فصل ۳

نوسان و امواج

عمل لیتوتریپسی (Lithotripsy)، روشی غیرتهاجمی برای شکستن سنگ‌های کلیه است. در این عمل، امواج فراصوتی روی سنگ‌های کلیه متمرکز می‌شوند، به‌طوری که با خرد شدن سنگ‌ها، آنها بتوانند از طریق مجاری ادراری خارج شوند. چگونه یک دستگاه عمل لیتوتریپسی می‌تواند امواج فراصوتی را بر یک سنگ کلیه چنان متمرکز کند که موجب شکستن آن شود؟

بخش‌ها

۳ـ۱ نوسان دوره‌ای
۳ـ۲ حرکت هماهنگ ساده
۳ـ۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده
۳ـ۴ تشدید
۳ـ۵ موج و انواع آن
۳ـ۶ مشخصه‌های موج
۳ـ۷ بازتاب موج
۳ـ۸ شکست موج

دنیای ما پر از نوسان است. ضربان قلب انسان، تاب خوردن، بالا و پایین رفتن سرنشینان کشتی روی امواج خروشان دریا و زمین‌لرزه نمونه‌هایی از این دست هستند (شکل ۳ــ۱). مطالعه و کنترل نوسان‌ها در سامانه‌های مختلف دو هدف اصلی فیزیک‌دان‌ها و مهندسان است. در این فصل نوعی از نوسان موسوم به نوسان دوره‌ای و نمونه‌ای مشهور از این نوع نوسان‌ها به نام حرکت هماهنگ ساده را بررسی می‌کنیم. در ادامه با پدیدهٔ تشدید و سپس با موج و انواع آن آشنا می‌شویم و آنگاه به موج‌های عرضی و طولی می‌پردازیم. نمونه‌ای از موج‌های عرضی که در این فصل بررسی می‌شود امواج الکترومغناطیسی (و از جمله نور مرئی) و نمونه‌ای از موج‌های طولی که مورد بررسی قرار می‌گیرند، امواج صوتی هستند. همچنین امواج با محیطی که در آن منتشر می‌شوند برهم‌کنش نیز می‌کنند. بازتاب و شکست امواج نمونه‌هایی از این برهم‌کنش هستند که به‌خصوص کاربردهایی فراوان در علوم‌طبیعی دارند.

(الف)

(ب)

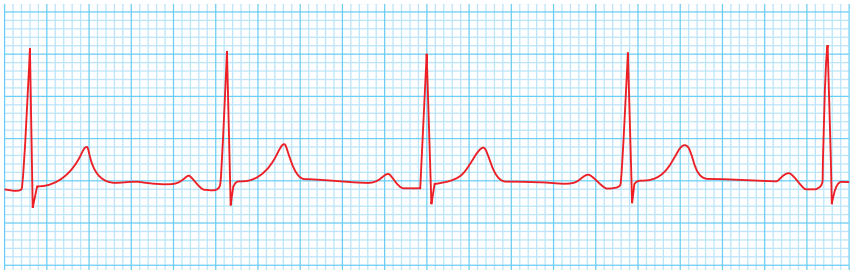
(پ)

(ت)

شکل ۳ــ۱ الف) ضربان قلب انسان، ب) تاب خوردن، پ) بالا و پایین رفتن سرنشینان کشتی، ت) زمین‌لرزه، نمونه‌هایی از نوسان هستند.

۳ــ۱ نوسان دوره‌ای

نوسان‌ها می‌توانند دوره‌ای یا غیردوره‌ای باشند؛ مثلاً شکل ۳ــ۲ تصویری از ضرباهنگِ (ریتمِ) قلب یک شخص را نشان می‌دهد که در هر دقیقه ۶۵ بار می‌زند. نقش‌های این تصویر به‌طور منظم دقیقاً تکرار می‌شوند، که به آن چرخهٔ (سیکل) نوسان گفته می‌شود. چنین نوسان‌هایی را که هر چرخهٔ آن در دورهای دیگر تکرار شود نوسان‌های دوره‌ای می‌نامند. مدت زمان یک چرخه، دورهٔ تناوب حرکت نامیده می‌شود و آن را با T نشان می‌دهند. بنابه این تعریف، دورهٔ تناوب ضربان قلب این شخص $\frac{۱}{۶۵}$ دقیقه، یا ۰/۹۲ ثانیه است.



شکل ۳ــ۲ نمونه‌ای از نمودار الکتروقلب نگارهٔ[۱] (نوار قلب) یک شخص[۲]

تعداد نوسان‌های انجام شده (تعداد چرخه) در هر ثانیه بسامد (فرکانس) نامیده می‌شود و آن را با f نشان می‌دهند. بنابراین :

$$f = \frac{۱}{T} \qquad \text{(بسامد)} \qquad (۳ــ۱)$$

یکای بسامد در SI، هرتز (Hz) است که به افتخار فیزیک‌دان آلمانی، هاینریش هرتز، نام‌گذاری شده است. طبق تعریف :

$$۱\ \text{Hz} = ۱\ \text{چرخه بر ثانیه} = ۱\ \text{s}^{-۱}$$

پرسش ۳ــ۱

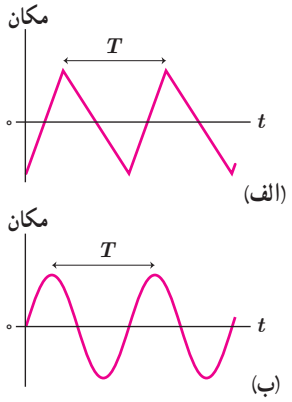
بسامد ضربان قلب مربوط به نمودار شکل ۳ــ۲ چقدر است؟

۱ــ Electro Cardio Gram (ECG)

۲ــ در این نمودار محور عمودی، ولتاژ و محور افقی، زمان است.

