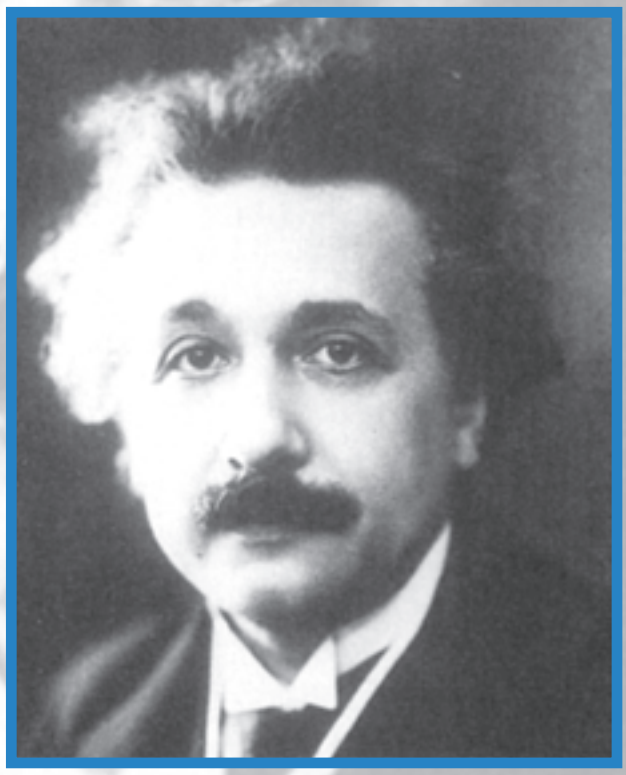
ب : اگر طول موج باریکه‌ی نورخروجی ۶۳۳nm باشد، در هر ثانیه چند فوتون از این لیزر گسیل می‌شود؟

۲۵ــ کوتاه‌ترین و بلندترین طول موج‌های سری لیمان هلیم یک مرتبه یونیده را حساب کنید.

۲۶ــ انرژی حالت پایه‌ی لیتیم دو مرتبه یونیده $(Z = ۳)$ را حساب کنید.

۴

آشنایی با فیزیک حالت جامد و ساختار هسته



آلبرت اینشتین
(۱۹۵۵ـ۱۸۷۹م)

آشنایی با فیزیک حالت جامد و ساختار هسته

نگاهی به فصل: در فصل قبل با برخی از مفهوم‌های فیزیک جدید آشنا شدیم و دانستیم که نظریه‌های نسبیت و کوانتومی، در سده‌ی بیستم میلادی، فیزیک را به‌طور کامل متحول ساخت. امروزه دانشمندان به کمک نظریه‌ی مکانیک کوانتومی برای بسیاری از پدیده‌ها به توجیه‌هایی کاملاً سازگار با تجربه دست یافته‌اند.

ما در این فصل، به توصیف برخی از این نظریه‌ها و چگونگی توجیه نتیجه‌های تجربی توسط آن‌ها می‌پردازیم. نخست مسئله‌ی رسانش الکتریکی در جسم‌های جامد را بررسی می‌کنیم تا نشان دهیم که با استفاده از **نظریه‌ی نواری** می‌توان تفاوت بین رسانش جسم‌های مختلف را توجیه کرد.

مبحث دیگری نیز در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرد و آن ساختار هسته‌ی اتم و برخی از ویژگی‌ها و واکنش‌های مربوط به آن است.

۴ــ۱ ــ موادّ رسانا و نارسانا

در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که در فلزات، برخی از الکترون‌ها به‌راحتی از اتم خود جدا می‌شوند. چون این الکترون‌ها می‌توانند آزادانه درون جسم حرکت کنند، آن‌ها را الکترون‌های آزاد می‌نامند. شارش بار الکتریکی در رساناها به‌حرکت این الکترون‌ها مربوط می‌شود.

در کتاب فیزیک ۳ و آزمایشگاه نیز مقاومت الکتریکی را تعریف کردیم و دیدیم که مقاومت ویژه‌ی پاره‌ای از رساناها، مانند نقره و مس، کم و پاره‌ای دیگر، مانند تنگستن و آهن، نسبتاً زیاد است.

فعالیت ۴ــ۱

با بحث و بررسی در گروه خود، مطالب مربوط به قانون اهم و مقاومت الکتریکی را که در کتاب فیزیک ۳ و آزمایشگاه خواندید مرور کنید.

با انجام فعالیت بالا به یاد آورده‌اید که،

الف :هر ماده مقاومت ویژه‌ی الکتریکی مخصوص به خود را دارد.

ب : هرچه مقاومت ویژه‌ی الکتریکی یک جسم کم‌تر باشد آن جسم رسانای الکتریکی بهتری است.

مقاومت ویژه‌ی الکتریکی یک رسانای خوب، مانند نقره‌ی خالص، در دمای اتاق ($27^\circ C$) به کوچکی $1/6\times10^{-8}$ اهم‌متر است. در حالی که مقاومت ویژه‌ی الکتریکی یک نارسانا مانند تفلون، به بزرگی 10^{14} اهم‌متر است. به اختلاف بزرگ بین این دو عدد توجه کنید. مقاومت ویژه‌ی پاره‌ای از مواد در جدول ۴ــ۱ داده شده است. همان‌گونه که در این جدول می‌بینید، دسته‌ای از مواد، مانند ژرمانیوم و سیلیسیوم، نیز هستند که مقاومت ویژه‌ی الکتریکی آن‌ها در دمای اتاق بین مقاومت ویژه‌ی الکتریکی رساناها و نارساناهاست. این دسته از مواد که **نیمرسانا** نام دارند، ویژگی‌های جالب توجه دیگری نیز دارند که آن‌ها را هم از رساناها و هم از نارساناها متمایز می‌سازد. برخی از این ویژگی‌ها را در بخش ۴ــ۴ خواهیم شناخت.

جدول ۴ــ۱ــ مقاومت ویژه‌ی برخی از مواد (در دمای اتاق)

ماده	مقاومت ویژه برحسب اهم‌متر
آلومینیم	$2/8\times10^{-8}$
برنج	$\approx 8\times10^{-8}$
آلیاژ کنستانتان (مس ۶۰٪ نیکل ۴۰٪)	$\approx 4\times10^{-8}$
مس	$1/7\times10^{-8}$
آهن	$\approx 10\times10^{-8}$
آلیاژ منگانین (مس ۸۴٪ منگنز ۱۲٪ نیکل ۴٪)	44×10^{-8}
جیوه	96×10^{-8}
آلیاژ نیکروم (نیکل ۵۹٪ مس ۲۳٪ کرم ۱۷٪)	100×10^{-8}
پلاتین	10×10^{-8}
نقره	$1/6\times10^{-8}$
تنگستن	$5/5\times10^{-8}$
ژرمانیوم	$4/6\times10^{-1}$
سیلیسیوم	۱۰۰ــ۱۰۰۰
شیشه	$10^{10}-10^{14}$
تفلون	10^{14}
خون	۱/۵

در ساده‌ترین مدل، یک جسم جامد را به‌صورت مجموعه‌ای از اتم‌ها درنظر می‌گیرند. حال اگر در یک جسم الکترون‌های هر اتم به هسته‌ی خود مقید باشند، به‌طوری که نتوانند از ربایش الکتروستاتیکی آن رها شوند، آن ماده نارسانا (عایق) است. از سوی دیگر اگر برخی از الکترون‌ها بتوانند از قید هسته آزاد شوند، و درنتیجه بار الکتریکی را منتقل کنند، ماده رساناست.

این مدل ساده گرچه تفاوت بین یک جسم رسانا و یک جسم نارسانا را توجیه می‌کند، ولی نمی‌تواند برای بسیاری از پرسش‌هایی که درباره‌ی رسانش الکتریکی مطرح می‌شود پاسخ دهد. از جمله این که :

- مواد نیمرسانا چه ویژگی‌هایی دارند که هم با رساناها و هم با نارساناها متفاوت‌اند؟ مثلاً مقاومت ویژه‌ی رساناها با افزایش دما زیاد می‌شود ولی همان‌گونه که در بخش **۴ــ۴** خواهیم دید مقاومت ویژه‌ی نیمرساناها با افزایش دما کاهش می‌یابد.
- چرا الکترون‌ها در برخی از شرایط مقید به هسته می‌مانند و در برخی شرایط نه؟ مثلاً چرا کربن وقتی به شکل الماس متبلور می‌شود نارساناست ولی به‌صورت گرافیت رسانای الکتریکی است؟
- چرا رسانش الکتریکی نه تنها بین رساناها و نارساناها متفاوت است، بلکه رساناهای مختلف نیز همان‌گونه که جدول **۴ــ۱** نشان می‌دهد، مقاومت‌های ویژه‌ی الکتریکی متفاوت دارند؟

برای یافتن پاسخ چنین پرسش‌هایی است که به **مدل کامل‌تری برای یک جسم جامد** نیاز داریم. این مدل توسط نظریه‌ای که **نظریه‌ی نواری جسم جامد** نام دارد ارائه می‌شود.

۴ــ۲ــ نظریه‌ی نواری

در فصل ۳ دیدیم که در اتم، الکترون‌ها بر روی مدارهایی، که هر یک انرژی معینی دارد، در اطراف هسته‌ی اتم حرکت می‌کنند. این مقدار انرژی را تراز انرژی آن مدار می‌نامند. علاوه‌بر این دیدیم که هریک از این مدارها با تراز انرژی وابسته به آن را **یک حالت کوانتومی** برای الکترون در اتم می‌نامند. درباره‌ی نحوه‌ی توزیع الکترون‌ها روی ترازها هم دیدیم که الکترون‌ها ترجیحاً مدارهای کم انرژی‌تر (ترازهای انرژی پایین‌تر) را اشغال می‌کنند. درنتیجه حالت‌های کوانتومی در هر اتم از تراز پایین به بالا توسط الکترون‌های آن اتم اشغال می‌شود. در این وضعیت می‌گوییم اتم **در حالت پایه‌ی** خود قرار دارد. همچنین دیدیم که الکترون می‌تواند با جذب مقدار معینی انرژی تراز خود را ترک کند و به تراز بالاتر که خالی است برود، یعنی اتم به **حالت برانگیخته** درآید. مقدار انرژی لازم برای این گذار از یک تراز به تراز بالاتر درست برابر اختلاف انرژی دو تراز است.

همه‌ی این اطلاعات درباره‌ی توزیع الکترون‌ها در اتم، با استفاده از روش‌های متداول در

مکانیک کوانتومی و بر پایه‌ی اصول مکانیک کوانتومی و با درنظر گرفتن یک هسته‌ی با بار مثبت و الکترون‌های اطراف آن، به‌دست می‌آید.

اکنون این سؤال پیش می‌آید که ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد چگونه‌اند؟ نظریه‌ی نواری پاسخی است که مکانیک کوانتومی به این سؤال می‌دهد و ما در این‌جا به زبان ساده و کاملاً به طور کیفی به شرح آن می‌پردازیم.

در یک جسم جامد به جای یک اتم، مجموعه‌ای از اتم‌ها وجود دارد که بسیار نزدیک به یک‌دیگر هستند، درنتیجه دیگر تنها یک هسته‌ی با بار مثبت و الکترون‌های اطراف آن نیست که بررسی شود، بلکه با مسئله‌ی مکانیک کوانتومی جدیدی روبه‌رو هستیم که در آن الکترون‌ها تحت تأثیر نیروهای حاصل از تمام هسته‌های مثبت حرکت می‌کنند.

این مسئله یک مسئله‌ی تخصصی در زمینه‌ی فیزیک حالت جامد است که دانشمندان برای حل آن برای هر جسم روش‌های ویژه‌ای به‌کار برده‌اند. چون بررسی این روش‌ها و شگردهای مربوط بسیار فراتر از سطح این کتاب است ؛ ما در این‌جا تنها به توضیح مهم‌ترین ویژگی‌های پاسخی که از حل این مسئله به‌دست می‌آید می‌پردازیم. این ویژگی‌ها عبارت‌اند از :

الف : ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد (مانند مدارهای اتمی) مقدارهای انرژی ویژه‌ی خود را دارند.

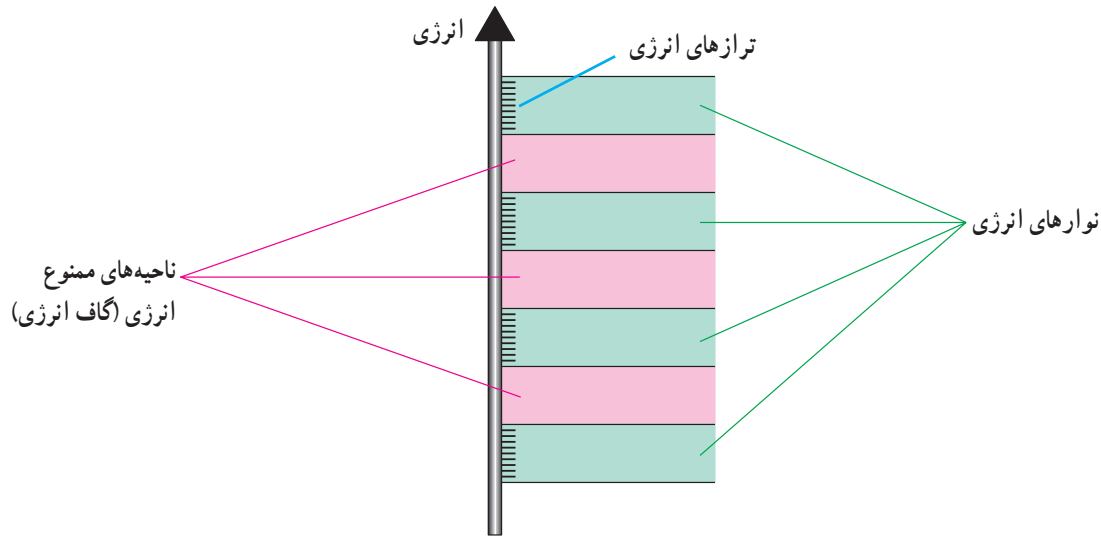
ب : ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد نیز همانند ترازهای اتمی گسسته‌اند.

پ : هر تراز انرژی تنها توسط یک الکترون می‌تواند اشغال شود.*

ت : از همه مهم‌تر این که ترازهای انرژی الکترون در جسم جامد تشکیل نوارهایی می‌دهند. هر نوار شامل تعداد بسیار زیادی ترازهای گسسته است که (از نظر مقدار انرژی) بسیار نزدیک به هم هستند. ولی بین نوارهای مختلف در برخی از موارد ممکن است ازنظر انرژی فاصله‌ی زیادی باشد. یعنی بین بالاترین تراز انرژی در یک نوار و پایین‌ترین تراز انرژی در نوار بعدی ممکن است اختلاف انرژی زیادی وجود داشته باشد. در این فاصله هیچ تراز انرژی وجود ندارد. این فاصله را ناحیه‌ی ممنوع یا گاف انرژی می‌نامند.

نمودار نوارهای انرژی در شکل ۴ــ۱ نمایش داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده

* در برخی موارد ترازهای الکترونی مربوط به اسپین‌های مختلف به عنوان ترازهای جداگانه در نظر گرفته می‌شوند که به هرکدام یک حالت کوانتومی متمایز نسبت داده می‌شود. در این کتاب نیز این روش مورد استفاده قرار گرفته است. در بعضی موارد نیز به طور معادل، ترازهای با اسپین مخالف به عنوان یک تراز در نظر گرفته می‌شوند در این حالت گفته می‌شود که هر تراز با دو الکترون اشغال می‌شود.



شکل ۴ــ۱

می‌شود ترازهای انرژی فقط در قسمت نوارها وجود دارند و در گاف‌های انرژی، تراز انرژی وجود ندارد. شایان ذکر است که در این نوع نمودارهای انرژی محور قائم محور انرژی است و محور افقی کمیّت بخصوصی را نشان نمی‌دهد.

اکنون ببینیم الکترون‌ها چگونه بین ترازهای مختلف توزیع می‌شوند.

الکترون‌های موجود در جسم جامد معمولاً پایین‌ترین ترازهای انرژی موجود را اشغال می‌کنند. ولی چون هیچ دو الکترونی نمی‌توانند یک تراز را اشغال کنند، درنتیجه همه‌ی الکترون‌ها نمی‌توانند در پایین‌ترین تراز باشند. از این رو ترازهای انرژی از پایین به بالا اشغال می‌شوند، تا جایی که دیگر تراز خالی در پایین‌ترین نوار (نوار اول) موجود نباشد. حال اگر تعداد الکترون‌ها در جسم جامد بیش از تعداد ترازها در نوار اول باشد، ترازهای انرژی نوار بعدی نیز به‌ترتیب از پایین به بالا اشغال می‌شود، و این روند تا جایی ادامه می‌یابد که همه‌ی الکترون‌ها در ترازهای موجود، در پایین‌ترین نوارها، جای گیرند. به این ترتیب آخرین نواری که با الکترون‌ها اشغال می‌شود ممکن است یا کاملاً پر باشد (یعنی همه‌ی ترازهای آن اشغال شده باشد) و یا بخشی پر باشد (یعنی ترازهای اشغال نشده هم داشته باشد). روشن است که در این صورت نوارهای بالاتر خالی‌اند (یعنی هیچ الکترونی ترازهای آن‌ها را اشغال نکرده است). نتیجه این که، یک نوار انرژی، ممکن است پر یا بخشی پر و یا خالی باشد.