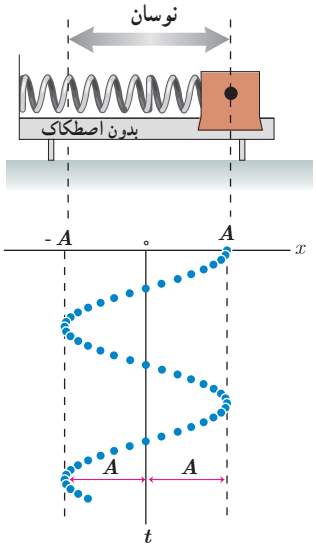
۳ــ۲ حرکت هماهنگ ساده

در بخش پیش با نمونه‌ای از یک نوسان دوره‌ای آشنا شدیم. شکل ۳ــ۳، دو نمونهٔ دیگر از نوسان‌های دوره‌ای را با رسم نمودار مکان ــ زمان آنها نشان می‌دهد. هر دوی این نوسان‌ها دوره‌ای هستند، ولی نوسان شکل ۳ــ۳ ب، به‌طور سینوسی[۱] رخ داده است. به نوسان‌های سینوسی، حرکت هماهنگ ساده (SHM)[۲] گفته می‌شود. حرکت هماهنگ ساده، مبنایی برای درک هر نوع نوسان دوره‌ای دیگر است زیرا در سطوح بالاتر نشان داده می‌شود که هر نوسان دوره‌ای را می‌توان مجموعی از نوسان‌های سینوسی در نظر گرفت.



شکل ۳ــ۳ نمودار مکان ــ زمان برای دو نمونه از نوسان دوره‌ای

یک نمونهٔ معروف از حرکت هماهنگ ساده، جرمی است که با یک فنر نوسان می‌کند. شکل ۳ــ۴ جسم متصل به فنری را نشان می‌دهد که روی سطح افقی بدون اصطکاکی قرار گرفته است. اگر جسم به اندازهٔ چند سانتی‌متر کشیده و سپس رها شود، به جلو و عقب نوسان خواهد کرد. اگر مکان جسم را در بازه‌های زمانی متوالی و یکسان ثبت کنیم به نموداری سینوسی می‌رسیم که در این شکل نشان داده شده است. در این شکل جسم بین $x=-A$ و $x=+A$ به جلو و عقب می‌رود که در آن A *دامنهٔ* حرکت است. به عبارتی دامنهٔ حرکت، بیشینهٔ فاصلهٔ جسم از *نقطهٔ تعادل* است. توجه کنید که دامنه، فاصلهٔ بین دو انتهای مسیر *نیست*.



شکل ۳ــ۴ سامانهٔ جسم و فنر، نمونهٔ مشهوری از یک حرکت هماهنگ ساده است.

همان‌طور که دیدیم، در حرکت هماهنگ ساده نمودار مکان ــ زمان، نموداری سینوسی است. یعنی مکان (یا جابه‌جایی نسبت به نقطهٔ تعادل) را می‌توان به‌صورت تابعی سینوسی یا کسینوسی از زمانِ t نوشت. در این کتاب برای سادگی تابع کسینوس را برمی‌گزینیم، یعنی فرض می‌کنیم در لحظهٔ $t=0\,s$ نوسانگر در مکان بیشینهٔ خود، یعنی $x=+A$، باشد. بنابراین مکانِ $x(t)$ نوسانگر را می‌توان چنین نوشت :

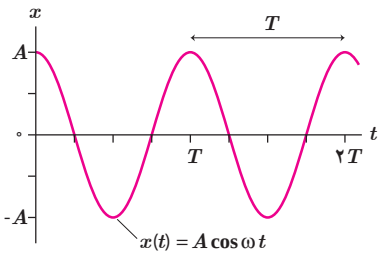
$$x(t)=A\cos\omega t \qquad \text{(معادلهٔ مکان ــ زمان در حرکت هماهنگ ساده)} \qquad (۳ــ۲)$$

در این رابطه ω بسامد زاویه‌ای نوسانگر نامیده می‌شود و برابر است با :

$$\omega=\frac{2\pi}{T}=2\pi f \qquad \text{(بسامد زاویه‌ای)} \qquad (۳ــ۳)$$

یکای بسامد زاویه‌ای در SI برابر rad/s است.

توجه کنید که در رابطهٔ ۳ــ۲، شناسهٔ تابع کسینوس (یعنی ωt) برحسب رادیان است. شکل ۳ــ۵ نموداری از این تابع را نشان می‌دهد. اگر به حرکت سامانهٔ جرم ــ فنر شکل ۳ــ۴ توجه کنید درمی‌یابید که وقتی نوسانگر در $x=\pm A$ است، سرعت آن برابر با صفر است. به این نقطه‌ها اصطلاحاً *نقطه‌های بازگشت*[۳] حرکت می‌گویند. همچنین وقتی $x=0$ است (یعنی نوسانگر از نقطهٔ تعادل می‌گذرد) اندازهٔ سرعت بیشینه است، یعنی بسته به اینکه جسم در جهت $+x$ یا $-x$ از نقطهٔ تعادل بگذرد، $v=+v_{max}$ یا $v=-v_{max}$ خواهد بود[۴]. اگرچه روابط ۳ــ۲ و ۳ــ۳ و بحث کوتاهی که دربارهٔ سرعت نوسانگر انجام دادیم برای سامانهٔ جرم ــ فنر بود، ولی برای هر نوسانگر هماهنگ ساده‌ای (از جمله آونگ ساده) برقرار است.



شکل ۳ــ۵ نمودار مکان ــ زمان برای حرکت هماهنگ ساده

۱ــ Sinusoidal. به‌طور عمومی به همهٔ تابع‌های سینوسی و کسینوسی، تابع سینوسی می‌گویند.

۲ــ Simple Harmonic Motion

۳ــ Turning Points

۴ــ بررسی روابط سرعت ــ زمان و سرعت ــ مکان در حرکت هماهنگ ساده خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و نباید در ارزشیابی این درس مورد پرسش قرار گیرد.

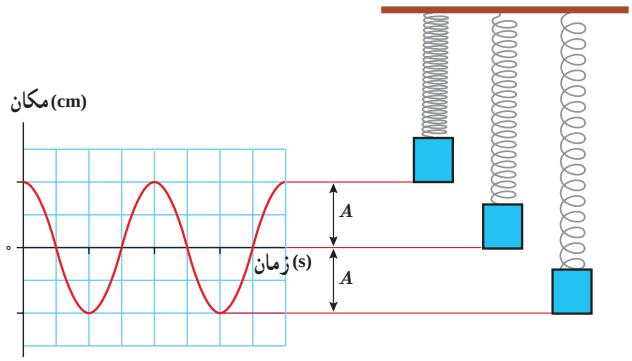
فعالیت ۳ـ۱

دیاپازون با تیغه‌ای نوک‌تیز

اثر ارتعاش‌های دیاپازون روی شیشهٔ دوداندود

نوسان‌نگار : نوسان‌نگار وسیله‌ای برای ثبت نوسان‌ها است. می‌خواهیم یک نوسان‌نگار ساده درست کنیم. به این منظور، یک وجه قطعه شیشه‌ای با طول و عرض تقریبی ۲۰cm و ۱۰cm را روی شعلهٔ شمعی بگیرید تا به خوبی دوداندود شود. سپس تیغهٔ نوک‌تیزی را به نوک یکی از شاخه‌های دیاپازون[۱] کم‌بسامدی (در حدود ۱۰۰Hz) محکم بچسبانید. دیاپازون را به نوسان وادارید و آن را به‌سرعت روی شیشهٔ دوداندود به حرکت درآورید، طوری‌که اثر نوک تیز تیغه روی سطح دوداندود بیفتد. روی شیشه، خط موج‌داری رسم می‌شود که به آن *نوسان‌نگاشت*[۲] گفته می‌شود.

مثال ۳ـ۱



جرمی متصل به یک فنر با بسامد ۰/۲۰ Hz و دامنهٔ ۳/۰ cm به‌طور هماهنگ ساده در امتداد قائم نوسان می‌کند. پس از گذشت ۱۰/۶۶s از رها شدن جرم از بالای نقطهٔ تعادل، جابه‌جایی این جرم نسبت به نقطهٔ تعادل چقدر است؟

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ $x = A\cos\omega t$ جابه‌جایی نسبت به نقطهٔ تعادلِ جرم ــ فنر را محاسبه می‌کنیم :

که در آن :

$$A = ۰/۰۳۰\,\text{m}\ ,\ \omega = ۲\pi f = ۲\pi\,(۰/۲۰\,\text{s}^{-۱}) = ۰/۴۰\pi\ \text{rad/s}\ ,\ t = ۱۰/۶۶\,\text{s}$$

در نتیجه، در یکای SI داریم[۳] :

$$x = (۰/۰۳۰\,\text{m})\cos\,(۰/۴۰\pi\ \text{rad/s} \times ۱۰/۶۶\,\text{s}) = ۰/۰۲۰\,\text{m}$$

تمرین ۳ـ۱

ذره‌ای در حال نوسان هماهنگ ساده با دورهٔ تناوب T است. با فرض اینکه در $t=۰\,\text{s}$ ذره در $x=+A$ باشد، تعیین کنید در هر یک از لحظات زیر، آیا ذره در $x=-A$، در $x=+A$، یا در $x=۰$ خواهد بود؟ الف) $t=۲/۰۰\,T$، ب) $t=۳/۵۰\,T$، پ) $t=۵/۲۵\,T$

(راهنمایی : برای پاسخ به این تمرین، ساده‌تر آن است که چند دوره از یک نمودار کسینوسی را رسم کنید.)

تمرین ۳ـ۲

در حرکت هماهنگ ساده، مکان $x(t)$ باید پس از گذشت یک دورهٔ تناوب برابر مقدار اولیه‌اش شود. یعنی اگر $x(t)$ مکان در زمان دلخواه t باشد، آن‌گاه نوسانگر باید در زمان $t+T$ دوباره به همان مکان بازگردد و بنابراین $A\cos\omega t = A\cos\omega(t+T)$. براین اساس نشان دهید $\omega = ۲\pi/T$.

۱ـ Tuning Fork

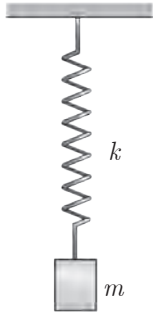
۲ـ Oscillogram

۳ـ اگر از ماشین حساب برای محاسبهٔ چنین روابطی استفاده می‌کنید، دقت کنید که مُدِ ماشین‌حساب روی رادیان (RAD) باشد.

آزمایش‌های متعدد با جرم و فنر نشان می‌دهد که افزایش جرم m در سامانهٔ جرم ــ فنر (با فنر یکسان) به کُند شدن نوسان‌ها، یعنی افزایش دورهٔ تناوب T می‌انجامد. همچنین اگر این آزمایش‌ها را با وزنه‌ای به جرم ثابت ولی فنرهایی با سختی متفاوت (kیِ متفاوت) انجام دهیم، درمی‌یابیم که با افزایش ثابت فنر k دورهٔ تناوب Tیِ نوسان‌ها کوتاه‌تر می‌شود.

هاینریش هرتز (۱۸۹۴ــ۱۸۵۷ م.)
در آلمان به دنیا آمد. او در ابتدا به رشته‌های معماری و مهندسی علاقه‌مند بود، اما خیلی زود از این علاقه دست کشید و به علوم پایه دل بست. او در دانشگاه برلین تحصیل کرد و از شاگردان *هرمن فون هلمهولتز* بود. هرتز پس از فارغ‌التحصیلی به تحقیق دربارهٔ نظریهٔ الکترومغناطیس ماکسول پرداخت. او به خاطر آزمایش‌هایی که در این زمینه انجام داد به سمت استادی فیزیک دانشگاه پلی‌تکنیک کالسروهه منصوب شد. در آنجا یک فرستنده و یک گیرندهٔ رادیویی ساخت که مورد توجه قرار گرفت و به کمک آن توانست تندی امواج رادیویی را به‌دست آورد. آزمایش‌های متعدد هرتز، به قول خود او، همگی نشانه‌ای از پیروزی درخشان نظریهٔ ماکسول بود.

فعالیت ۳ــ۲



با انتخاب وزنه‌ها و فنرهای مختلف در آرایشی مطابق شکل، و با اندازه‌گیری زمان تعداد مشخصی نوسان کامل، و سپس محاسبهٔ دورهٔ تناوب T برای هر سامانهٔ جرم ــ فنر، به‌طور تجربی نشان دهید که :

الف) دورهٔ تناوب سامانهٔ جرم ــ فنر با یک فنر معیّن ولی وزنه‌های متفاوت، با جذر جرم وزنه به‌طور مستقیم متناسب است ($T \propto \sqrt{m}$).

ب) دورهٔ تناوب سامانهٔ جرم ــ فنر با یک وزنهٔ معیّن ولی فنرهای متفاوت، با جذر ثابت فنر به‌طور وارون متناسب است ($T \propto 1/\sqrt{k}$).

پ) دورهٔ تناوب سامانه جرم ــ فنر مستقل از دامنه است.