در جسم جامد یک الکترون چگونه می‌تواند تراز انرژی خود را تغییر دهد؟

دیدیم که در یک اتم، الکترون می‌تواند با جذب مقداری انرژی (که درست برابر است با

اختلاف انرژی بین ترازی که اشغال کرده است با یک تراز خالی بالاتر) به تراز بالاتر برود. همین فرایند در جسم جامد نیز روی می‌دهد. یعنی الکترون با جذب انرژی برانگیخته می‌شود و به تراز انرژی خالی بالاتر برود. این فرایند را گذار الکترون از یک تراز به تراز انرژی دیگر می‌نامند.

فعالیت ۴ــ۲

با بحث در گروه خود، دو گذار متفاوت زیر را برای الکترون بررسی کنید.
الف : گذار الکترون از یک تراز به تراز خالی دیگر در همان نوار (گذار درون نواری)
ب : گذار الکترون از یک تراز به تراز خالی دیگر در نوار انرژی بالاتر (گذار بین نواری)
با استدلال توضیح دهید که کدام گذار به جذب انرژی کم‌تری نیاز دارد؟

همان‌گونه که با انجام فعالیت بالا دریافته‌اید، گذار الکترون از یک تراز به تراز دیگر در همان نوار، در مقایسه با گذار از یک نوار به نوار دیگر، به انرژی کم‌تری نیاز دارد. این‌گونه گذارها البته تنها درصورتی ممکن است انجام شوند که بخشی از نوار پر باشد.

برای گذار الکترون از یک نوار به نوار دیگر معمولاً به آن‌چنان انرژی زیادی نیاز است که حتی با برقراری اختلاف پتانسیل در دو سر رسانا، یعنی با ایجاد میدان الکتریکی در داخل آن نیز این نوع گذار اتفاق نمی‌افتد. به‌همین دلیل است که الکترون‌های نوارهای پر سهمی در رسانش الکتریکی ندارند، زیرا با انرژی‌ای که در میدان الکتریکی می‌توانند به‌دست آورند، نمی‌توانند نوار خود را ترک کنند و درون نوار پر هم تراز خالی برای گذار وجود ندارد. درنتیجه این الکترون‌ها نمی‌توانند از میدان الکتریکی انرژی بگیرند. به‌عبارت دیگر **تنها آن دسته از الکترون‌ها در رسانش الکتریکی نقش دارند که در نوارهای بخشی پر هستند.**

در این‌جا تذکر دو نکته‌ی مهم ضروری است :

نکته‌ی اول: وقتی می‌گوییم یک الکترون از یک تراز به تراز بالاتر می‌رود، منظورمان این است که الکترون انرژی خود را به مقدار معینی افزایش داده است، نه این که الکترون از جایی درون جسم جامد به جای دیگر رفته است.

نکته‌ی دوم: انرژی موردنیاز الکترون برای انجام گذار بین ترازهای مختلف در یک جسم جامد از دو منبع می‌تواند تأمین شود ؛ یکی میدان الکتریکی‌ای که جسم جامد در آن قرار گرفته و

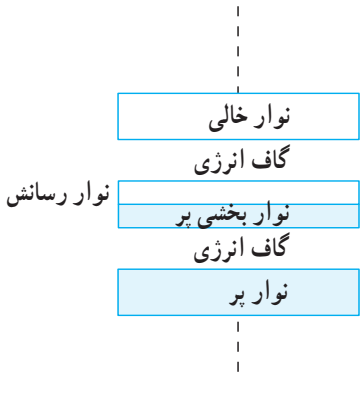
دیگری برانگیختگی گرمایی.

در ادامه‌ی این مطلب به بررسی این موضوع می‌پردازیم که با مدل ساختار نواری جسم جامد چگونه می‌توان رسانش الکتریکی جسم‌های مختلف را تفسیر کرد.

۴ــ۳ ــ رسانش الکتریکی در مدل ساختار نواری

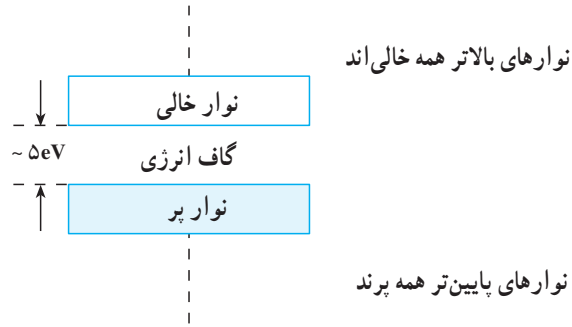
رساناها، نارساناها و نیمرساناها، ساختارهای نواری متفاوتی دارند،که هریک به‌خوبی توجیه کننده‌ی ویژگی‌های الکتریکی آن‌هاست.

الف: ساختار نواری اجسام رسانا: اگر در ساختار نواری جسمی نوار بخشی پر وجود داشته باشد آن جسم ***رسانا*** است ؛ زیرا الکترون‌های آن نوار، به آسانی می‌توانند تحت تأثیر میدان الکتریکی تراز انرژی خود را عوض کنند، و در رسانش شرکت جویند. این الکترون‌ها را ***الکترون‌های رسانش*** و نوار بخشی پر را نوار رسانش می‌نامند. تعداد الکترون‌های نوار رسانش، در یک رسانای فلزی بسیار زیاد است. در شکل ۴ــ۲ ساختار نواری یک رسانا نشان داده شده است. مشخصه‌ی اصلی یک رسانا، در ساختار نواری، داشتن نوار بخشی پر است.



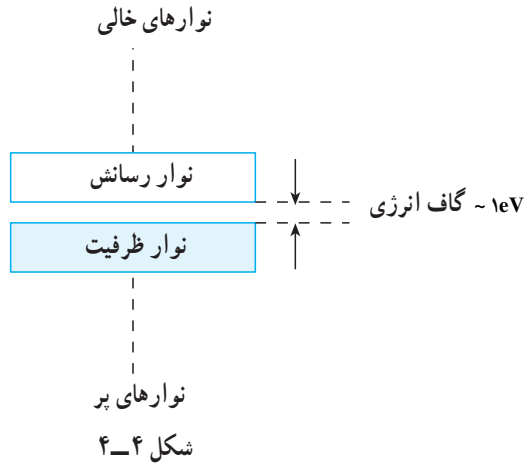
شکل ۴ــ۲

ب: ساختار نواری اجسام نارسانا: نارساناها در ساختار نواری خود نوار بخشی پر ندارند. ساختار نواری یک نارسانا در شکل ۴ــ۳ نشان داده شده است. گاف انرژی بین آخرین نوار پر و اولین نوار خالی در نارساناها بزرگ است، به‌گونه‌ای که هیچ الکترونی نمی‌تواند برانگیخته شود و از نوار پر به نوار خالی برود. از این رو رسانش الکتریکی در این مواد صورت نمی‌گیرد.



شکل ۴ــ۳

پ: ساختار نواری اجسام نیمرسانا: یک جسم نیمرسانا نیز مانند نارساناها دارای نوارهای پر و خالی است و نوار بخشی پر ندارد، با این تفاوت که گاف انرژی بین بالاترین نوار پر و پایین‌ترین نوار خالی در نیمرساناها بسیار کوچک‌تر از این گاف در نارساناهاست. در مبحث نیمرساناها بالاترین نوار پر را ***نوار ظرفیت*** و پایین‌ترین نوار خالی را ***نوار رسانش*** می‌نامند. کوچک بودن گاف انرژی بین نوار ظرفیت و نوار رسانش موجب می‌شود که تعدادی از الکترون‌های نوار ظرفیت در دمای اتاق نیز، با برانگیختگی گرمایی، انرژی لازم برای گذار بین نواری از نوار ظرفیت به نوار رسانش، به‌دست آورند و به نوار رسانش بروند. روشن است هرچه دما بالاتر رود تعداد بیش‌تری از الکترون‌ها می‌توانند این گذار را انجام دهند. ساختار نواری یک نیمرسانا در شکل ۴ــ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴ــ۴

۴ــ۴ــ برخی از ویژگی‌های نیمرساناها

نیمرساناها ویژگی‌های جالب توجهی دارند که آن‌ها را به‌طور کامل از رساناها متمایز می‌سازد. یکی از این ویژگی‌ها نحوه‌ی تغییر مقاومت ویژه‌ی الکتریکی نیمرساناها با دماست. در کتاب فیزیک ۳ و آزمایشگاه در مبحث «اثر دما بر مقاومت رساناهای فلزی» دیدیم که ***افزایش دما سبب افزایش مقاومت ویژه‌ی رساناها می‌شود***. در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه نیز دیدیم که عامل ایجاد مقاومت الکتریکی در رساناها برخورد الکترون‌های آزاد با اتم‌های درحال نوسان است ؛ یعنی هرچه دما بالاتر رود این نوسان‌ها پر دامنه‌تر می‌شود و درنتیجه مقاومت ویژه‌ی الکتریکی بالا می‌رود.

در نیمرساناها هرچه دما افزایش یابد، مقاومت ویژه‌ی الکتریکی (برخلاف مقاومت ویژه‌ی رساناها) کاهش می‌یابد. این نحوه‌ی تغییر را تنها با توجه به ساختار نواری نیمرسانا می‌توان توجیه کرد.

در دماهای بسیار پایین، نیمرسانا، نوار ظرفیتِ کاملاً پر و نوار رسانشِ کاملاً خالی دارد، از این رو

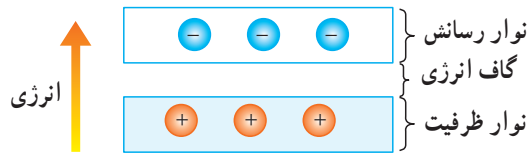
همان‌گونه که پیش از این گفته شد، نه الکترون‌های نوار ظرفیت (که پر است) در رسانش شرکت می‌کنند و نه در نوار رسانش الکترونی وجود دارد. بدین ترتیب در دماهای بسیار پایین، نیمرسانا مثل یک نارساناست. یعنی الکترون‌های آن نمی‌توانند از میدان الکتریکی انرژی کسب کنند و لذا مقاومت ویژه‌ی الکتریکی آن بسیار بالاست. حال اگر دما افزایش یابد تعدادی از الکترون‌ها از نوار ظرفیت به نوار رسانش می‌روند. درنتیجه هم تعداد بسیار کم الکترون در نوار رسانش، در رسانش الکتریکی شرکت می‌کنند و هم چند تراز خالی در نوار ظرفیت ایجاد می‌شود که گذار الکترون‌ها از یک تراز پر در نوار ظرفیت به یکی از این ترازهای خالی در همان نوار میسر می‌شود و درنتیجه نوار ظرفیت نیز سهمی در رسانش الکتریکی پیدا می‌کند و از مقاومت ویژه‌ی الکتریکی آن کاسته می‌شود. ولی با توجه به کم بودن تعداد الکترون‌هایی که به نوار رسانش رفته‌اند و کم بودن ترازهای خالی در نوار ظرفیت،میزان مقاومت ویژه‌ی الکتریکی هنوز زیاد است.

بدین ترتیب هرچه دما بالاتر رود تعداد الکترون‌های نوار رسانش و تعداد ترازهای خالی نوار ظرفیت بیش‌تر می‌شود و سهم هر دو نوار در رسانش الکتریکی بیش‌تر می‌شود که در نتیجه از مقاومت ویژه‌ی الکتریکی بیش‌تر کاسته می‌شود.

برای بیان ویژگی دوم یادآوری می‌کنیم که تاکنون هرجا از انتقال بار الکتریکی سخن گفته‌ایم الکترون‌ها را به‌عنوان حاملان بار معرفی کرده‌ایم. ولی آزمایش نشان می‌دهد که برخی از نیمرساناها به گونه‌ای رفتار می‌کنند که گویی حاملان بار الکتریکی در آن‌ها تنها الکترون‌های با بار منفی نیستند، بلکه ذره‌هایی با جرمی از مرتبه‌ی جرم الکترون ولی با بار مثبت نیز حامل بار هستند.

اینک ببینیم چگونه می‌توانیم این خصوصیت را به کمک نظریه‌ی نواری توجیه کنیم. نوارهای ظرفیت و رسانش یک نیمرسانا در دمای اتاق در شکل ۴ــ۵ نمایش داده شده‌اند. پیش از این گفتیم که تعدادی از الکترون‌های نوار ظرفیت برانگیخته می‌شوند و به نوار رسانش می‌روند. چنین الکترون‌هایی می‌توانند آزادانه در ماده حرکت و در رسانش الکتریکی شرکت کنند.

اکنون به بررسی سهم الکترون‌هایی که در نوار ظرفیت مانده‌اند در رسانش می‌پردازیم. این الکترون‌ها پیش از آن که الکترون‌های دیگر برانگیخته شوند و نوار ظرفیت را ترک کنند، سهمی در



شکل ۴ــ۵

رسانش الکتریکی نداشتند، زیرا تمام ترازهای انرژی موجود در نوار ظرفیت اشغال شده بود، ولی پس از آن که تعدادی از الکترون‌ها به نوار رسانش می‌روند، چند تراز خالی در نوار ظرفیت پیدا می‌شود. این جای خالی الکترون در نوار ظرفیت را **حفره** می‌نامند. در این وضعیت الکترون‌هایی که در نوار ظرفیت مانده‌اند می‌توانند با کسب مقدار نسبتاً کمی انرژی، از تراز خود به یکی از این ترازهای خالی گذاری انجام دهند و در رسانش شرکت کنند. در این صورت همان‌گونه که پیش از این گفتیم نوار ظرفیت نیز در رسانش الکتریکی سهم دارد.

این گذار الکترون از تراز اولیه‌ی خود به تراز خالی، مشابه آن است که حفره از تراز قبلی خود به تراز اولیه‌ی الکترون رفته است. به این ترتیب می‌توانیم به‌جای آن که بگوییم «الکترون، گذاری را درون نوار ظرفیت انجام داده است» بگوییم «حفره تراز خود را تغییر داده است» و بدین ترتیب می‌توان رسانش مربوط به نوار ظرفیت را، برحسب حفره، توضیح داد، و به‌جای این که گذار تعداد بسیار زیاد الکترون‌های نوار ظرفیت را درنظر بگیریم، گذار تعداد کم حفره‌ها را بررسی کنیم که درنتیجه توضیح پدیده‌ها بسیار ساده‌تر می‌شود. هنگامی که یک نیمرسانا در میدان الکتریکی قرار می‌گیرد، الکترون‌های نوار رسانش در خلاف جهت میدان و حفره‌های نوار ظرفیت در جهت میدان حرکت می‌کنند.

برای نیمرسانایی که ناخالصی نداشته باشد، تعداد الکترون‌های موجود در نوار رسانش و تعداد حفره‌های موجود در نوار ظرفیت با هم برابرند. چنین نیمرسانایی را ***نیمرسانای ذاتی*** می‌گویند.

پرسش ۴ــ۱

چرا در نیمرسانای ذاتی تعداد الکترون‌های نوار رسانش با تعداد حفره‌های نوار ظرفیت برابر است؟

۴ــ۵ــ آلایش نیمرساناها

در بخش قبل دیدیم که تعداد حاملان بار (الکترون‌های نوار رسانش و حفره‌های نوار ظرفیت) با افزایش دما زیاد می‌شود. اما روش دیگری نیز برای افزایش تعداد حاملان بار وجود دارد و آن اضافه‌کردن ناخالصی به نیمرساناست. منظور از ناخالصی، اتم‌هایی است که از جنس اتم‌های نیمرسانای ذاتی (اتم‌های میزبان) نباشند. افزودن مقدار کمی ناخالصی به نیمرسانا را ***آلایش نیمرسانا*** می‌نامند.

این کار تأثیر چشمگیری بر مقاومت الکتریکی نیمرسانا دارد. مقاومت نیمرسانا با افزایش ناخالصی‌ها کم می‌شود، و رسانش الکتریکی در آن بهتر انجام می‌گیرد.

در موردی که رسانشِ بیش‌تر به دلیل وجود ناخالصی باشد، نیمرسانا را ***غیرذاتی*** می‌گویند.

آلایش نیمرساناها به دو روش مختلف انجام می‌شود. روش اول آن است که اتم ناخالصی، یک الکترون ظرفیت بیش‌تر از اتم‌های نیمرسانای ذاتی داشته باشد و روش دوم آن است که اتم ناخالصی، یک الکترون ظرفیت کمتر از اتم‌های نیمرسانای ذاتی داشته باشد. نیمرسانایی را که به روش اول آلایش یافته باشد، نیمرسانای نوع n و نیمرسانایی را که به روش دوم آلایش یافته باشد نیمرسانای نوع p می‌نامند.

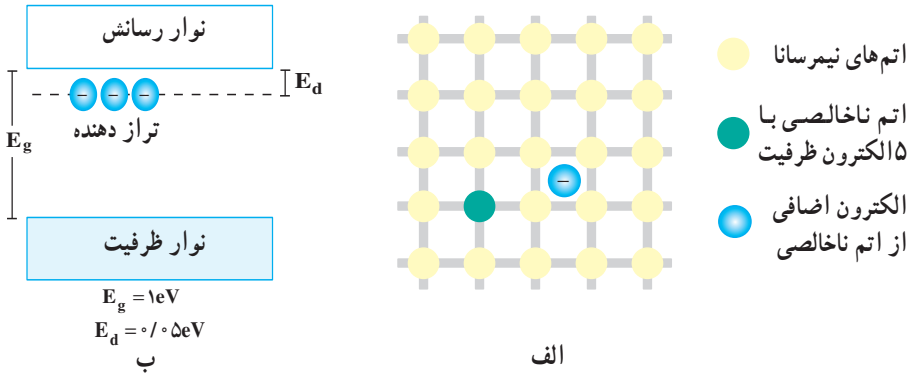
برای مثال سیلیسیوم و ژرمانیوم دو ماده‌ی نیمرسانا هستند که معمولاً در قطعه‌های الکترونیکی به‌کار می‌روند. اتم‌های هر دوی این عنصرها، هریک چهار الکترون ظرفیت دارند. حال اگر در هریک از این نیمرساناها به جای یکی از اتم‌ها یک اتم ناخالصی پنج یا سه‌ظرفیتی وارد کنیم، نیمرسانا را آلاییده‌ایم، و به ترتیب نیمرسانای غیرذاتی نوع n یا p به‌دست آورده‌ایم.