محاسبات و همچنین آزمایش‌هایی مشابه با آنچه در فعالیت ۳ــ۲ دیدید نشان می‌دهد دورهٔ تناوب سامانهٔ جرم ــ فنر با وزنه‌ای به جرم m و فنری با ثابت k برابر است با :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad \text{(دورهٔ تناوب سامانهٔ جرم ــ فنر)} \qquad (۳ــ۴)$$

بسامد زاویه‌ایِ ω را نیز می‌توانیم از رابطهٔ $\omega = 2\pi/T$ به دست آوریم :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad \text{(بسامد زاویه‌ای سامانهٔ جرم ــ فنر)} \qquad (۳ــ۵)$$

مثال ۳ــ۲

قطعه‌ای به جرم $680\,g$ به فنری با ثابت فنر $k = 65\,N/m$ بسته شده است. قطعه را به اندازهٔ مشخصی از مکان تعادل خود روی یک سطح افقی بدون اصطکاک می‌کشیم و از حالت سکون رها می‌کنیم. الف) دورهٔ تناوب و ب) بسامد زاویه‌ای نوسان چقدر می‌شود؟

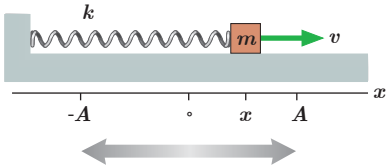
پاسخ : الف) دورهٔ تناوب با استفاده از رابطهٔ ۳ــ۴ به‌دست می‌آید :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{0/680\,kg}{65\,N/m}} = 0/64\,s$$

ب) بسامد زاویه‌ای از رابطهٔ ۳ــ۵ به‌دست می‌آید :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{65\,N/m}{0/680\,kg}} = 9/8\ rad/s$$

۳ــ۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده

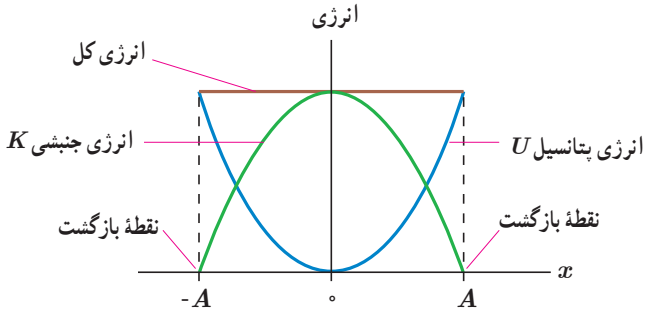


شکل ۳ــ۶ سامانهٔ جرم ــ فنری را هنگام نوسان روی سطح افقی بدون اصطکاک نشان می‌دهد. این سامانه مثال بارز حرکت هماهنگ ساده است. در کتاب فیزیک ۱ دیدید وقتی فنری فشرده یا کشیده می‌شود در سامانهٔ جرم ــ فنر انرژی پتانسیل کشسانی ذخیره می‌شود، به‌طوری که با افزایش جابه‌جایی از نقطهٔ تعادل (جایی که فنر نه فشرده و نه کشیده شده است) این انرژی پتانسیل افزایش می‌یابد. بنابراین انرژی پتانسیل سامانهٔ جرم ــ فنر در نقاط بازگشتی ($x=\pm A$) بیشینه و در نقطهٔ تعادل ($x=0$) برابر صفر است.

شکل ۳ــ۶ سامانهٔ جرم ــ فنر در نوسان روی سطح افقی بدون اصطکاک

انرژی جنبشی این سامانه نیز به جرم قطعهٔ متصل به فنر و تندی آن بستگی دارد و برابر با $K=\frac{1}{2}mv^2$ است. با افزایش جابه‌جایی از نقطهٔ تعادل، تندی کاهش می‌یابد و انرژی جنبشی سامانه نیز کم می‌شود، طوری که در نقاط بازگشتی $x=\pm A$ که تندی صفر می‌شود انرژی جنبشی سامانه به صفر می‌رسد. بیشینهٔ تندی در نقطهٔ تعادلِ $x=0$ رخ می‌دهد و بنابراین انرژی جنبشی نیز در این نقطه بیشینه می‌شود.

در فیزیک ۱ آموختیم که انرژی مکانیکی این سامانه برابر با مجموع انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل آن است ($E=K+U$). چون سطح بدون اصطکاک است، انرژی مکانیکی سامانه پایسته می‌ماند و بنابراین مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل در نقاط بازگشتی، نقطهٔ تعادل، و هر نقطهٔ دلخواه دیگری از مسیر با هم برابر است. به همان اندازه که با افزایش جابه‌جایی از نقطه تعادل، انرژی پتانسیل افزایش می‌یابد، انرژی جنبشی کاهش می‌یابد و بالعکس. شکل ۳ــ۷ تبدیل انرژی‌های جنبشی و پتانسیل به یکدیگر و پایستگی انرژی مکانیکی در حرکت هماهنگ سادهٔ سامانهٔ جرم ــ فنر را نشان می‌دهد.



شکل ۳ــ۷ تبدیل انرژی در حین حرکت هماهنگ سادهٔ سامانهٔ جرم ــ فنر. توجه کنید که در نقطهٔ $x=0$ انرژی، صرفاً جنبشی و در نقطه‌های $x=\pm A$ انرژی، صرفاً پتانسیل است. در این حرکت انرژی مکانیکی پایسته است، به گونه‌ای که به‌طور پیوسته از انرژی پتانسیل U به انرژی جنبشی K تبدیل می‌شود و بالعکس.

نشان داده می‌شود که انرژی مکانیکی سامانهٔ جرم ــ فنر در حرکت هماهنگ ساده از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید[۱]:

$$E=\frac{1}{2}kA^2 \qquad \text{(انرژی مکانیکی سامانهٔ جرم ــ فنر)} \qquad (۳ــ۶)$$

که در آن k ثابت فنر و A دامنهٔ نوسان است. با استفاده از رابطه‌های ۳ــ۵ و ۳ــ۳ به رابطهٔ مفید دیگری می‌رسیم که برای هر نوسانگر هماهنگ سادهٔ دیگری از جمله آونگ ساده نیز

۱ــ انرژی پتانسیل کشسانی سامانهٔ جرم ــ فنر در هر نقطه از مسیر نوسان از رابطهٔ $U=\frac{1}{2}kx^2$ به‌دست می‌آید که آموزش و ارزشیابی آن خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است. در نقاط بازگشتی که $x=\pm A$ است، این انرژی مساوی $\frac{1}{2}kA^2$ و برابر با انرژی مکانیکی سامانه است.

برقرار است :

$$E=\frac{۱}{۲}kA^۲=\frac{۱}{۲}m\omega^۲A^۲=۲\pi^۲mA^۲f^۲$$

یا

$$E=۲\pi^۲\,mA^۲f^۲ \qquad \text{(انرژی مکانیکی نوسانگر هماهنگ ساده)} \qquad (۳\text{ـ}۷)$$

اگرچه پایستگی انرژی مکانیکی و تبدیل انرژی‌های جنبشی و پتانسیل به یکدیگر را فقط برای نوسانگر جرم ــ فنر بررسی کردیم، ولی می‌توان نشان داد در حالت کلی، برای هرگونه نوسانگر هماهنگ سادهٔ دیگری (از جمله آونگ ساده) نیز برقرار است. همچنین بنا به رابطهٔ ۳ــ۷ انرژی مکانیکی هر نوسانگر هماهنگ ساده‌ای متناسب با مربع دامنه ($A^۲$) و مربع بسامد ($f^۲$) است.

مثال ۳ــ۳

الف) نشان دهید تندی بیشینه در حرکت هماهنگ ساده برابر است با $A\omega$.

ب) تندی نوسانگر هماهنگ ساده‌ای که با دامنهٔ ۱۰cm و دورهٔ ۰/۵۰s نوسان می‌کند هنگام عبور از نقطهٔ تعادل چقدر است؟

پاسخ : الف) بیشینهٔ تندی در حرکت هماهنگ ساده هنگام عبور نوسانگر از نقطهٔ تعادل رخ می‌دهد، جایی که انرژی پتانسیل صفر است. با استفاده از تعریف انرژی مکانیکی ($E=K+U$) و همچنین رابطه‌های ۳ــ۷ و ۳ــ۳ خواهیم داشت :

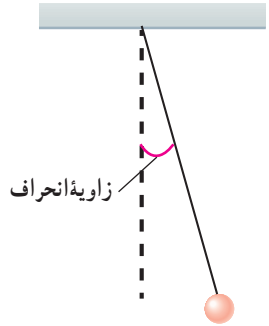
$$۲\pi^۲mA^۲f^۲=\frac{۱}{۲}mv_{max}^۲+۰\Rightarrow v_{max}=۲\pi Af=A\omega$$

ب)

$$v_{max}=A\omega=A(\frac{۲\pi}{T})=(۰/۱۰\text{m})(\frac{۲\pi}{۰/۵۰\text{s}})=۱/۳\ \text{m/s}$$

آونگ ساده : آونگ ساده شامل وزنهٔ کوچکی به جرم m (موسوم به وزنهٔ آونگ) است که از نخی بدون جرم و کش‌نیامدنی به طول L که سر دیگر آن ثابت شده، آویزان است (شکل ۳ــ۸). اگر زاویهٔ انحراف آونگ از وضع تعادل کوچک باشد، آونگ حرکت هماهنگ ساده خواهد داشت و همان تبدیل‌های انرژی نوسانگر هماهنگ ساده در اینجا نیز رخ می‌دهد.

آزمایش‌های متعدد و محاسبه، نشان می‌دهد دورهٔ تناوب آونگ ساده فقط به شتاب گرانشی (g) و طول آونگ (L) بستگی دارد، و از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :



شکل ۳ــ۸ آونگ ساده، شامل وزنه‌ای کوچک است که از نخی بدون جرم و کش‌نیامدنی آویزان است.

$$T=۲\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \qquad \text{(دورهٔ تناوب آونگ ساده)} \qquad (۳\text{ـ}۸)$$

این رابطه نشان می‌دهد که دورهٔ تناوب آونگ ساده به جرم و دامنهٔ آن بستگی ندارد.

مثال ۳ــ۴

بستگی دورهٔ تناوب آونگ به شتاب گرانشی، روش دقیقی را برای تعیین g به‌دست می‌دهد. در این روش با اندازه‌گیری طول L و دورهٔ تناوب T، می‌توان g را به‌دست آورد. ژئوفیزیک‌دانی با استفاده از یک آونگ ساده به طول ۰/۱۷۱m که ۷۲/۰ نوسان کامل را در ۶۰/۰s انجام می‌دهد، شتاب g زمین را در مکانی خاص تعیین می‌کند. وی مقدار g را در این مکان چقدر به‌دست می‌آورد؟

پاسخ : رابطهٔ دورهٔ تناوب آونگ ساده را برای g حل می‌کنیم :

$$g = \frac{۴\pi^۲ L}{T^۲}$$

که در آن T دورهٔ تناوب این آونگ است :

$$T = \frac{\text{زمان}}{\text{تعداد نوسان‌ها}} = \frac{۶۰/۰\,\text{s}}{۷۲/۰} = ۰/۸۳۳\,\text{s}$$

در نتیجه g چنین به‌دست می‌آید :

$$g = \frac{۴\pi^۲ L}{T^۲} = \frac{۴\pi^۲(۰/۱۷۱\,\text{m})}{(۰/۸۳۳\,\text{s})^۲} = ۹/۷۳\,\text{m/s}^۲$$

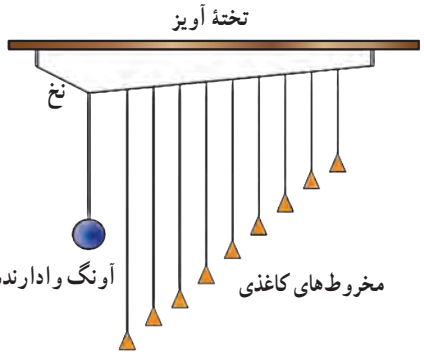
۳ــ۴ تشدید

شکل ۳ــ۹ با هُل دادن تاب، کودک به نوسان واداشته می‌شود.