نیمرسانای نوع n: فرض کنیم که به نیمرسانایی از جنس سیلیسیوم یک اتم ناخالصی پنج‌ظرفیتی ــ مانند ارسنیک ــ وارد کنیم. همان‌گونه که در شکل ۴ــ۶ ــ الف نشان داده شده است، چهار تا از الکترون‌های ظرفیت اتم ارسنیک در پیوند کووالان بین این اتم و اتم‌های سیلیسیوم همسایه شرکت می‌کنند. این چهار الکترون به جای الکترون‌های اتم سیلیسیوم ترازهای انرژی را در نوار ظرفیت اشغال می‌کنند.

حضور اتمِ ناخالصی ساختار نواری را تغییر می‌دهد. به این ترتیب که الکترون اضافی (الکترون پنجم) بر روی ترازی قرار می‌گیرد به نام **ترازدهنده** که مطابق شکل ۴ــ۶ــ ب در فاصله‌ی بسیار کمی زیر نوار رسانش قرار دارد. چون فاصله‌ی این تراز از نوار رسانش بسیار کم است، تنها مقدار کمی انرژی برای برانگیخته‌کردن الکترون و بردن آن از این تراز به نوار رسانش کافی است. درنتیجه در نوار رسانش علاوه‌بر الکترون‌های ذاتی، یک الکترون دیگر نیز خواهیم داشت. این نوع اتم‌های ناخالصی را که یک الکترون اضافی به نوار رسانش می‌دهند، **ناخالصی‌دهنده** می‌نامند.

نیمرساناهایی را که با اتم‌های دهنده آلاییده شده باشند، نیمرسانای نوع n می‌نامند زیرا بیش‌تر حاملان بار در آن‌ها از نوع منفی (negative) هستند.

نیمرسانای نوع p : اگر به نیمرسانایی از جنس سیلیسیوم اتم‌های ناخالصی سه‌ظرفیتی ــ مانند ایندیوم یا آلومینیوم ــ وارد کنیم، سه الکترون ظرفیت اتم ناخالصی مطابق شکل ۴ــ۷ــ الف در پیوند بین

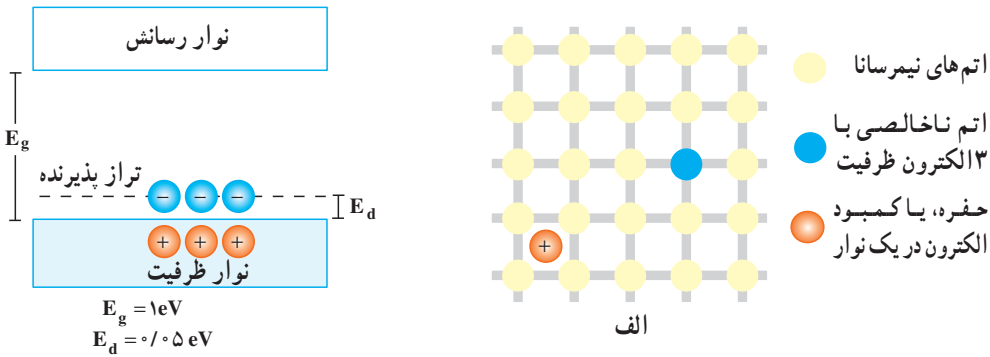


شکل ۴ــ۶

اتم‌های سیلیسیوم شرکت می‌کنند. ولی برای کامل‌شدن پیوند بین اتم‌ها یک الکترون کمبود داریم. الکترون‌های موجود در نوار ظرفیت نیمرسانا با جذب مقدار کمی انرژی جای این الکترون را پر می‌کنند که این عمل باعث می‌شود یک حفره‌ی اضافی در نوار ظرفیت ایجاد شود. در نتیجه، در نوار ظرفیت، علاوه بر تراز خالی مربوط به الکترون‌هایی که به نوار رسانش رفته‌اند، یک تراز خالی یا حفره‌ی اضافی نیز خواهیم داشت. این نوع اتم‌های ناخالصی را ***پذیرنده*** می‌نامند.

ساختار نواری در حضور اتم ناخالصی پذیرنده در شکل ۴ــ۷ــ ب نشان داده شده است. تراز پذیرنده در فاصله‌ی بسیار کمی در بالای نوار ظرفیت قرار دارد. به گونه‌ای که در دمای اتاق، الکترون‌های نوار ظرفیت انرژی کافی برای گذار به تراز پذیرنده را در دسترس دارند. درنتیجه‌ی این گذار، یک حفره‌ی اضافی در نوار ظرفیت ایجاد می‌شود.

نیمرساناهایی را که با اتم‌های پذیرنده آلاییده شده باشند، نیمرسانای نوع p می‌نامند، زیرا بیش‌تر حاملان بار در آن‌ها از نوع مثبت (positive) هستند.



شکل ۴ــ۷

افزودن حتی مقدار بسیار کم ناخالصی به یک نیمرسانا بر مقاومت آن تأثیر عمده می‌گذارد. تراکم‌های ناخالصی نوعاً در حدود یک اتم ناخالصی به‌ازای هر صد میلیون اتم از جنس ماده‌ی نیمرساناست.

۴ــ۶ــ دیود و پیوندگاه p - n

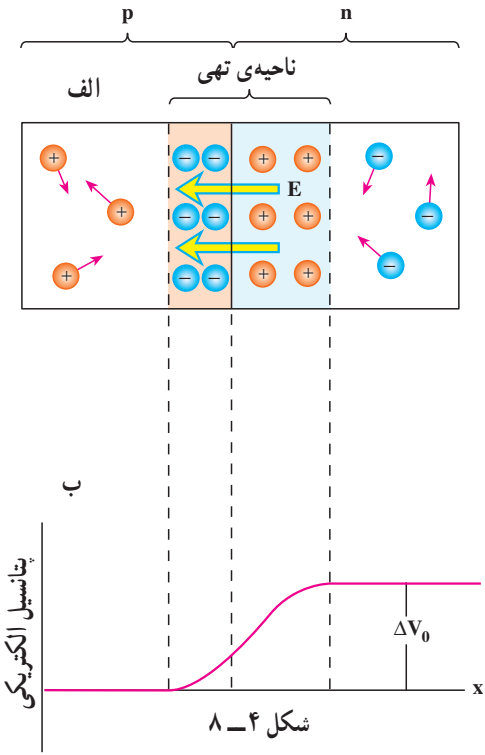
اگر یک نیمرسانای نوع n را به یک نیمرسانای نوع p متصل کنیم، قطعه‌ی حاصل را یک پیوند p ـ n و مرز مشترک آن دو را پیوندگاه p ـ n می‌نامند.

پیوند p ـ n ویژگی جالب توجهی دارد و آن این است که هرگاه در مداری قرار گیرد، جریان الکتریکی را تنها از یک سو عبور می‌دهد. قطعه‌ای را که دارای این خاصیت باشد یک **دیود** می‌نامند. پس دیود قطعه‌ای است که مقاومت آن برای جریان‌هایی که در یک سوی معین می‌گذرند بسیار زیاد، و برای جریان‌هایی که در سوی مخالف می‌گذرند عملاً ناچیز است. به همین دلیل دیود را **یک‌سوکننده** نیز می‌نامند. در مدارهای الکتریکی دیود را با نماد ⟶|⟵ نمایش می‌دهند. پیکان جهت جریان را نشان می‌دهد.

اکنون سازوکار یک‌سوکنندگی پیوند p ـ n را بررسی می‌کنیم. می‌دانیم که یک نیمرسانای نوع n، الکترون آزاد و یک نیمرسانای نوع p حفره‌ی آزاد دارد. هنگامی که مطابق شکل ۴ ــ ۸ ــ الف پیوند p ـ n را تشکیل می‌دهیم، الکترون‌هایی که در طرف n، در نزدیکی پیوندگاه، یعنی در ناحیه‌ای که در شکل با رنگ آبی نشان داده شده است، قرار دارند، به طرف p پخش می‌شوند و یون‌های مثبت را که قادر به حرکت نیستند، بر جای می‌گذارند. به همین ترتیب در طرف p هم حفره‌ها به طرف n می‌روند و ناحیه‌ای از بارهای منفی ثابت را بر جای می‌گذارند. وقتی الکترون‌های آزاد و حفره‌های آزاد که از دو طرف می‌آیند به یکدیگر می‌رسند، یکدیگر را خنثی می‌کنند و از تعداد حاملان بار آزاد در این لایه کم می‌شود. درنتیجه، در ناحیه‌ی پیوندگاه تعداد حامل‌های بار آزاد بسیار کم است. به همین دلیل این ناحیه را **ناحیه‌ی تهی** می‌نامند. ناحیه‌ی تهی عرض معینی دارد، زیرا به دلیل حضور یون‌های ثابت یک میدان الکتریکی داخلی به وجود می‌آید که از رفتن الکترون‌ها از ناحیه‌ی n و حفره‌ها از ناحیه‌ی p جلوگیری می‌کند و نمی‌گذارد که عرض ناحیه‌ی تهی بیش‌تر شود.

جهت این میدان الکتریکی داخلی همان‌گونه که در شکل ۴ ــ ۸ ــ الف نشان داده شده است از ناحیه‌ی n به طرف ناحیه‌ی p است.

دیود چگونه از عبور جریان الکتریکی در یک جهت جلوگیری می‌کند؟



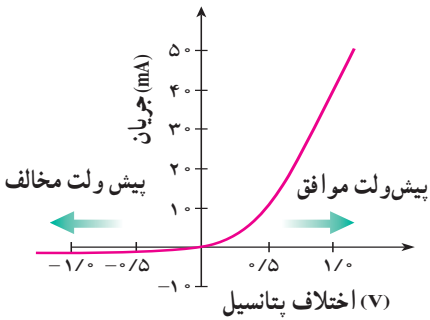
شکل ۴ــ ۸

خصوصیت‌های ناحیه‌های مختلف یک دیود را می‌توانیم با مراجعه به نمودار پتانسیل الکتریکی در شکل ۴ ــ ۸ ــ ب دریابیم. میدان الکتریکی موجود در ناحیه‌ی تهی باعث می‌شود که یک طرف این ناحیه، نسبت به طرف مقابل، پتانسیل الکتریکی بیش‌تری داشته باشد. اگر اختلاف پتانسیل دو سر ناحیه‌ی تهی را با ΔV_0 نمایش دهیم، نیرویی که از میدان الکتریکی داخلی بر هر حفره‌ای که بخواهد از ناحیه‌ی p به ناحیه‌ی n برود وارد می‌شود، در جهتی است که آن را به طرف p می‌راند. درنتیجه برای غلبه بر میدان الکتریکی داخلی، به انرژی اضافی $e\Delta V_0$ نیاز خواهد داشت. نیروی وارد بر الکترونی هم که بخواهد از ناحیه‌ی n به ناحیه‌ی p برود، در جهتی است که آن را به طرف n می‌راند. درنتیجه الکترون‌ها نیز برای عبور از ناحیه‌ی تهی نیاز به انرژی اضافی دارند.

انرژی اضافی لازم برای حرکت الکترون‌ها از سمت راست به چپ ناحیه‌ی تهی و حفره‌ها از سمت چپ به راست ناحیه‌ی تهی را می‌توان به وسیله‌ی یک منبع ولتاژ خارجی تأمین کرد. برای این‌کار باید ولتاژ خارجی به‌گونه‌ای به دو طرف پیوندگاه اعمال شود که پایانه‌ی مثبت به p و پایانه‌ی منفی به n وصل شود. به این ترتیب اختلاف پتانسیل بین دو طرف ناحیه‌ی تهی کاهش می‌یابد و موجب می‌شود که الکترون‌ها بتوانند از n به p و حفره‌ها از p به n حرکت کنند و جریان الکتریکی را به‌وجود آورند. در چنین شرایطی می‌گوییم دیود دارای ***پیش ولت موافق (بایاس مستقیم)*** است.

درصورتی که ولتاژ خارجی در جهت عکس اعمال شود، اختلاف پتانسیل دو سر ناحیه‌ی تهی افزایش می‌یابد و از عبور الکترون‌ها از n به p و عبور حفره‌ها از p به n جلوگیری می‌کند که در نتیجه جریان بسیار کمی از پیوندگاه عبور می‌کند. در این صورت می‌گوییم که دیود دارای ***پیش‌ولت مخالف (بایاس معکوس)*** است.

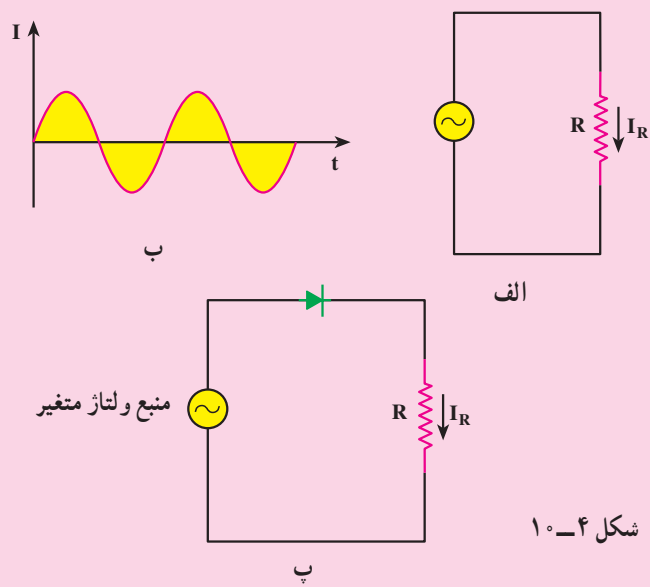
منحنی تغییرات جریان برحسب اختلاف پتانسیل دو سر دیود در شکل ۴ــ۹ رسم شده است. به این نکته توجه داشته باشید که دیود از قانون اهم پیروی نمی‌کند. منحنی تغییرات جریان برحسب ولتاژ برای مقاومت‌هایی که از قانون اهم پیروی می‌کنند، به‌صورت خط راستی است که از مبدأ می‌گذرد و شیب ثابت آن برابر عکس مقاومت است. چنین مقاومت‌هایی را مقاومت‌های اهمی می‌خوانند. در نتیجه می‌توان گفت که دیود، ***غیراهمی*** است. بنابراین دیدیم که دیود جریان را در یک جهت از خود عبور می‌دهد و در جهت دیگر عبور نمی‌دهد.



شکل ۴ــ۹

فعالیت ۴ــ۳

در شکل ۴ــ۱۰، نمودار (ب) منحنی تغییرات شدت جریان برحسب زمان را برای مدار (الف) نشان می‌دهد. شما نیز با بحث و بررسی در گروه خود نمودار تغییرات شدت جریان برحسب زمان را برای مدار (پ) به دست آورید.



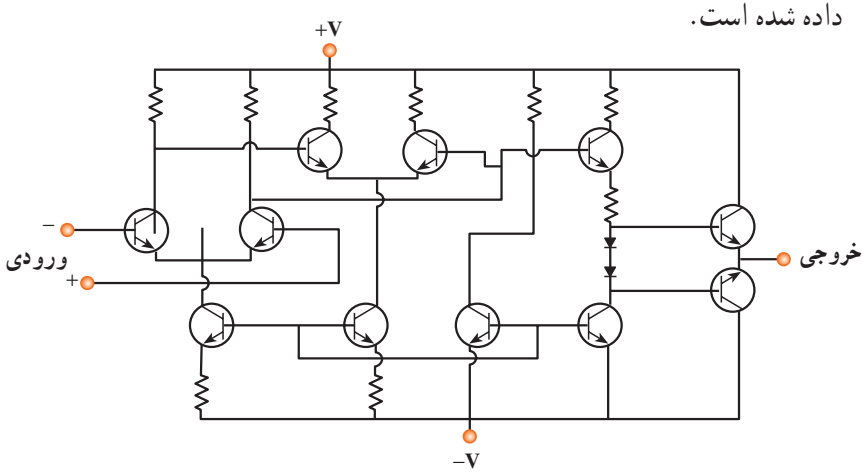
شکل ۴ــ۱۰

ترانزیستور

از وصل کردن سه قطعه نیمرسانای p، n و p، و یا n، p و n قطعه‌ای به‌نام ترانزیستور به‌دست می‌آید. ترانزیستورها برخلاف بیش‌تر قطعات الکتریکی، سه محل اتصال به سیم‌های رابط دارند که هر محل به یکی از سه قطعه نیمرسانای p، n و p (و یا n، p و n) متصل می‌شود. در مدارهای الکتریکی، ترانزیستور pnp را با نماد و ترانزیستور npn را با نماد نمایش می‌دهند. از ترانزیستورها به‌عنوان تقویت‌کننده‌ی جریان یا ولتاژ استفاده می‌شود. شرح ساز و کار ترانزیستور در تقویت جریان یا ولتاژ فراتر از سطح این کتاب است.

مدارهای جمعی IC: مدارهای جمعی را «مهم‌ترین فناوری ساخته‌ی بشر» نامیده‌اند. این مدارها، شالوده‌ی رایانه‌ها، ساعت‌ها، دوربین‌ها، اتومبیل‌ها، هواپیماها، روبات‌ها، سفینه‌های فضایی و انواع و اقسام شبکه‌های ارتباطی و... را تشکیل می‌دهند.