در تمام مثال‌هایی که تا اینجا بررسی کردیم، نوسانگر (مثلاً جرم ــ فنر یا آونگ ساده) با انحراف از وضع تعادل با بسامدی معیّن شروع به نوسان می‌کرد. به بسامد این نوسان‌ها **بسامد طبیعی** گفته می‌شود. مطابق این تعریف، بسامد طبیعی سامانهٔ جرم ــ فنر $f_۰ = \sqrt{k/m}/۲\pi$ و بسامد طبیعی آونگ ساده $f_۰ = \sqrt{g/L}/۲\pi$ است. اما این نوسانگرها می‌توانند با اعمال یک نیروی خارجی، با بسامدهای دیگری نیز به نوسان درآیند. به چنین نوسانی، **نوسان واداشته** گفته می‌شود و بسامد این نوسان را با f_d نمایش می‌دهند[۱]. مثالی از یک نوسان واداشته، تاب خوردن کودکی است که به‌طور دوره‌ای هُل داده می‌شود (شکل ۳ــ۹). نوسان تاب بی‌آنکه در ادامهٔ حرکت هُل داده شود مثالی از یک نوسان آزاد است، به طوری که نوسان‌های تاب، میرا و سرانجام متوقف می‌شود. ولی وقتی شخصی تاب را هُل می‌دهد، او انرژی تلف شده بر اثر اصطکاک و مقاومت هوا را جبران می‌کند و مانع از میراشدن نوسان تاب می‌شود. اگر دامنهٔ نوسان‌های تاب بزرگ‌تر و بزرگ‌تر شود حاکی از آن است که بسامد نوسان‌های واداشته با بسامد طبیعی تاب برابر شده است. در چنین وضعیتی ($f_d = f_۰$) اصطلاحاً گفته می‌شود که برای نوسانگر **تشدید** (رزونانس) رخ داده است. اگر تاب را با بسامدهایی بیشتر یا کمتر از بسامد طبیعی آن هُل دهیم، دامنهٔ نوسان کوچک‌تر از حالتی خواهد شد که آن را با بسامد طبیعی‌اش هل می‌دهیم. پدیدهٔ تشدید را می‌توان با فعالیت سادهٔ زیر بررسی کرد.

فعالیت ۳ــ۳

آونگ‌های بارتون[۲] : یک آونگ با وزنهٔ سنگین و تعدادی آونگ سبک با طول‌های متفاوت را مطابق شکل سوار کنید. آونگ‌ها روی نخی سوار شده‌اند که هر دو انتهای آن توسط گیره‌هایی به تختهٔ آویز متصل شده است. به آونگ سنگین اصطلاحاً *آونگ وادارنده*[۳] گفته می‌شود، زیرا به نوسان درآوردن این آونگ در صفحهٔ عمود بر صفحهٔ شکل، موجب تاب خوردن نخ آویز و در نتیجه به نوسان واداشتن سایر آونگ‌ها می‌شود. آونگ وادارنده را به نوسان درآورید و آنچه را مشاهده می‌کنید توضیح دهید.



۱ــ شاخص پایین d سرواژهٔ driven به معنی واداشته است.

۲ــ Barton's Pendulums

۳ــ Driver Pendulum

تمرین ۳ــ۳

طول تعدادی آونگ ساده که از میله‌ای افقی آویزان‌اند، عبارت‌اند از، ۰/۴۰m ، ۰/۸۰m ، ۱/۲m ، ۲/۸m ، ۳/۵m. فرض کنید میله دستخوش نوسان‌هایی افقی با بسامد زاویه‌ای در گسترهٔ ۲/۰rad/s تا ۴/۰rad/s بشود. کدام آونگ‌ها با دامنهٔ بزرگ‌تری به نوسان درمی‌آیند؟ (توجه کنید گرچه تشدید در بسامد مشخصی رخ می‌دهد، اما دامنهٔ نوسان در نزدیک این بسامد همچنان بزرگ است).

پرسش ۳ــ۲

در پی زمین‌لرزهٔ عظیمی (به بزرگی ۸/۱ در مقیاس *ریشتر*) که در ساحل غربی مکزیک در سال ۱۹۸۵ اتفاق افتاد ساختمان‌های نیمه‌بلند فرو ریختند، ولی ساختمان‌های کوتاه‌تر و بلندتر پابرجا ماندند. علت این پدیده را توضیح دهید.

(الف)

(ب)

الف) ساختمان‌های کوتاه و ب) ساختمان‌های بلند، در زمین‌لرزهٔ مکزیکوسیتی بر جای ماندند.

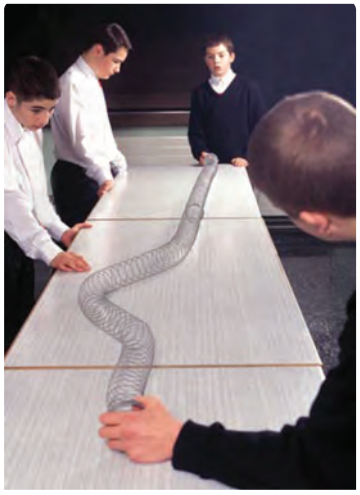
۳ــ۵ موج و انواع آن

هر گاه در ناحیه‌ای از یک محیط کشسان، ارتعاشی به‌وجود آید، موجب پدید آمدن ارتعاش‌های پی‌درپی دیگری می‌شود که از محل شروع ارتعاش دور و دورتر شوند و به این ترتیب آنچه که موج مکانیکی می‌نامند، به‌وجود می‌آید. معمولاً موج‌ها را به دو دسته تقسیم‌بندی می‌کنند : موج‌های مکانیکی و موج‌های الکترومغناطیسی. موج‌های مکانیکی ــ مانند موج‌های روی سطح آب (شکل ۳ــ۱۰) و موج‌های صوتی ــ برای انتشار خود به یک محیط مادی نیاز دارند و موج‌های الکترومغناطیسی ــ مانند نور مرئی، موج‌های رادیویی و تلویزیونی، میکروموج و پرتوهای x ــ برای انتشار خود به محیط مادی نیاز ندارند.

شکل ۳ــ۱۰ با پرتاب سنگ در آب، فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌هایی دایره‌ای شکل بر سطح آب پخش می‌شوند.

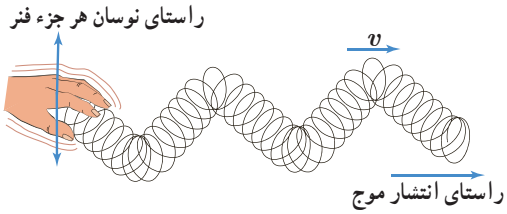
به‌رغم متفاوت بودن منشأ امواج مکانیکی و الکترومغناطیسی، همگی آنها مشخصه‌های یکسانی دارند و رفتار آنها از قاعده‌هایی کلی پیروی می‌کند که در هر پدیدهٔ موجی برقرار است.

اگر مانند شکل ۳ــ۱۱ یک سر فنر بلند[1] کشیده شده‌ای را به‌سرعت به چپ و راست تکان دهید، موجی به شکل یک تپ در طول فنر منتشر می‌شود. وقتی سرِ آزاد فنر را مانند شکل ۳ــ۱۲ رو به بالا حرکت می‌دهید، بخش مجاور آن نیز از طریق کشش بین این دو بخش شروع به بالا رفتن می‌کند. وقتی بخش مجاور به بالا حرکت کند، این بخش نیز به نوبهٔ خود شروع به بالا کشیدن بخش بعدی می‌کند و این روند ادامه می‌یابد. به همین ترتیب، پایین کشیدن سر آزاد فنر



شکل ۳ــ۱۱ نمایش ایجاد موج در یک فنر بلند کشیده

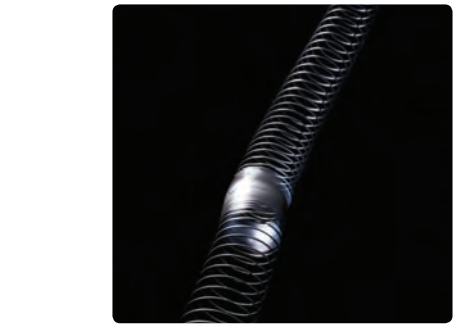
۱ــ به این فنر، فنر اسلینکی (Slinky) می‌گویند.



شکل ۳ــ۱۲ در حالی که موج به سمت راست منتشر می‌شود هر جزء فنر عمود بر راستای انتشار موج، به بالا و پایین نوسان می‌کند.

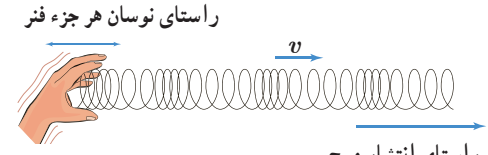
موجب پایین کشیده شدن بخش‌های بعدی فنر می‌شود، و بدین ترتیب آشفتگی‌ای در شکل فنر ایجاد می‌شود که با تندی v در طول فنر حرکت می‌کند. اگر دست خود را پیاپی به بالا و پایین حرکت دهید یک موج پیوسته با تندی v در طول فنر به حرکت درمی‌آید. اگر به حرکت جزئی از فنر که در هنگام عبور موج به بالا و پایین نوسان می‌کند دقت کنید درمی‌یابید جابه‌جایی هر جزء نوسان‌کننده‌ای از فنر، عمود بر جهت حرکت موج است، که به آن، موج عرضی گفته می‌شود.

از این فنر بلند می‌توان برای ایجاد نوع دیگری از موج موسوم به موج طولی نیز استفاده کرد. اگر این بار، سرِ آزاد فنر را به جای اینکه به بالا و پایین یا به چپ و راست حرکت دهید، به‌سرعت به جلو و عقب ببرید، یک تپ در طول فنر به راه می‌افتد (شکل ۳ــ۱۳) و اگر دست خود را پیاپی به جلو و عقب حرکت دهید یک موج طولی پیوسته با تندی v در طول فنر به حرکت درمی‌آید. اگر به حرکت جزئی از فنر که در هنگام عبور این موج به چپ و راست نوسان می‌کند دقت کنید، درمی‌یابید جابه‌جایی هر جزء نوسان‌کننده‌ای از فنر در راستای حرکت موج است (شکل ۳ــ۱۴). به همین دلیل است که به چنین موجی، موج طولی می‌گویند.



شکل ۳ــ۱۳ نمایش ایجاد یک تپ طولی در یک فنر بلندِ کشیده شده

به موج‌های عرضی و طولی که تا اینجا بررسی شد، موج‌های پیش‌رونده گفته می‌شود. زیرا، هر دوی این موج‌ها از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر حرکت کرده و انرژی را با خود منتقل می‌کنند. توجه کنید *این موج‌ها است که از یک سر به سر دیگر حرکت می‌کند نه ماده‌ای (در مثال‌های بالا فنر) که موج در آن حرکت می‌کند.* همچنین دریافتید که برای ایجاد چنین امواجی به یک جسم (چشمهٔ) نوسانی نیاز دارید و موج از این چشمه دور می‌شود، و اگر چشمه به‌طور هماهنگ ساده نوسان کند، اجزای محیط حول نقطهٔ تعادل خود با همان بسامد چشمه نوسان می‌کنند.



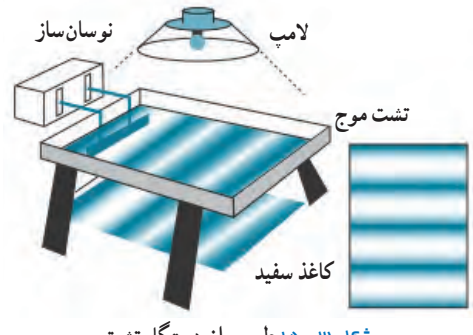
شکل ۳ــ۱۴ درحالی‌که موج به سمت راست حرکت می‌کند، هر حلقهٔ فنر همراستا با حرکت موج به چپ و راست نوسان می‌کند، به‌طوری‌که ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی به‌طور متناوب در طول فنر ظاهر می‌شود.

پرسش ۳ــ۳

همان‌طور که گفتیم یکی از ویژگی‌های موج پیش‌رونده انتقال انرژی از یک نقطه به نقطهٔ دیگر، در جهت انتشار موج است. با در نظر گرفتن یک تپ طولی در یک فنر بلندِ کشیده شده، این ویژگی را توضیح دهید.

۳ــ۶ مشخصه‌های موج

برای مطالعهٔ برخی از مشخصه‌های موج از وسیله‌ای موسوم به *تشت موج*[۱] استفاده می‌شود. طرح ساده‌ای از این وسیله در شکل ۳ــ۱۵ نشان داده شده است. این وسیله شامل یک تشت شیشه‌ای کم‌عمق و یک نوسان‌ساز است. یک راه مشاهدهٔ رفتار موج، استفاده از سایه‌ای است که توسط لامپ از سطح آب داخل تشت بر ورقهٔ کاغذیِ زیر تشت تشکیل می‌شود. برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های موج