به بیان ساده یک مدار جمعی مجموعه‌ای از ترانزیستورها، دیودها، مقاومت‌ها و خازن‌هاست که بر روی یک تکه‌ی بسیار کوچک سیلیسیوم به‌نام **تراشه** تعبیه شده است. بعضی از تراشه‌ها دارای چندصد هزار جزء بر روی سطحی به مساحت کم‌تر از یک روی سکه هستند. یک نمودار بسیار ساده شده از یک IC در شکل ۴ــ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۴ــ۱۱

۴ــ۷ــ ابر رساناها

پیش از این یادآوری کردیم که افزایش دما سبب افزایش مقاومت ویژه‌ی رساناها می‌شود. این افزایش را این‌طور توجیه می‌کنند که در اجسام جامد اتم‌ها و یون‌ها در دمای بالاتر از صفر مطلق به‌طور دایم درحال ارتعاش هستند، حال هرچه دما بالاتر رود دامنه‌ی این ارتعاش‌ها بیش‌تر می‌شود که درنتیجه‌ی آن الکترون‌های رسانش مشکل‌تر می‌توانند از بین آن‌ها عبور کنند.

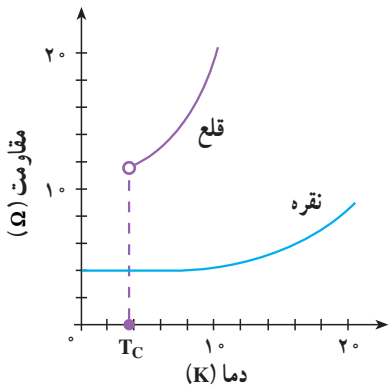
برای درک بهتر این وضعیت مثالی می‌زنیم. دانش‌آموزی را درنظر بگیرید که می‌خواهد در حیاط شلوغ مدرسه حرکت کند. اگر همه‌ی افراد در جای خود بی‌حرکت ایستاده باشند، دانش‌آموز موردنظر بسیار آسان‌تر از وقتی حرکت می‌کند که این افراد درحال حرکت باشند، و البته هرچه حرکت دانش‌آموزان پردامنه‌تر باشد، حرکت وی مشکل‌تر خواهد شد.

اگر ارتعاش‌های اتمی تنها سازوکار مقاومت در مقابل حرکت الکترون‌ها باشد، باید انتظار داشته باشیم که با کاهش دما و رسیدن به صفر مطلق، مقاومت ویژه‌ی رسانا هم به‌تدریج و به‌آرامی به سمت صفر میل کند. در حالی که آزمایش‌ها نشان می‌دهند که در عمل وضعیت به این‌صورت نیست، بلکه دو نوع رفتار بسیار متفاوت در مقاومت ویژه‌ی الکتریکی جامدهای بسیار سرد دیده می‌شود. یا مقاومت ویژه‌ی الکتریکی در دمایی که بالاتر از صفر مطلق است، به‌طور ناگهانی (و نه به‌تدریج) صفر می‌شود، و یا این که اصلاً صفر نمی‌شود. همان‌گونه که در شکل ۴ــ۱۲ می‌بینید اگر نمونه‌ای از جنس نقره را سرد کنیم، مقاومت ویژه‌ی الکتریکی آن به‌تدریج کاهش می‌یابد ولی در دماهای کم‌تر از ۲۰K این کاهش مقاومت متوقف می‌شود و مقاومت ثابت می‌ماند. این نشان می‌دهد که علاوه بر ارتعاش‌های اتمی، سازوکار دیگری نیز در جسم جامد برای ایجاد مقاومت الکتریکی وجود دارد که تنها وقتی اثر مقاومتی ارتعاش‌های اتمی ناچیز شود قابل تشخیص می‌شود. این سازوکار، ناشی از بی‌نظمی‌هایی است که در ترتیب قرار گرفتن اتم‌ها ممکن است وجود داشته باشد.

برای روشن شدن این وضعیت فرض کنید که شما می‌خواهید از میان جمعیت شلوغی عبور کنید. اگر همه‌ی افراد در صف‌هایی مرتب بایستند عبور از میان آن‌ها آسان است، ولی اگر یکی از صف خود خارج شده و در میان دو صف متوالی ایستاده باشد و یا کسی بسته‌ی بزرگی را سر راه قرار داده باشد، حرکت شما مشکل خواهد شد. این‌گونه بی‌نظمی‌ها در ساختار جسم جامد را ***ناکاملی*** می‌نامند. ناکاملی‌ها، حتی وقتی که ارتعاش‌های اتمی هم متوقف شود، باعث مقاومت در مقابل حرکت الکترون‌ها می‌شوند. مقدار مقاومت ویژه‌ی الکتریکی یک رسانای فلزی در صفر مطلق را **مقاومت ویژه‌ی باقیمانده** می‌نامند.

حال اگر این آزمایش را با نمونه‌ای از جنس قلع تکرار کنیم، همان‌گونه که در شکل پیداست مقاومت ویژه‌ی الکتریکی قلع (که در دماهای بالا بیش‌تر از مقاومت ویژه‌ی نقره است) در دمایی حدود ۴ کلوین افت سریع پیدا می‌کند و ناگهان صفر می‌شود. در این وضعیت می‌گوییم قلع **ابر رسانا** شده است. دمایی را که در آن «افت سریع مقاومت ویژه» روی می‌دهد **دمای بحرانی** می‌نامند و آن را با T_C نمایش می‌دهند.

بنابراین قلع در دماهای بالاتر از T_C یک رسانای معمولی و در زیر T_C یک ابر رساناست. از این‌رو T_C را دمای گذار به حالت ابر رسانایی نیز می‌گویند. دمای گذار به ابررسانایی برای رساناهای مختلف یکسان نیست. هر عنصر یا آلیاژ دمای گذار ویژه‌ی خود را دارد. برخی از فلزات که عموماً رساناهای بهتری هستند ــ مانند نقره ــ گذار به ابررسانایی را از خود نشان نمی‌دهند. دمای گذار چند ماده‌ی مختلف در جدول ۴ــ۲ ارائه شده است.



شکل ۴ــ۱۲

جدول ۴ــ۲

ماده	دمای گذار برحسب کلوین
Zn	۰/۸۸
Al	۱/۱۹
Sn	۳/۷۲
Hg	۴/۱۵
Nb	۹/۴۶
Nb_3Ge	۲۳/۲
$YBa_2Cu_3O_7$	۹۰
Tl – Ba – Ca – Cu – O	۱۲۵

مطالعه‌ی آزاد

نظریه‌ی BCS در مورد ابر رسانایی

اولین مورد ابر رسانایی در سال ۱۹۱۱ میلادی در جیوه مشاهده شد. ولی از آن زمان تا سال ۱۹۵۷ میلادی هیچ توجیه قانع‌کننده‌ای برای صفر شدن ناگهانی مقاومت ویژه‌ی الکتریکی عرضه نشد. اما در این سال سه دانشمند، به‌نام‌های **جان باردین، لئون کوپر** و **رابرت شریفر** توانستند نظریه‌ای برای پدیده‌ی ابر رسانایی ارائه کنند. این نظریه با استفاده از سر حرف نام‌های آن سه نفر، نظریه‌ی BCS خوانده شد.

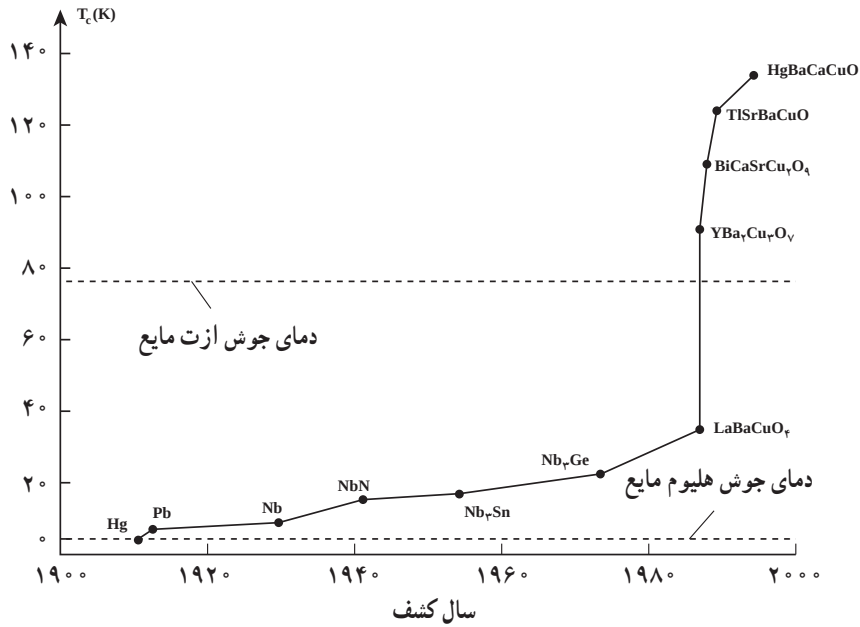
بنابر نظریه‌ی BCS، در پدیده‌ی ابر رسانایی الکترون‌ها به‌صورت زوج در رسانش شرکت می‌کنند که هر یک از این زوج الکترون‌ها را یک زوج کوپر می‌نامند. مقاومت در مقابل حرکت زوج‌های کوپر بسیار ناچیز است. به عبارت دیگر زوج‌های کوپر در اثر برخورد با ارتعاش‌های اتمی یا ناکاملی‌ها تکانه‌ی زیادی از دست نمی‌دهند.

دلیل این‌که چرا حالت ابر رسانایی در دماهای کم دیده می‌شود آن است که انرژی بستگی دو الکترون در زوج کوپر بسیار کم است و در دماهای بالاتر انرژی گرمایی باعث می‌شود که پیوند دو الکترون یک زوج کوپر، از هم گسسته شود.

مطالعه‌ی آزاد

کاربردهای ابر رسانایی

گذار به حالت ابر رسانایی برای بسیاری از مواد در دمای بسیار پایین، نزدیک به صفر مطلق، روی می‌دهد. این موضوع استفاده از ابر رسانا برای کاربردهای معمولی را مشکل می‌سازد، زیرا ایجاد چنین دماهای پایینی معمولاً بسیار پرهزینه است. درواقع برای ابر رساناهای اولیه نیاز به استفاده از هلیم مایع یا هیدروژن مایع بود که هر دو بسیار گران و اولی بسیار نادر است. ولی همان‌گونه که در جدول ۴ــ۲ آمده است، رده‌ی جدیدی از مواد کشف شده‌اند که در دماهای بسیار بالاتری ابر رسانا می‌شوند. دمای گذار بسیاری از این مواد بالاتر از ۷۷K، یعنی نقطه‌ی جوش ازت مایع، است. این نکته‌ی مهمی است، چون عمل سرد کردن برای رسیدن به دمای گذار را می‌شود با استفاده از ازت مایع انجام داد که نه گران است و نه نادر و در ضمن بی‌اثر نیز هست. در حال حاضر جست‌وجو برای یافتن موادی که در دمای اتاق ابر رسانا شوند ادامه دارد. روند افزایش بالاترین دمای گذار شناخته شده در شکل ۴ــ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۴ــ۱۳

مطالعه‌ی آزاد

ابر رسانایی و تحول الکترونیک

این که مقاومت ویژه‌ی الکتریکی ابر رسانا صفر است، در امر انتقال کم اتلاف انرژی الکتریکی مزیت بسیار بزرگی به‌حساب می‌آید. اگر خط‌های انتقال از نوع رساناهای معمولی باشد بخش قابل‌ملاحظه‌ای از انرژی الکتریکی درحال انتقال تلف می‌شود. درحالی که با استفاده از ابر رسانا، این اتلاف از بین می‌رود و صرفه‌جویی عمده‌ای در مصرف انرژی انجام می‌شود.

ابر رساناهای با دمای T_C نسبتاً زیاد، که ابر رساناهای گرم نام دارند، درامر فنّاوری الکترونیکی نیز تأثیر عمده‌ای دارند. برای مثال پیوندگاه دو ابر رسانا نیز همانند پیوندگاه دو نیمرسانا ــ ویژگی‌های خاص خود را دارد. برای مثال در صنعت رایانه از لایه‌های نازک ابر رسانا برای اتصال تراشه‌های رایانه استفاده می‌شود که باعث افزایش سرعت عمل رایانه می‌شود.

علاوه بر این از حلقه‌های ابر رسانا می‌توان به‌عنوان ابزار ذخیره‌سازی جریان یا انرژی الکتریکی استفاده کرد. جریانی که در یک حلقه‌ی ابر رسانا برقرار می‌شود همواره برقرار خواهد بود، زیرا هیچ مقاومتی در مقابل آن وجود ندارد و لذا از این انرژی الکتریکی می‌توان در هر زمان که نیاز باشد استفاده کرد.

ویژگی‌های مغناطیسی ابر رساناها: در کتاب فیزیک ۳ و آزمایشگاه دیدیم که در اطراف سیم رسانای حامل جریان الکتریکی، یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. در این‌صورت اگر آهنربایی در نزدیکی سیم قرار گیرد، به سوی آن ربوده و یا از آن رانده خواهد شد. این پدیده، اساس پدیده‌ی بالابری (معلق‌سازی) مغناطیسی را تشکیل می‌دهد. منظور از **بالابری مغناطیسی** آن است که جسمی به دلیل رانش مغناطیسی ناشی از یک آهنربا در هوا معلق نگه داشته شود. آهنربایی که معمولاً به این منظور به‌کار می‌رود یک آهنربای الکتریکی است. ولی مشکلی که وجود دارد آن است که مقدار زیادی از انرژی، به دلیل مقاومت الکتریکی سیم‌های آهنربای الکتریکی، تلف می‌شود. راه‌حل این مشکل آن است که در آهنربای الکتریکی از سیم‌های ابر رسانا استفاده شود.

تعلیق مغناطیسی، کاربردهای احتمالی زیادی در زمینه‌ی حمل و نقل دارد. هم‌اکنون در کشور ژاپن قطاری به‌صورت نمونه ساخته شده است که بر روی آهنرباهای ابر رسانا حرکت می‌کند.

یکی دیگر از کاربردهای مهم آهنرباهای ابر رسانا در پزشکی است. این آهنرباها در ابزار تشخیصی به‌نام «تصویربرداری تشدید مغناطیسی»[1] یا MRI به‌کار می‌روند. در این روش برای ایجاد تصویر، به‌جای پرتوهای ایکس از تابش با بسامد رادیویی که نسبتاً بی‌خطر است استفاده می‌شود.

تا این‌جا پدیده‌ی رسانش الکتریکی و تفاوت‌هایی را که بین جسم‌های مختلف از این نظر وجود دارد بررسی کردیم. سایر ویژگی‌های فیزیکی اجسام جامد مانند رسانش گرمایی، انبساط، خواص مغناطیسی، ویژگی‌های کشایندی و ... نیز به کمک مفهوم‌های فیزیک جدید و مکانیک کوانتومی توجیه شده است. ولی چون حجم محدود این کتاب گنجایش پرداختن به این موضوع‌ها را ندارد به همین مقدار بسنده می‌کنیم و در ادامه‌ی این فصل یکی دیگر از موضوع‌هایی که در فیزیک جدید مطرح می‌شود، یعنی **ساختار هسته‌ی اتم** و برخی از ویژگی‌های هسته‌ی اتم‌ها را مطرح می‌کنیم.

---

۱ ــ Magnetic Resonance Imaging (MRI)

۴ــ۸ــ ساختار هسته‌ی اتم

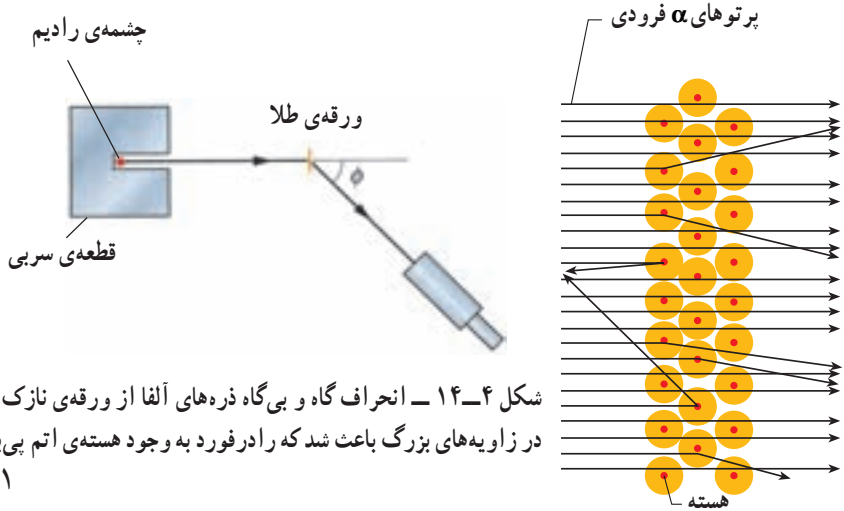
کشف پرتوزایی در سال ۱۸۹۶ میلادی (۱۲۷۵ هـ.ش) آغازی برای پی‌بردن به وجود هسته‌ی اتم بود. این کشف به شناخت کنونی ما از اتم انجامید و اطلاعاتی را در اختیار ما قرار داد که پیامدهای آن تأثیری ژرف بر جامعه‌ی بشری داشت.

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.

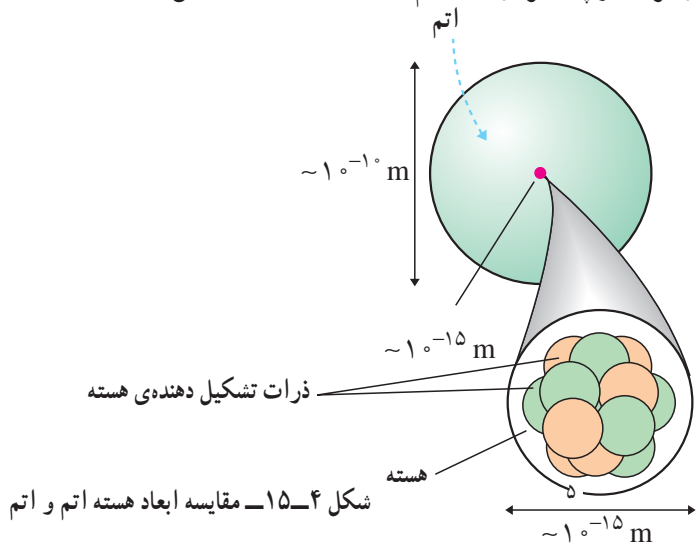
در این آزمایش، باریکه‌ای از ذره‌های دارای بار مثبت (ذره‌های آلفا) گسیل شده از چشمه‌ای پرتوزا بر ورقه‌ای نازک از طلا فرود می‌آمدند (شکل ۴ ــ۱۴). چون ذره‌های آلفا بسیار سنگین‌تر از الکترون‌ها هستند، انتظار می‌رفت که این ذره‌ها بدون برخورد با مانع از ورقه‌ی طلا بگذرند. در عمل نیز اغلب این ذره‌ها بدون انحراف یا با انحراف مختصر از ورقه می‌گذشتند و در برخورد با صفحه‌ی فلوئورسان، در پشت آن، جرقه‌های نورانی تولید می‌کردند. با این همه، برخی از این ذره‌ها در هنگام خروج از ورقه در زاویه‌های بزرگ منحرف می‌شدند و حتی تعدادی از آن‌ها به عقب برمی‌گشتند! رادرفورد می‌گفت :« مثل آن بود که گلوله‌ی توپی 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 ۴ــ۱۴ ــ 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 $10^{-15}\,m$ (۱فمتومتر یا ۱فرمی) و در حدود صد هزار مرتبه کوچک‌تر از ابعاد اتم ($10^{-10}\,m$) است (شکل ۴ــ۱۵).



شکل ۴ــ۱۵ــ مقایسه ابعاد هسته اتم و اتم

فعالیت ۴ــ۴

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.

تعداد پروتون‌های هسته با Z مشخص می‌شود و آن را «عدد اتمی» می‌نامند. چون اتم به لحاظ الکتریکی خنثی است، Z تعداد الکترون‌های اتم نیز هست. تعداد نوترون‌های هسته را با N نشان می‌دهند و آن را «عدد نوترونی» می‌نامند. مجموع عدد اتمی و عدد نوترونی یعنی $Z+N$ را «عدد جرمی» می‌نامند و آن را با A نشان می‌دهند.

$$A = Z + N \qquad (۱ــ۴)$$

در فیزیک هسته‌ای هر هسته را با نماد شیمیایی مربوط به آن و A و Z را به صورت زیر

مشخص می‌کنند.

$$\text{هسته‌ی اتم X} = {}^{A}_{Z}X$$

مشخص کردن N ضروری نیست ؛ زیرا می‌توان آن را از تفاضل A و Z به دست آورد. همین‌طور در بسیاری موارد Z را هم ذکر نمی‌کنند ؛ زیرا نماد شیمیایی معرف آن است ؛ مثلاً :

$$\text{هسته‌ی اتم هیدروژن} = {}^{1}_{1}H \text{ یا } {}^{1}H$$

$$\text{هسته‌ی اتم اکسیژن} = {}^{16}_{8}O \text{ یا } {}^{16}O$$

$$\text{هسته‌ی اتم آهن} = {}^{56}_{26}Fe \text{ یا } {}^{56}Fe$$

ایزوتوپ‌ها : ویژگی‌های هر اتم را تعداد الکترون‌های آن اتم مشخص می‌کند. اما ویژگی‌های هسته را تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های آن تعیین می‌کند ؛ بنابراین، تعداد هسته‌های متفاوت موجود در طبیعت بسیار بیش‌تر از تعداد اتم‌های متفاوت است. اتم‌های با تعداد پروتون معین و تعداد نوترون‌های مختلف را ایزوتوپ (هم‌مکان) می‌نامند ؛ زیرا همگی در جدول مندلیف یک خانه را اشغال می‌کنند. ایزوتوپ‌ها دارای خواص شیمیایی یکسان و خواص هسته‌ای کاملاً متفاوت‌اند. این تفاوت ویژگی‌های هسته‌ای ایزوتوپ‌های مختلف را می‌توان با توجه به دو ایزوتوپ اورانیم ــ ۲۳۵ و اورانیم ــ 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 که ایزوتوپ پایدار ندارند ؛ مانند : رادون. 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 ۴ــ۳

نام ذره	بار (کولن)	جرم (kg)	شعاع (fm[1])
الکترون	$-e = -1/6\times10^{-19}$	$Me = 9/1\times10^{-31}$	غیرقابل اندازه‌گیری با وسایل موجود
پروتون	$+e = +1/6\times10^{-19}$	$Mp = 1/67\times10^{-27}$	۱/۲
نوترون	صفر	$Mn = 1/68\times10^{-27}$	۱/۲

۱ــ فمتومتر

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 $10^{14}\,g/cm^3$ می‌رسیم که به صورتی باورنکردنی بزرگ است (چگالی آب $1\,g/cm^3$). موضوع وقتی شگفت‌انگیزتر می‌شود که توجه کنیم نیروی کولنی شناخته شده بین پروتون‌های دارای بار مثبت رانشی است. پس اصلاً انتظار نداریم که دستگاه متشکل از ذرات دارای بار 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 اوّلاً، بسیار قوی‌تر از این نیروهاست ؛ چون اجزای هسته را به رغم نیروی رانشی بین پروتون‌های آن به صورت بسیار فشرده در کنار هم نگه می‌دارد. دوم 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 ۴ــ۵

با مراجعه به کتاب‌های فیزیک ۲ و ۳ و با استفاده از جدول ۴ــ۳ 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.

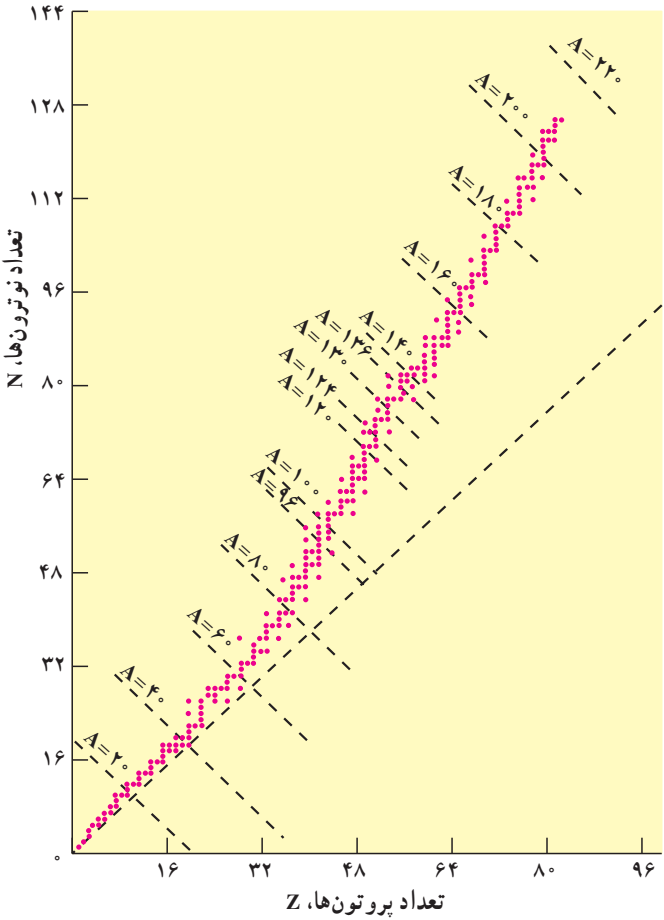
نیروی هسته‌ای گرچه بسیار قوی بوده اما کوتاه بُرد است ؛ بنابراین، هر نوکلئون فقط به نوکلئون‌های مجاور خود نیروی هسته‌ای وارد می‌کند. اما، نیروی کولنی گرچه دارای شدت کم‌تری است اما بلند برد است و هر پروتون به تمام پروتون‌های موجود در هسته نیروی رانشی وارد می‌سازد ؛

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 کُند است که از زمان تشکیل زمین تاکنون هنوز کاملاً از بین نرفته‌اند.

عدد اتمی عنصرهای طبیعی موجود در طبیعت $1 \leq Z \leq 92$ است. عناصر با $Z > 92$ را به طور مصنوعی در آزمایشگاه تولید می‌کنند و به آن‌ها «عناصر فرا اورانیمی» می‌گویند. 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 ۴ــ۱۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خطّ پایداری ایزوتوپ‌ها ابتدا بر خط $N = Z$ منطبق است اما با زیادشدن 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 ربایش هسته‌ای اضافه می‌کند بدون این که رانش کولنی داشته باشد.



شکل ۴ــ۱۶

فعالیت ۴ــ۶

با توجه به شکل ۴ــ۱۶ 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 شتابدهنده‌ها 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 کاملاً صدق می‌کند. 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 :

$$M_x < ZM_p + NM_n \qquad (۴ــ۲)$$

اگر اختلاف جرم دو طرف رابطه‌ی بالا را با ΔM نشان دهیم، خواهیم داشت :

$$\Delta M = ZM_p + NM_n - M_x \qquad (۴ــ۳)$$

این اختلاف جرم طبق رابطه‌ی معروف اینشتین :

$$E = mc^2 \qquad (۴ــ۴)$$

به انرژی تبدیل می‌شود. این انرژی را «انرژی بستگی» می‌نامند و آن را با B نشان می‌دهند. پس داریم :

$$B = \Delta mc^2 = \left[ZM_p + NM_n - M_x\right] c^2 \qquad (۴ــ۵)$$

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 ۴ــ۵ 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 ۱۲/۰۰۰۰۰۰u در نظر می‌گیرند. برحسب این یکا، جرم پروتون ۱/۰۰۷۲۷۶u و جرم نوترون ۱/۰۰۸۶۶۵u است.

مثال ۴ــ۱

الف: یکای جرم اتمی را برحسب کیلوگرم محاسبه کنید.

ب: اگر ۱u 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:

به ازای هر مول $N_A = 6/022137 \times 10^{23}$

پس یک مول کربن یعنی ۰/۰۱۲kg نیز حاوی همین تعداد اتم کربن است؛ پس:

$$1u = \frac{1}{12}(0/012kg)\frac{1}{6/022137 \times 10^{23}} = 1/660502 \times 10^{-27}kg$$

حال انرژی معادل این جرم برابر است با:

$$c = 2/997924580 \times 10^{8} m/s$$

$$E = 1u \times c^2$$

$$= (1/66 \times 10^{-27}kg)(2/997924580 \times 10^{8})^2 = 1/49 \times 10^{-10}J$$

می‌دانیم که

$$1J = 6/241510 \times 10^{18}eV = 6/241510 \times 10^{12}MeV$$

پس، انرژی معادل جرم ۱u برابر است با :

$E = ۹۳۱/۵ MeV$

برای به دست آوردن انرژی آزاد شده در فرایندهای هسته‌ای کافی است اختلاف جرم دو طرف واکنش برحسب u را در ۹۳۱/۵ ضرب کنیم تا انرژی برحسب MeV به دست آید.

در فرایندهای هسته‌ای اصل پایستگی جرم و انرژی به تنهایی برقرار نیستند بلکه در این فرایندها **مجموع جرم و انرژی در برهم کنش پایسته می‌ماند.**

مثال ۴ــ۲

هسته‌ی دوتریم را که از یک پروتون و نوترون تشکیل شده است، «دوترون» می‌نامند. جرم اتمی ^{۲}H برابر ۲/۰۱۴۱۰۲u است. انرژی بستگی آن را محاسبه کنید.

پاسخ: ابتدا جرم هسته‌ی دوتریوم را حساب می‌کنیم.

جرم هسته‌ی دوتریوم = جرم اتم دو تریوم − جرم یک الکترون

$$m(_{۲}H) = M(^{۲}H) - M(e)$$

$$= ۲/۰۱۴۱۰۲u - ۰/۰۰۰۵۴۹u$$

$$= ۲/۰۱۳۵۵۳u$$

به این ترتیب انرژی بستگی هسته‌ی دوتریم برابر است با

$$B = \left[m_n + m_p - m(^{۲}H)\right] c^{۲}$$

$$= [۱/۰۰۸۶۶۵u + ۱/۰۰۷۲۷۶u - ۲/۰۱۳۵۵۳u] \times ۹۳۱/۵ = ۲/۲۲ \ MeV$$

تمرین ۴ــ۱

انرژی بستگی $^{۴}_{۲}He$ را به دست آورید. جرم اتمی $^{۴}_{۲}He$ برابر ۴/۰۰۲۶۰۳u است.

ترازهای انرژی هسته: انرژی نوکلئون‌های وابسته به هسته نیز مانند انرژی الکترون‌های وابسته به اتم کوانتیده‌اند و نوکلئون وابسته به هسته نمی‌تواند هر انرژی دلخواهی را اختیار کند. اما اختلاف انرژی ترازهای نوکلئون در هسته بسیار بیش از این اختلاف در اتم‌هاست. در فصل قبل دیدیم که اختلاف انرژی ترازهای الکترون‌ها در اتم حدود چند الکترون ولت است. در حالی که اختلاف انرژی ترازهای نوکلئون‌ها در هسته‌های سبک حدود میلیون الکترون ولت (MeV) و در هسته‌های سنگین حدود کیلوالکترون ولت (keV) است.

همان‌گونه که الکترون‌های اتم می‌توانند با جذب انرژی از حالت پایه به حالت برانگیخته بروند، نوکلئون‌ها نیز می‌توانند با جذب انرژی به ترازهای انرژی بالاتر بروند و هسته را برانگیخته سازند.

هسته‌های برانگیخته نیز درست مانند اتم‌های برانگیخته می‌توانند با گسیل فوتون به حالت پایه برگردند. انرژی فوتون گسیل شده نیز برابر اختلاف انرژی بین حالت برانگیخته و حالت پایه یا بین دو حالت برانگیخته است. هسته‌ی برانگیخته را با گذاشتن ستاره روی نماد ${}^{A}_{Z}X$ به صورت ${}^{A}_{Z}X^{*}$ مشخص می‌کنند.

فعالیت ۴ــ۷

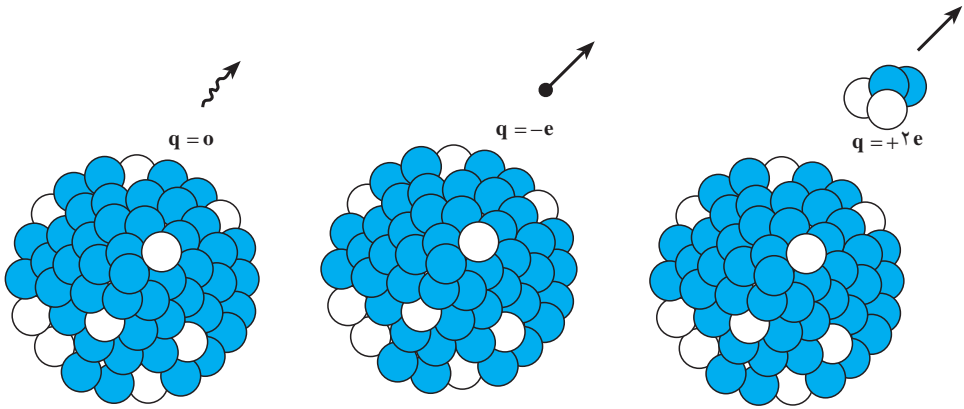
با استفاده از طیف موج‌های الکترومغناطیسی در فصل ۲، نوع تابش گسیل‌شده از هسته را مشخص کنید.

همان‌گونه که دیدیم، انرژی واکنش شیمیایی در حدود چند الکترون ولت و انرژی لازم برای برانگیختگی هسته‌ها معمولاً در محدوده‌ی کیلوالکترون ولت تا میلیون الکترون ولت است؛ از این‌رو، هسته‌ها در واکنش‌های شیمیایی برانگیخته نمی‌شوند.

۴ــ۹ــ پرتوزایی

همان‌طور که قبلاً گفتیم، تحول‌هایی 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 ۴ــ۱۷ نشان داده شده است، هسته‌های پرتوزا با گسیل یکی از پرتوهای زیر واپاشیده می‌شوند.



الف ــ گسیل پرتوی α　　ب ــ گسیل پرتوی β　　پ ــ گسیل پرتوی γ

شکل ۴ ــ ۱۷

۱ــ واپاشی آلفازا: در این نوع واپاشی که در هسته‌های سنگین صورت می‌گیرد، هسته‌ی ${}^{A}_{Z}X$ با گسیل ذره‌ی α ($ {}^{4}_{2}He $) متشکل از دو پروتون و دو نوترون وا می‌پاشد (شکل ۴ــ۱۷ ــ الف).

$$ {}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He \qquad (۶ــ۴) $$

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.

۲ــ واپاشی بتازا: 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 ۴ــ۱۷ــ ب).

این نوع واپاشی بسیار شگفت‌انگیز است ؛ زیرا الکترون قبلاً در هسته وجود ندارد و در حین

واپاشی به وجود می‌آید. در فرایند واپاشی همراه با گسیل الکترون یک نوترون در هسته تبدیل به پروتون و الکترون می‌شود. فرایند را می‌توان به صورت زیر نوشت :

$$ {}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e^{-} \qquad (۴ــ۷) $$

در فرایند گسیل پوزیترون یک پروتون به نوترون و پوزیترون تبدیل می‌شود که می‌توان آن را به صورت زیر نوشت :

$$ {}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A}_{Z-1}Z + {}^{0}_{+1}e^{+} \qquad (۴ــ۸) $$

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.

۳ــ واپاشی گاما‌زا: در این نوع واپاشی، هیچ یک از عددهای جرمی و اتمی هسته تغییر نمی‌کند بلکه هسته‌ای که در حالت برانگیخته است، با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسد (شکل ۴ــ۱۷ پ). این فرایند را می‌توان به صورت زیر نشان داد :

$$ {}^{A}_{Z}X^{*} \longrightarrow {}^{A}_{Z}X + {}^{0}_{0}\gamma \qquad (۴ــ۹) $$

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 پر انرژی‌تر است و می‌تواند در ماده بیش‌تر نفوذ کند.

در تمام فرایندهای واپاشی اصول پایستگی زیر برقرار است :

۱ــ مجموع بارالکتریکی در دو طرف رابطه‌های (۴ــ۷ تا ۱۰) یک‌سان است.

۲ــ مجموع عددهای جرمی در دو طرف رابطه‌های بالا یک‌سان است.

مثال ۴ــ۳

در واپاشی هسته‌ی اورانیم ــ ۲۳۸ $\left[{}^{238}_{92}U\right]$ یک ذره‌ی آلفا گسیل می‌شود. معادله‌ی این واپاشی را بنویسید و تعیین کنید که براثر این واپاشی چه عنصری تولید می‌شود.

پاسخ

معادله‌ی واپاشی به صورت زیر است :

$$ {}^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{A}_{Z}X + {}^{4}_{2}He $$

با استفاده از پایستگی عدد جرمی داریم :

$$ 238 = A + 4 $$

$A = ۲۳۴$

و با بهره‌گیری از عدد اتمی دو طرف داریم :

$۹۲ = ۲ + Z$

$Z = ۹۰$

با مراجعه به جدول تناوبی معلوم می‌شود که عنصر با $Z = ۹۰$ توریم است ؛ پس داریم :

$$^{۲۳۸}_{۹۲}U \longrightarrow {}^{۲۳۴}_{۹۰}Th + {}^{۴}_{۲}He$$

تمرین ۴ــ۲

فسفر ــ ۳۲ $\left[{}^{۳۲}_{۱۵}P\right]$ با گسیل الکترون وامی‌پاشد. معادله‌ی این واپاشی را بنویسید و تعیین کنید که در آن چه عنصری تولید می‌شود.

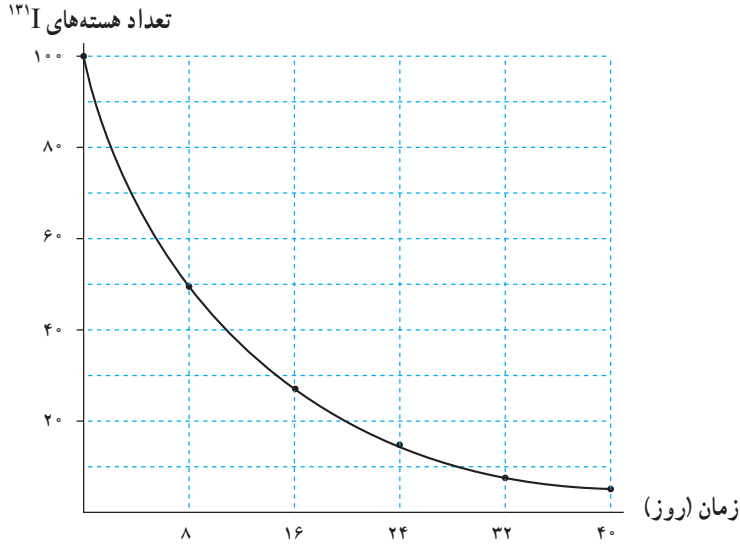
تمرین ۴ــ۳

آلومینیم ــ ۲۵ $\left[{}^{۲۵}_{۱۳}A\right]$ با گسیل پوزیترون وامی‌پاشد. معادله‌ی واپاشی را بنویسید و عنصر محصول آن را مشخص کنید.

واپاشی پرتوزا و نیمه عمر

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 ۴ــ۱۸ 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 عمرهای در حدود چند روز تا چند سال هستند که بسیار کوتاه‌تر از سن زمین ($۴/۵ \times ۱۰^{۹}$ سال) است. بنابراین بیش‌تر این ایزوتوپ‌ها به عنصر پایدار واپاشیده‌اند. اما، برخی از آن‌ها دارای نیمه عمرهای در حدود سن زمین هستند. این عناصر هنوز در اطراف ما وجود دارند و زمینه‌ی **پرتوزایی طبیعی** را تشکیل می‌دهند که ما را احاطه کرده است.



شکل ۴ــ۱۸ــ نمودار واپاشی ایزوتوپ ^{131}I

مثال ۴ــ۴

در حادثه‌ی چرنوبیل یکی از ایزوتوپ‌هایی که مشکل آلودگی مواد غذایی را به وجود آورد ^{131}I بود. این ایزوتوپ، فرّار است و همراه با جریان‌های جوّی تا نقطه‌های دوردست حرکت کرد و با نشستن بر روی برگ گیاهان سبب آلودگی گوشت و شیر دام‌هایی شد که این گیاهان را می‌خوردند. نیمه عمر این ایزوتوپ ۸/۰ روز است ؛ پس از گذشت ۴۰ روز از حادثه، چه کسری از هسته‌های ^{131}I باقی مانده بود؟

پاسخ

۴۰ روز برابر ۵ نیمه عمر ^{131}I است. اگر N_0 تعداد هسته‌های اولیه باشد، می‌توان جدول زیر را تنظیم کرد.

تعداد نیمه‌عمرهای سپری شده	۰	۱	۲	۳	۴	۵
هسته‌های باقیمانده	N_0	$\frac{N_0}{2}$	$\frac{1}{2}\frac{N_0}{2}=\frac{N_0}{4}$	$\frac{1}{2}\frac{N_0}{4}=\frac{N_0}{8}$	$\frac{1}{2}\frac{N_0}{8}=\frac{N_0}{16}$	$\frac{1}{2}\frac{N_0}{16}=\frac{N_0}{32}$

بنابراین، پس از گذشت ۴۰ روز تعداد هسته‌های پرتوزای موجود و در نتیجه،

فعالیت آن‌ها به $\frac{۱}{۳۲}$ مقدار اولیه می‌رسد. نیمه عمر کوتاه $I^{۱۳۱}$ 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 $\frac{N_۰}{۲^n}$ به دست آوریم، که در آن n از رابطه‌ی $n = \frac{t}{T_{\frac{۱}{۲}}}$ به دست می‌آید. t زمان موردنظر برای واپاشی و $T_{\frac{۱}{۲}}$ نیز زمان نیمه عمر ایزوتوپ است.

مطالعه‌ی آزاد

نکته‌های ایمنی

حفاظت در برابر پرتوها: یکی از ویژگی‌های مهّم ذرات و پرتوهایی که از موادّ پرتوزا گسیل می‌شود این است که حواس معمولی ما به آن‌ها حساس نیستند ؛ مثلاً، وقتی دستمان را به آتش نزدیک می‌کنیم سوزش ناشی از آن باعث می‌شود که آن را عقب بکشیم ولی این موضوع در مورد پرتوهای کیهانی و آن‌چه از مواد پرتوزا خارج می‌شود، صادق نیست ؛ بنابراین باید به کمک دستگاه‌هایی آن‌ها را آشکار ساخت و به وجود آن‌ها پی‌برد.

ذره‌های دارای بار الکتریکی مانند ذره‌های آلفا و بتا هنگام عبور از ماده به 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 تغییرهایی شیمیایی را در بدن به‌وجود می‌آورد که باعث آسیب‌رساندن به بافت‌های زنده می‌شود. البته هر چه این ذره‌ها انرژی خود را در مسافت کوتاه‌تری از بافت از دست بدهند، آسیب وارده شدیدتر و ترمیم آن دشوارتر خواهد بود ؛ بدین سبب، آسیب ذره‌های آلفا بسیار شدیدتر از ذره‌های بتا خواهد بود.

پرتوهای بدون باری چون پرتوهای X و γ نیز بر اثر برهم کنش با ماده، ذره‌های باردار ثانویه به وجود می‌آورند و این ذره‌های ثانویه به بافت‌های زنده آسیب می‌رسانند. از این ویژگی پرتوها برای از بین بردن غده‌های سرطانی بهره می‌گیرند ؛ بدین ترتیب که با تمرکز این پرتوها بر روی غده‌ها آن‌ها را نابود می‌سازند. این کار را «پرتودرمانی» می‌نامند. نوترون‌ها نیز گرچه بدون بارند ولی در هنگام ورود به بدن بر اثر برخورد با هیدروژن‌های آب ــ که بخش اعظم بدن را تشکیل می‌دهد ــ انرژی خود را به آن منتقل می‌کنند و

باعث به حرکت درآمدن یک پروتون پرانرژی در بدن می‌شوند که اثر زیان‌بار آن بسیار شدید است ؛ بنابراین، نوترون‌ها مخصوصاً وقتی سریع باشند، بسیار خطرناک‌اند.

آسیب وارد از تابش بر بدن ممکن است، یا بافت زنده را کاملاً از بین ببرد یا بدون از بین بردن آن باعث جهش در ژن‌های آن شود. **یاخته‌هایی که از این یاخته‌های جهش یافته به وجود می‌آیند**، با آن تفاوت خواهند داشت. این جهش‌ها می‌تواند به تولید بافت‌های سرطانی یا نوزادان ناقص‌الخلقه بینجامد. البته در مواردی نیز از این جهش‌ها برای تولید گیاهانی استفاده می‌شود که از گیاهان معمولی مقاوم‌ترند یا ویژگی بهتری دارند.

به این ترتیب، در برخورد با مواد پرتوزا بایستی همواره احتیاط کرد تا پرتوگیری از این مواد به کم‌ترین مقدار ممکن برسد. چشمه‌های پرتوزا باید حفاظ داشته باشند و در هنگام کار باید آن‌ها را به کمک وسیله‌هایی در فاصله‌ی دور از بدن نگه داشت.

فعالیت ۴ــ۸: 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؟

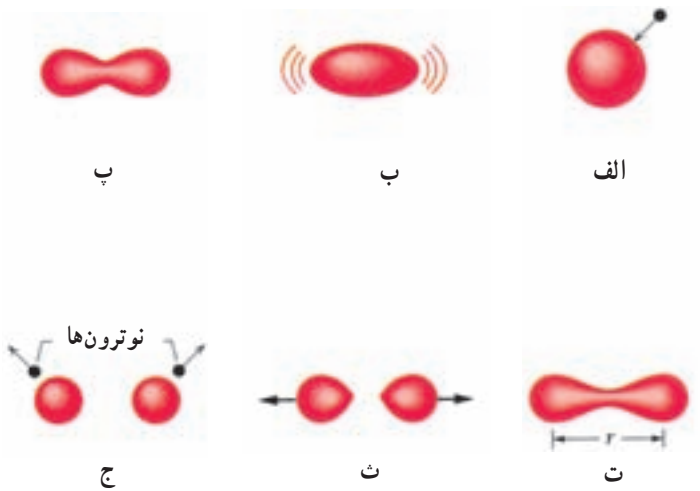
۴ــ۱۰ــ انرژی هسته‌ای

در اواخر سال ۱۹۳۸ میلادی، دو دانشمند آلمانی، اوتوهان[۱] و فریتس اشتراسمن[۲]، به طور تصادفی کشفی کردند که جهان را تغییر داد. آن‌ها در حین بمباران نمونه‌ای از اورانیم با نوترون به امید به وجود آوردن عناصر جدید، در نهایت تعجب متوجه تولید باریم شدند که جرمش در حدود نصف اورانیم بود. این دو تمایلی به باور نتیجه‌ی آزمایش خود نداشتند. اوتوهان خبر این کشف را برای همکار سابق خود لیزمایتنر[۳] که پناهنده‌ای از آلمان نازی بود و در سوئد کار می‌کرد فرستاد. او در طول تعطیلات کریسمس در این باره با خواهرزاده‌اش، اوتوفریش[۴]، که او هم به دانمارک پناهنده شده بود، بحث کرد. این دو به اتفاق هم توصیفی برای این پدیده یافتند که بدین صورت بود 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

۱ــ Otto Hahn ۲ــ Fritz Strassman ۳ــ Lise Meitner ۴ــ Otto Frisch

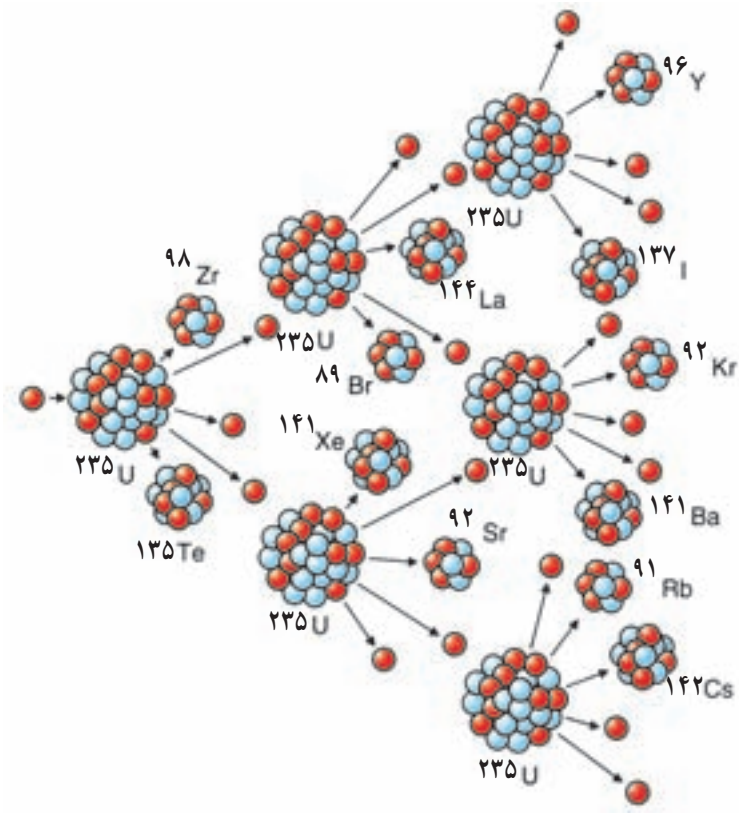
هسته‌ی اورانیم غلبه‌ی نیروی هسته‌ای بر نیروی کولنی بسیار شکننده است و با اندک اختلالی چون جذب یک نوترون که سبب تغییر شکل هسته می‌شود، از بین می‌رود. اگر هسته‌ی اورانیم اندکی کشیده شود (شکل ۴ــ۱۹)، نیروهای الکتریکی می‌توانند آن را کشیده‌تر کنند. اگر این کشیدگی از مرحله‌ی بحرانی بگذرد، نیروهای هسته‌ای 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. در فرایند شکافت، ترکیب‌های مختلفی از هسته‌های کوچک‌تر به وجود می‌آیند که یک نمونه‌ی آن را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت :



شکل ۴ــ۱۹ــ 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.

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \longrightarrow {}^{91}_{36}Kr + {}^{142}_{56}Ba + 3({}^{1}_{0}n) \qquad (۴ــ۱۰) $$

توجه کنید که در این واکنش، یک نوترون، شکافت اورانیم را آغاز می‌کند و براثر شکافت، سه نوترون به وجود می‌آید. چون نوترون‌ها بارالکتریکی ندارند، هسته آن‌ها را دفع نمی‌کند و به راحتی و بدون برخورد با مانع در آن نفوذ می‌کند و در نتیجه، باعث شکافت در سه 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 ــ۲۰). در هر واکنش شکافت ۲۰۰/۰۰۰/۰۰۰ الکترون ولت (۲۰۰MeV) انرژی آزاد می‌شود (برای مقایسه، در هر انفجار



شکل ۴ــ۲۰ــ واکنش زنجیره‌ای

مولکول TNT فقط ۳۰ الکترون ولت انرژی آزاد می‌شود). مجموع جرم پاره‌های شکافت و نوترون‌های تولید شده در واکنش از جرم اورانیم اولیه اندکی کم‌تر است. این اختلاف جرم مختصر طبق 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 درمی‌آید. شاید این پرسش مطرح شود که چرا واکنش زنجیره‌ای هم‌اکنون به طور طبیعی در معدن‌های اورانیم رخ نمی‌دهد؟ پاسخ آن است که شکافت معمولاً فقط در ایزوتوپ کمیاب U^{235} که فقط ۰/۷۲ درصد اورانیم طبیعی را تشکیل می‌دهد، رخ می‌دهد. ایزوتوپ فراوان‌تر U^{238} نوترون‌ها را جذب می‌کند ولی معمولاً شکافته نمی‌شود و در نتیجه، واکنش زنجیره‌ای را ناممکن می‌سازد.

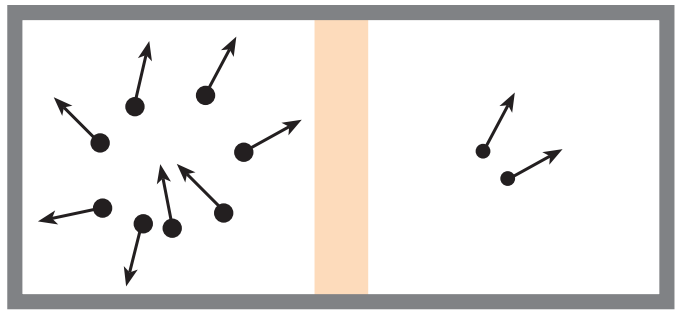
اگر واکنش زنجیره‌ای در قطعه‌ای از اورانیم به اندازه‌ی کافی بزرگ رخ دهد، به احتمال زیاد

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 (۹۹/۳ درصد) از ^{۲۳۸}U تشکیل شده است. برای انفجارهای هسته‌ای به ^{۲۳۵}U خالص نیاز داریم و برای استفاده در نیروگاه‌های هسته‌ای نیز باید فراوانی ^{۲۳۵}U را به صورت مصنوعی زیاد کرد که این کار را «غنی‌سازی» می‌نامند. جداساختن ایزوتوپ کمیاب ^{۲۳۵}U از ایزوتوپ فراوان ^{۲۳۸}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 فلوئور به صورت گاز هگزافلورید اورانیم ($UF_۶$) در می‌آید. چون ایزوتوپ سبک‌تر ^{۲۳۵}U در دمای مساوی، سرعت متوسط آن کمی بیش‌تر از ایزوتوپ ^{۲۳۸}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 ۴ــ۲۱ ــ مولکول‌های سبک‌تر در دمای یکسان سریع‌تر از مولکول‌های سنگین‌تر حرکت می‌کنند و در نتیجه، با سرعت بیش‌تری از غشای نازک می‌گذرند.

امروزه جداسازی اورانیم با استفاده از روش سانتریفوژ گازی راحت‌تر صورت می‌گیرد. گاز هگزافلورید اورانیم در یک استوانه با سرعت‌های فوق‌العاده زیاد از مرتبه‌ی ۱۵۰۰ کیلومتر در ساعت چرخانده می‌شود. مولکول‌های گاز حاوی $U^{۲۳۸}$ سنگین، مانند شیر در جداکننده‌های لبنیات، به خارج رانده می‌شوند و مولکول‌های گاز حاوی $U^{۲۳۵}$ 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 $U^{۲۳۸}$ است، و نوترون‌های آزاد شده در شکافت $U^{۲۳۵}$ که نوترون‌های سریع هستند را اتم‌های $U^{۲۳۸}$ جذب می‌کنند بدون این که باعث شکافت شوند. این واقعیت تجربی مهم که نوترون‌های کُند را $U^{۲۳۵}$ با احتمال بیش‌تر از $U^{۲۳۸}$ جذب می‌کند اهمیت بسیار دارد. اگر نوترون‌ها را بتوان کُند ساخت، احتمال جذب نوترون ناشی از شکافت در یک اتم $U^{۲۳۵}$ دیگر، حتی در حضور $U^{۲۳۸}$، افزایش می‌یابد. این افزایش احتمال می‌تواند برای به‌وجود آوردن واکنش زنجیره‌ای کافی باشد.

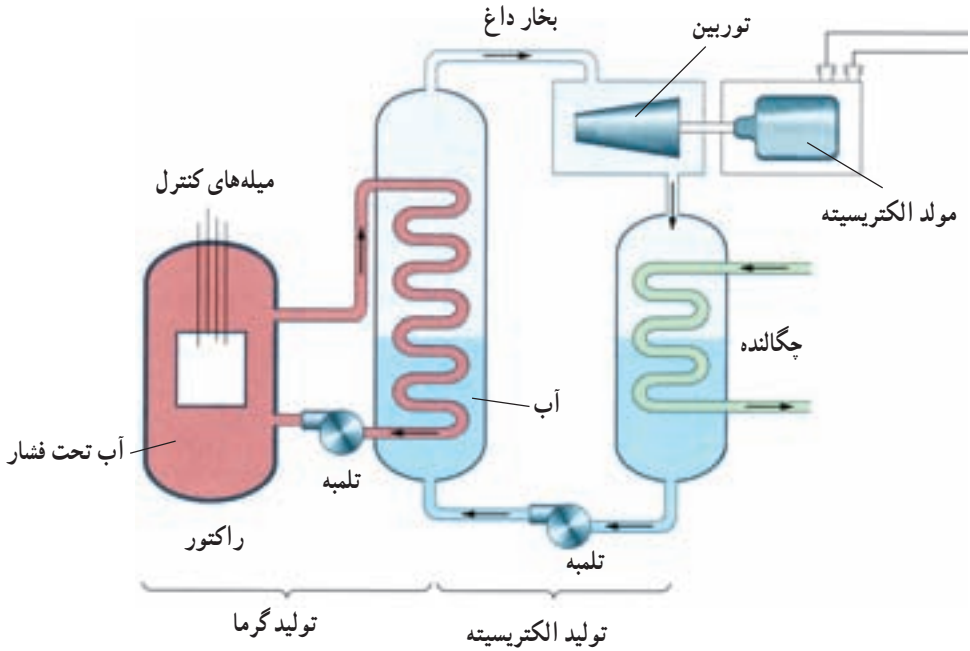
در کمتر از یک سال پس از کشف شکافت هسته‌ای، دانشمندان متوجه شدند که اگر اورانیم به قطعه‌های کوچک‌تر تقسیم شود و در بین این قطعه‌ها ماده‌ای قرار گیرد که نوترون‌های حاصل از شکافت* را کند و احتمال جذب آن‌ها در اورانیم را زیاد سازد، می‌توان با استفاده از اورانیم طبیعی واکنش زنجیره‌ای به‌وجود آورد.

این روش را اولین بار انریکوفرمی در ۲ دسامبر ۱۹۴۲ میلادی (۱۳۲۱ هـ.ش) در دانشگاه شیکاگو انجام داد. در اولین واکنش زنجیره‌ای کنترل شده، از گرافیت برای کُند کردن نوترون‌ها استفاده شده بود. دلیل استفاده از گرافیت این بود که نوترون در برخورد با آن، بخش قابل ملاحظه‌ای از انرژی خود را از دست می‌داد. اگر نوترون از هسته‌ای سنگین پس زده شود، سرعت و انرژی آن تغییر چندانی نخواهد کرد اما در برگشت از 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 اوّل $U^{۲۳۸}$ به علاوه ۳ درصد $U^{۲۳۵}$ است. چون $U^{۲۳۵}$ با $U^{۲۳۸}$ بسیار رقیق شده است، امکان انفجار هسته‌ای مانند بمب در آن وجود ندارد. با واردکردن میله‌های کنترل به داخل راکتور، آهنگ واکنش یعنی تعداد

---

* ــ انرژی جنبشی متوسط این نوترون‌ها ۲MeV است.



شکل ۴ــ۲۲ــ نمودار یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

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 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 اوّلین عنصر فرا اورانیمی به نام ***نپتونیم*** (Np ؛ نام اوّلین 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.

$$^{238}_{92}U + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{239}_{92}U^{*} \longrightarrow e^{-} + {}^{239}_{93}Np \longrightarrow e^{-} + {}^{239}_{94}Pu$$

^{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 برنبسته است. فاجعه‌ی انفجار چرنوبیل در سال ۱۹۸۶ میلادی (۱۳۶۵هـ.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 ۴ــ۲۳ــ نمونه‌ای از یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

نقطه‌ی ضعف اصلی استفاده از شکافت هسته‌ای تولید پسماندهای پرتوزاست. همان طور که قبلاً گفتیم، برای پایدار ماندن هسته باید با زیاد شدن عدد اتمی، نسبت نوترون به پروتون افزایش یابد.

این نسبت برای هسته‌های سبک برابر ۱، در هسته‌های متوسط ۱/۲ و در هسته‌ی سنگینی چون سرب ۱/۵ 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 بـه سرعت از بین می‌روند. بـا این همه، تعدادی از آن‌ها دارای نیمه عمرهای هزاران ساله‌اند. دور ریختن همراه با ایمنی این پسماندها و موادی که در جریان تولید سوخت‌های هسته‌ای به وجود می‌آیند به روش‌ها و استفاده از محفظه‌های خاص نیاز دارد. گرچه بیش از نیم قرن از به کارگیری انرژی هسته‌ای می‌گذرد، اما فناوری دورریزی پسماندهای هسته‌ای هنوز در مرحله‌های اولیه است.

مزیت‌های توان هسته‌ای عبارتند از (۱) توانایی تولید الکتریسیته فراوان با استفاده از این انرژی ؛ (۲) حفظ بیلیون‌ها تن زغال سنگ، نفت و گاز طبیعی که عملاً هر سال به گرما و دود تبدیل می‌شود و در دراز مدت می‌توان از آن‌ها به عنوان منابع غنی از مولکول‌های آلی گرانبها استفاده کرد ؛ و (۳) حذف میلیون‌ها تن دی‌اکسید گوگرد و سایر مواد سمی، و همین طور گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید ـ 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.

$$^{1}_{1}H + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{2}_{1}H + e^{+} + \upsilon$$

$$^{2}_{1}H + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + \gamma$$

$$^{3}_{2}He + ^{3}_{2}He \rightarrow ^{4}_{2}He + 2^{1}_{1}H$$

کل فرایند را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$4^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + 2e^{+} + \text{مقداری انرژی}$$

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 پادذره‌ی 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 (به‌هم جوش بخورند) باید بر نیروی رانشی الکتریکی غلبه کنند. برای این کار در ابتدای فرایند باید مقدار زیادی انرژی صرف کرد.

برای مثال برای این که دو پروتون را به اندازه‌ی کافی به هم نزدیک کنیم باید آن‌ها را با انرژی حدود ۰/۱MeV به طرف هم برانیم. این کار را می‌توان به کمک دستگاه‌هایی به نام شتاب دهنده انجام داد. اما انرژی لازم برای راه‌اندازی چنین دستگاهی خیلی بیش‌تر از انرژی حاصل از واکنش همجوشی است.

راه دیگری که برای تأمین این انرژی وجود دارد گرما دادن به هسته‌ها تا دمای $10^{7}\,^{\circ}C$ است. در چنین دمایی انرژی جنبشی هسته‌ها برای غلبه بر رانش الکتریکی بین آن‌ها کافی خواهد بود.

چنین دمای بالایی در ستارگان و خورشید وجود دارد. مثلاً دمای درونی خورشید در حدود $2\times10^{7}\,^{\circ}C$ 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

۱ــ در نظریه‌ی نواریِ الکترون در جسم جامد، گذار درون نواری در چه صورتی روی می‌دهد؟

۲ــ آیا الکترون‌های نوارهای پر، سهمی در رسانش الکتریکی دارند؟ توضیح دهید.

۳ــ انرژی موردنیاز الکترون، برای انجام گذار بین ترازهای مختلف انرژی در یک جسم جامد، از چه منابعی می‌تواند تأمین شود؟

۴ــ با استفاده از نظریه‌ی نواری جسم جامد، خاصیت رسانایی، نارسانایی و نیمرسانایی مواد مختلف را توضیح دهید.

۵ ــ چگونه می‌توان سهم نوار ظرفیت در رسانش را برحسب حفره توضیح داد؟

۶ ــ دو روش برای افزایش تعداد حاملان بار در نیمرساناها را نام ببرید.

۷ــ تفاوت نیمرسانای نوع n و نیمرسانای نوع P را شرح دهید.

۸ ــ معمولاً دیود را یکسوکننده نیز می‌نامند. چرا؟

۹ــ آیا دیود یک مقاومت اهمی است؟ توضیح دهید.

۱۰ــ علاوه بر ارتعاش‌های اتمی، سازوکار دیگری نیز در جسم جامد برای ایجاد مقاومت وجود دارد. توضیح دهید این ساز و کار چه موقعی قابل تشخیص است و ناشی از چه عواملی است؟

۱۱ــ استرانسیوم ۹۰ ($^{90}_{38}Sr$) در اثر انفجارهای هسته‌ای تولید می‌شود و نیم‌عمر آن ۲۸ سال است. این ایزوتوپ را گیاهان جذب می‌کنند و از طریق غذا وارد بدن انسان می‌شود. تعداد پروتون‌ها، نوترون‌ها و الکترون‌های موجود در هر اتم با هسته‌ی $^{90}_{38}Sr$ چقدر است؟

۱۲ــ آیا ایزوتوپ $^{61}_{25}X$ را می‌توان با روش شیمیایی از ایزوتوپ $^{59}_{25}Y$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ $^{61}_{26}Z$ چطور؟

۱۳ــ هنگامی که از ایزوتوپی یک ذره‌ی آلفا گسیل می‌شود، چه تغییری در هسته رخ می‌دهد؟ هنگام گسیل یک ذره‌ی بتا چطور؟ هنگام گسیل پرتوی گاما چطور؟

۱۴ــ گاهی گفته می‌شود که «جرم را نمی‌توان تولید و نابود کرد» این گفته را تحلیل کنید.

۱۵ــ گاهی گفته می‌شود که تمام منابع انرژی موجود ناشی از انرژی هسته‌ای‌اند. آیا سوخت‌هایی مانند زغال‌سنگ و نفت هم از انرژی هسته‌ای به‌دست آمده‌اند؟ توضیح دهید.

۱۶ــ هریک از اتم‌های زیر چند الکترون، چند پروتون و چند نوترون دارند؟

الف : بریلیوم ۹ ب : کلسیم ۴۰ پ : نقره ۱۰۷

ت : طلا ۱۹۷ ث : سرب ۲۰۸ ج : اورانیوم ۲۳۸

۱۷ــ واکنش‌های زیر را کامل کنید و برای تعیین نماد ایزوتوپ‌ها از جدول تناوبی استفاده کنید.

$$^{231}_{91}Pa \longrightarrow \alpha +$$

$$^{27}_{}Si \longrightarrow {}^{27}_{}P +$$

$$^{240}_{92}U \longrightarrow \beta +$$

$$^{74}_{}As \longrightarrow {}^{74}_{}Se +$$

$$^{131}I \longrightarrow {}^{131}Xe +$$

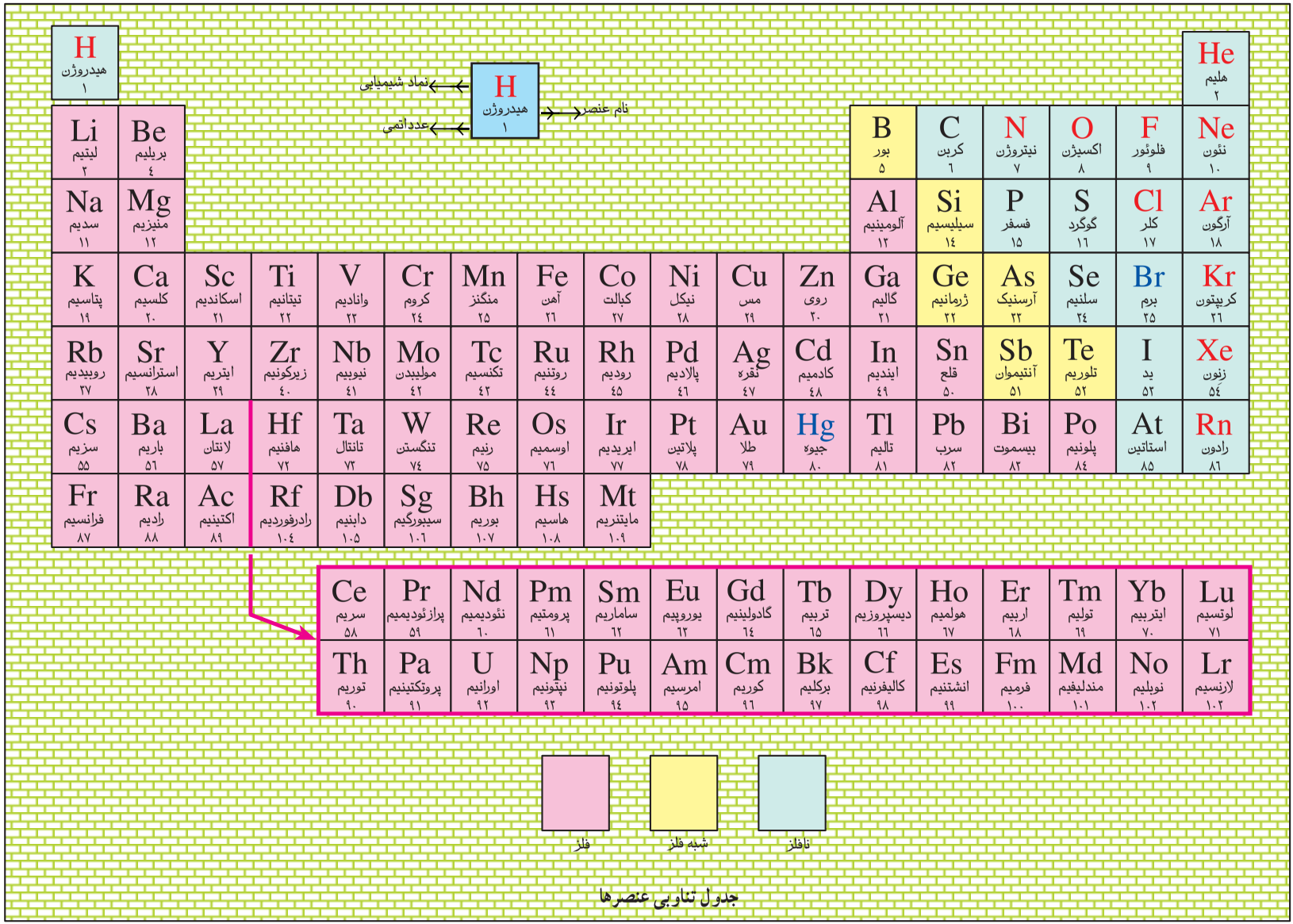
$$^{99}_{43}T \longrightarrow \gamma +$$

۱۸ــ نیم‌عمر بیسموت ۲۱۲ در حدود ۶۰ دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری از ماده‌ی اولیه باقی‌مانده است؟

۱۹ــ آلومینیوم تنها یک ایزوتوپ پایدار $^{27}_{13}Al$ به جرم اتمی ۲۶/۹۸۱۵۴۱u دارد. جرم اتمی دو ایزوتوپ ناپایدار $^{26}_{13}Al$ و $^{28}_{12}Al$ به ترتیب برابر ۲۵/۹۸۶۹۸۲u و ۲۷/۹۸۱۹۰۵u است. انرژی بستگی هر یک از سه ایزوتوپ را برحسب MeV حساب کنید.

۲۰ــ انرژی بستگی کل، B، و انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون B/A، را برای $^{56}_{26}Fe$ و $^{238}_{92}U$ حساب کنید. (جرم $^{56}_{26}Fe$ برابر $9/29\times10^{-26}kg$ و جرم $^{238}_{92}U$ برابر $3/95\times10^{-25}kg$ است.)

۲۱ــ در جریان یک حفاری باستان‌شناسی یک اجاق مخصوص پخت وپز 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؟ (نیم عمر کربن ۱۴ برابر ۵۷۳۰ سال است.)



جدول تناوبی عنصرها

برخی از ثابت‌های فیزیکی

سرعت نور	c	$۲/۹۹۸\times۱۰^{۸}\ m/s$
ثابت گرانش	G	$۶/۶۷۳\times۱۰^{-۱۱}\ N.m^{۲}/kg^{۲}$
ثابت آووگادرو	N_A	$۶/۰۲۲\times۱۰^{۲۳}\ mol^{-۱}$
ثابت جهانی گازها	R	$۸/۳۱۴\ J/mol.K$
ثابت گذردهی الکتریکی	$\varepsilon_{۰}$	$۸/۸۵۴\times۱۰^{-۱۲}\ F/m$
ثابت تراوایی مغناطیسی	$\mu_{۰}$	$۱/۲۵۷\times۱۰^{-۶}\ H/m$
ثابت پلانک	h	$۶/۶۲۶\times۱۰^{-۳۴}\ J.s$
		$۴/۱۳۶\times۱۰^{-۱۵}\ eV.s$
ثابت بولتزمن	k	$۱/۳۸۱\times۱۰^{-۲۳}\ J/K$
		$۸/۶۱۷\times۱۰^{-۵}\ eV/K$
بار الکتریکی بنیادی	e	$۱/۶۰۲\times۱۰^{-۱۹}\ C$
جرم الکترون	m_e	$۹/۱۰۹\times۱۰^{-۳۱}\ kg$
		$۵/۴۸۶\times۱۰^{-۴}\ u$
		$۰/۵۱۱\ MeV$
جرم پروتون	m_p	$۱/۶۷۳\times۱۰^{-۲۷}\ kg$
		$۱/۰۰۷u$
		$۹۳۸/۲۷۲\ MeV$
جرم نوترون	m_n	$۱/۶۷۵\times۱۰^{-۲۷}\ kg$
		$۱/۰۰۸u$
		$۹۳۹/۵۶۶\ MeV$
جرم دوترون	m_d	$۳/۳۴۴\times۱۰^{-۲۷}\ kg$
شعاع بوهر	$a_{۰}$	$۵/۲۹۲\times۱۰^{-۱۱}\ m$
ثابت ریدبرگ	R	$۱/۰۹۷۳۷۳\times۱۰^{۷}\ m^{-۱}$
ثابت کولن	$۱/۴\pi\varepsilon_{۰}$	$۸/۹۸۸\times۱۰^{۹}\ N.m^{۲}.C^{-۲}$
یکای جرم اتمی	u	$۱/۶۶۰\times۱۰^{-۲۷}\ kg$
		$۹۳۱/۴۹۴\ MeV$
ثابت قانون جابه‌جایی وین	b	$۲/۸۹۸\times۱۰^{-۳}\ m.K$

برخی از ضریب‌های تبدیل واحدها

سرعت

$1\,m/s = 3/28\,ft/s = 2/24\,mi/h$

$1\,km/h = 0/621\,mi/h = 0/278\,m/s$

نیرو و فشار

$1\,N = 0/225\,lb$

$1\,lb = 4/45\,N$

$1\,ton = 2000\ lb$

$1\,Pa = 1\,N/m^2$

$= 1/45\times10^{-4}\ lb/in.^2$

$1\,atm = 1/01\times10^5\,Pa = 14/7\,lb/in.^2$

$= 76/0\,cmHg$

انرژی و توان

$1\,J = 0/2389\,cal = 0/738\,ft.lb$

$1\,kW.h = 3/6\times10^6\,J$

$1\,cal = 4/1868\,J$

$1\,eV = 1/6021\times10^{-19}\,J$

$1\ horsepower = 746\,W = 550\,ft.lb/s$

مغناطیس

$1\,T = 1\,Wb/m^2 = 10^4\,gauss$

جرم و چگالی

$1\,kg = 1000\,g = 6/022\times10^{26}\,u$

$1\,slug = 14/59\,kg$

$1\,u = 1/6601\times10^{-27}\,kg$

$1\,kg/m^3 = 10^{-3}\,g/cm^3$

طول و حجم

$1\,m = 100\,cm = 39/4\,in. = 3/28\,ft$

$1\,mi = 1/61\,km = 5280\,ft$

$1\,in. = 2/54\,cm$

$1\,nm = 10^{-9}\,m = 10\,\mathring{A}$

$1\,pm = 10^{-12}\,m = 1000\,fm$

$1\,light-year = 9/4601\times10^{15}\,m$

$1\,m^3 = 1000\,L = 35/3\,ft^3 = 264\,gal$

زمان

$1\,d = 86400\,s$

$1\,y = 365\frac{1}{4}\,d = 3/16\times10^7\,s$

زاویه

$1\,rad = 57/3^\circ = 0/159\,rev$

$\pi\,rad = 180^\circ = \frac{1}{2}\,rev$

برخی از خواص فیزیکی

جرم خورشید	$۱/۹۹\times۱۰^{۳۰}\,kg$
شعاع خورشید	$۶/۹۶\times۱۰^{۸}\,m$
جرم زمین	$۵/۹۸\times۱۰^{۲۴}\,kg$
شعاع زمین	$۶/۳۷\times۱۰^{۶}\,m$
شعاع مدار زمین	$۱/۵۰\times۱۰^{۱۱}\,m = ۱Au$
متوسط شتاب گرانشی در سطح زمین	$۹/۸۰۶\,m/s^{۲}$
دوره‌ی یک ماهواره در ارتفاع یک‌صد کیلومتری زمین	$۸۶/۳\,min$
سرعت فرار از زمین	$۱۱/۲\,km/s$
میدان الکتریکی متوسط در سطح زمین	$۱۵۰\,V/m$، به‌طرف پایین
فاصله‌ی زمین تا ماه	$۳/۸۲\times۱۰^{۸}\,m$
فاصله‌ی زمین تا خورشید	$۱/۵۰\times۱۰^{۱۱}\,m$
فاصله‌ی زمین تا نزدیکترین ستاره به خورشید	$۴/۰۴\times۱۰^{۱۶}\,m$
فاصله‌ی زمین تا مرکز کهکشان راه شیری	$۲/۲\times۱۰^{۲۰}\,m$
فاصله‌ی زمین تا لبه‌ی جهان قابل رؤیت	$\sim۱۰^{۲۶}\,m$
جرم ماه	$۷/۳۵\times۱۰^{۲۲}\,kg$
شعاع ماه	$۱/۷۴\times۱۰^{۶}\,m$
شعاع مدار ماه	$۳/۸۴\times۱۰^{۸}\,m$
چگالی هوا	$۱/۲۱\,kg/m^{۳}$
گرمای ویژه هوا در فشار ثابت	$۱۰۱۰\,J/kg.K$
سرعت صوت در هوا	$۳۴۳\,m/s$
شدت میدان الکتریکی فروشکست هوا	$۳\times۱۰^{۶}\,V/m$
چگالی آب	$۱۰۰۰\,kg/m^{۳}$
سرعت صوت در آب	$۱۴۶۰\,m/s$
گرمای ویژه‌ی آب در فشار ثابت	$۴۱۹۰\,J/kg.K$
گرمای نهان ذوب آب ($۰^{\circ}C$)	$۳۳۳\,kJ/kg$
گرمای نهان تبخیر آب ($۱۰۰^{\circ}C$)	$۲۲۶۰\,kJ/kg$
ضریب شکست آب (در طول موج $\lambda = ۵۸۹nm$)	۱/۳۳

واژه‌نامه‌ی فارسی ــ انگلیسی

آ ـ ا

آستانه‌ی دردناکی	Threshold of pain
آستانه‌ی شنوایی	Threshold of hearing
آشفتگی	Disturbance
آلایش	Doping
آونگ	Pendulum
آونگ ساده	Simple pendulum
آشکارسازی	Detection
ابر رسانا	Superconductor
اثر دوپلر	Doppler effect
اثر فوتوالکتریک	Photoelectric effect
ارتفاع اوج	Maximum height
الگوی بور	Bohr’s model
الگوی تامسون	Thomson’s model
الگوی رادرفورد	Rutherford’s model
امواج الکترومغناطیس	Electromagnetic waves
انتشار	Propagation
انتهای آزاد	Free end
انتهای بسته	Fixed end
اندازه	Magnitude
انرژی بستگی	Binding energy
انرژی پتانسیل	Potential energy
انرژی پتانسیل کشسانی	Elastic potential energy
انرژی پتانسیل گرانشی	Gravitational potential
انرژی جنبشی	Kinetic energy
انرژی یونش	Ionization energy
ایزوتوپ	Isotope

ب

بار	Charge
برآیند	Resultant
بردار	Vector

بردار مکان	Position vector
بردارهای یکه	Unit vector
برهم‌کنش	Interaction
بسامد (فرکانس)	Frequency
بسامد زاویه‌ای	Angular frequency
بسامد قطع	Cut - off frequency
برانگیخته	Excited
بعد	Dimension
بلندگو	Loud speaker
بلندی (صوت)	Loudness
بیضی	Ellipse

پ

پایدار (مانا)	Stable
پایداری اتم	Atom stability
پایستگی انرژی	Energy conservation
پایستگی انرژی مکانیکی	Conservation of mechanical energy
پرتو گاما	Gamma ray
پهنای نوار	Bandwidth
پیوندPn	Pnjunction
پیوندگاه	Junction

ت

تابش جسم سیاه	Black body radiation
تابش گرمایی	Thermal radiation
تابع دوره‌ای	Periodic function
تابع سینوسی	Sinusoidal function
تابع موج	Wave function
تابندگی	Radiance
تبدیل جرم ـ انرژی	Mass - energy conversion
تپ	Pulse
تجزیه‌ی یک بردار	Resolution of a vector
تداخل	Interference
تداخل سازنده	Constructive interference

تداخل ویرانگر	Destructive interference
تراز انرژی	Energy level
تراز شدت (صوت)	Intensity level
ترانزیستور	Transistor
تشدید	Resonance
تکفام	Monochromatic
تغییر مکان	Displacement
تفریق بردارها	Subtraction of vectors

ث

ثابت پلانک	Planck’s constant
ثابت ریدبرگ	Rydberg constant
ثابت فنر	Constant of spring

ج

جابه‌جایی	Displacement
جبهه‌ی موج	Wave front
جسم سیاه	Black body
جمع بردارها	Addition of vectors
جوش هسته‌ای (همجوشی هسته‌ای)	Nuclear fusion
جت	Direction

چ

چشمه، منبع	Source

ح

حجم	Volume
حرکت با شتاب ثابت	Motion with constant acceleration
حرکت پرتابی	Projectile
حرکت تند شونده	Accelerating motion
حرکت دایره‌ای	Circular motion
حرکت دایره‌ای یکنواخت	Uniform circular motion
حرکت روی خط راست	Rectilinear motion
حرکت روی یک صفحه	Motion of plane

Decelerating motion	حرکت کندشونده
Simple harmonic motion	حرکت نوسانی ساده
Uniform motion	حرکت یکنواخت
Cavity	حفره(کاواک)

د

Amplitude	دامنه
Wave trough	دره‌ی موج
Period	دوره
Tuning fork	دیاپازون
Dynamics	دینامیک
Diode	دیود

ذ

Beta particle	ذره‌ی بتا

ر

Radioactive	رادیواکتیو
Radioactivity	رادیواکتیویته
Conductor	رسانا
Series of lines	رشته‌ی خطوط
Rydberg	ریدبرگ

س

Structure	ساختار
Velocity	سرعت
Speed of propagation	سرعت انتشار
Initial velocity	سرعت اولیه
Angular velocity	سرعت زاویه‌ای
Instantaneous velocity	سرعت لحظه‌ای
Average velocity	سرعت متوسط
Inclined plane	سطح شیب‌دار
Free falling	سقوط آزاد

سو	Sense
سیارات	Planets

ش

شتاب	Acceleration
شتاب شعاعی	Radial acceleration
شتاب گرانش	Gravity acceleration
شتاب لحظه‌ای	Instantaneous acceleration
شتاب متوسط	Average acceleration
شتاب مماسی	Tangential acceleration
شدت (صوت)	Intensity
شدت موج	Wave Intensity
شکافت هسته	Nuclear fission
شکم (موج)	Antinode
شیب خط	Slope

ص

صوت	Sound

ض

ضریب اصطکاک حالت سکون	Static coeficient of friction
ضریب اصطکاک لغزشی	Kinematic coeficient of friction
ضریب جذب	Absorption coeficient
ضریب گسیل	Emissivity coeficient
ضریب بازتاب	Reflection coeficient
ضریب عبور	Transmission coeficient

ط

طول موج	Wave length
طیف	Spectrum
طیف اتمی	Atomic spectrum
طیف نشری (گسیلی)	Emission spectrum
طیف جذبی	Absorption spectrum

طیف نما	Spectroscope
طیف نمایی	Spectroscopy

ع

عدد موج	Wave number
عدم قطعیت	Inaccuracy

غ

غرش صوتی	Sonic boom
غنی‌سازی	Enrichment

ف

فرابنفش	Ultraviolet
فراصوت	Ultrasound
فروپاشی	Disintegration
فروسرخ	Infrared
فروصوت	Subsonic
فنر	Spring
فیزیک اتمی	Atomic physics
فیزیک هسته‌ای	Nuclear physics

ق

قانون جابه‌جایی وین	Wien’s displacement law
قطار موج	Wave train
قلب راکتور	Reactor core
قله موج	Wave’s crest
قوانین کپلر	Kepler’s laws
قوانین نیوتون	Newton’s laws

ک

کمیت اصلی	Quantity
کمیت برداری	Vectorial quantity
کمیت ناپیوسته	Discrete quantity

Scalar quantity	کمیت نرده‌ای

گ

Transition	گذار
Electronic intraband transition	گذار درون نواری الکترون
Electronic interband transition	گذار میان نواری الکترون
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

نظریه‌ی زمین مرکزی	Geocentric theory
نوار تاریک	Dark fringe
نوار روشن	Light fringe
نوارهای تداخلی	Inter ference
نور طبیعی	Natural light
نور مرئی	Visible light
نوسانگر	Oscillator
نوسان میرا	Damped oscillation
نیرو	Force
نیروسنج	Dynamometer
نیروی بازگرداننده	Restoring force
نیروی گرانشی	Gravitational force
نیروی مرکزگرا	Centripetal force
نیروی هسته‌ای	Nuclear force
نیم‌رسانا	Semiconductor
نیمه عمر	Half life

و

واپاشی	Decay
واکنش	Reaction
واکنش زنجیره‌ای	Chain reaction
وضع تعادل	Equilibrium state
ولتاژ متوقف‌کننده	Stopping potential

هـ

همجوشی	Fusion
هسته (اتم)	Nucleus
هسته‌ی پایدار	Stable nucleus
هسته‌ی ناپایدار	Unstable nucleus
همگن	Homogeneous

ی

یکا	Unit

فهرست مراجع

1- Physics Raymond A. Serway Jerry S. Faughn 1999 by Holt Rinehart and Winston.

2- Physics for Scientists and Engineers Paul A. Tipler 1999 by W. H. Freedman and Company.

3- College Physics Raymond A. Serway Jerry S. Faughn 1999,2000, Sauners College Publishing.

4 - Fundamentals of Physics.
David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker 2001 John Wiley & Sons, Inc.

5 - Physics. principles with Applications Douglas C. Gioncoli 1991 Prentice - Hall International Editions.

6 - Understanding Physics Robin Millar 1994 Collins Educational.

7 - Physics Classical and Modern, Frederick J. Keller W. Edward Gettys, Malcolm J. Skove 1993 Mc Graw Hill.

8 - University Physics, Hugh D. Young, Roger A. Freedman, 2000 Addison Wesley Longman, Inc.

9- Contemporary College Physics. Jones / Childers 1999 by Mc Graw Hill Companies.

10 - Physics 2 David Sanq 2001 Cambridge University Press.

11 - The Physical Universe, Krauskopf / Beiser, 1993 Mc Graw Hill, Inc.

12 - Physics, Hugh D.Young, Eight Edition, 1992, Addison Wesley Publishing Company.

۱۳ــ پرسش‌ها و مسئله‌های تکمیلی فیزیک ۱ و ۲ پیش‌دانشگاهی، انتشارات فاطمی، ۱۳۸۷.

۱۴ــ دانش‌نامه‌ی جهان اسلام، بنیاد دایرة المعارف اسلامی، گروه نویسندگان

۱۵ــ دایرة المعارف اسلامی، مرکز دایرة المعارف بزرگ اسلامی، گروه نویسندگان