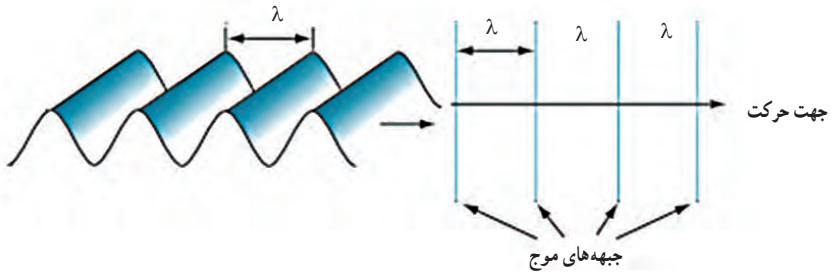


شکل ۳ــ۱۵ طرحی از دستگاه تشت موج

۱ــ Ripple tank

شکل ۳ـ۱۶ تشکیل امواج دایره‌ای بر سطح آب یک تشت موج

روی سطح آب، به‌وضوح در سایهٔ تشکیل شده بر ورقهٔ کاغذ دیده می‌شود. اگر مانند شکل ۳ـ۱۵، تیغه‌ای را بر سطح آب به نوسان درآوریم، موجی تخت بر سطح آب تشکیل می‌شود و اگر به جای تیغه از یک گوی کوچک استفاده کنیم به یک موج دایره‌ای می‌رسیم که از نقطهٔ تماس با سطح آب در تمام جهت‌ها حرکت می‌کند (شکل ۳ـ۱۶). در هر دو حالت، به هر یک از برآمدگی‌ها یا فرورفتگی‌های ایجادشده روی سطح آب، یک جبههٔ موج می‌گویند. به برآمدگی‌ها، قلّه (ستیغ) و به فرورفتگی‌ها درّه (پاستیغ) گفته می‌شود. فاصلهٔ بین دو برآمدگی یا دو فرورفتگی مجاور، طول‌موج نامیده می‌شود و آن را با λ نشان می‌دهند (شکل ۳ـ۱۷). طول‌موجِ λ برابر با مسافتی است که موج در مدت دورهٔ تناوب نوسان چشمه طی می‌کند.



شکل ۳ـ۱۷ طرحی از تشکیل جبهه‌های موج تخت بر سطح آب یک تشت موج.
جبهه‌های موج، روشی مناسب برای نمایش یک موج پیش‌رونده هستند.

با استفاده از آنچه برای موج سطحی در تشت موج آموختیم سایر مشخصه‌های این موج را نیز می‌توانیم معرفی کنیم.

دامنه (A) : بیشینهٔ فاصلهٔ یک ذره از مکان تعادل، *دامنهٔ موج* نامیده می‌شود که همان فاصلهٔ قله یا دره نسبت به سطح آرام یا ساکن است.

دورهٔ تناوب (T) : مدت زمانی که هر ذرهٔ محیط یک نوسان کامل انجام می‌دهد *دورهٔ تناوب* موج نامیده می‌شود که برابر با زمانی است که چشمهٔ موج یک نوسان کامل انجام می‌دهد.

بسامد (f) : تعداد نوسان‌های انجام شده توسط هر ذرهٔ محیط در یک ثانیه *بسامد* موج نامیده می‌شود که برابر با بسامد چشمهٔ موج نیز هست. بنابراین $f=\frac{1}{T}$.

تندی انتشار موج (v) : اگر جبههٔ موج در مدت Δt مسافت L را طی کند، تندی انتشار موج از رابطهٔ $v=\frac{L}{\Delta t}$ به‌دست می‌آید. از آنجا که طول‌موج λ در دورهٔ T طی می‌شود، داریم :

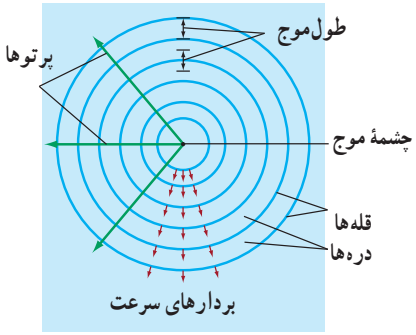
$$v=\frac{\lambda}{T}=\lambda f \qquad \text{(تندی انتشار موج)} \qquad (۳ـ۹)$$

تجربه و محاسبات نظری نشان می‌دهد که تندی انتشار موج به جنس و ویژگی‌های محیط انتشار بستگی دارد.

مثال ۳ــ۵

امواج دایره‌ای تشکیل شده بر سطح آب تشت موج شکل ۳ــ۱۶ را در نظر بگیرید. آزمایش نشان داده است اگر گوی متحرک با دورهٔ تناوب ۱/۰ s در تشتی به عمق ۲/۵ cm نوسان کند، فاصلهٔ بین دو برآمدگی مجاور ۵۰ cm و اگر در تشتی به عمق ۳/۵ cm نوسان کند، این فاصله ۶۰ cm می‌شود. تندی انتشار موج سطحی در این تشت در هر حالت چقدر است؟ از این محاسبه چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

پاسخ : فاصلهٔ دو برآمدگی مجاور، طول‌موج است و همان‌طور که پیش‌تر گفتیم دورهٔ تناوب موج برابر با دورهٔ تناوب نوسان‌های چشمهٔ موج است. تندی انتشار موج را با استفاده از رابطهٔ ۳ــ۹ به‌دست می‌آوریم.



با قرار دادن $\lambda_1 = 0/50\,m$ و $T = 1/0\,s$ در رابطهٔ ۳ــ۹ خواهیم داشت :

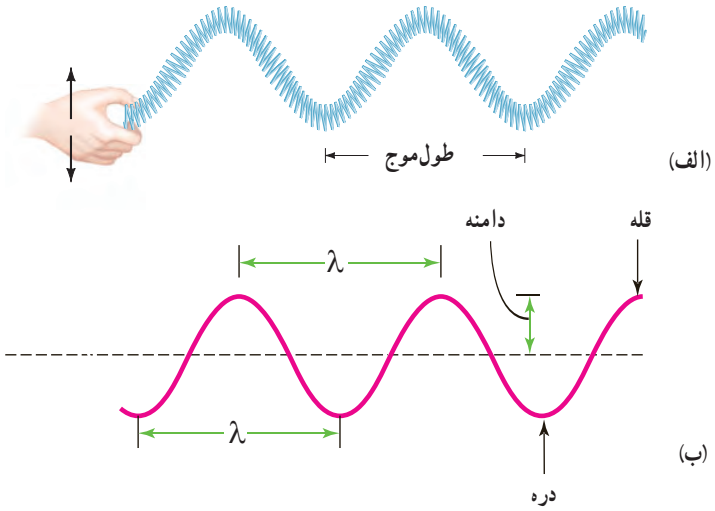
$$v_1 = \frac{\lambda_1}{T} = \frac{0/50\,m}{1/0\,s} = 0/50\,m/s$$

و با قرار دادن $\lambda_2 = 0/60\,m$ و $T = 1/0\,s$ در رابطهٔ ۳ــ۹ خواهیم داشت :

$$v_2 = \frac{\lambda_2}{T} = \frac{0/60\,m}{1/0\,s} = 0/60\,m/s$$

از اینجا درمی‌یابیم که تندی انتشار موج سطحی روی آب‌های کم‌عمق، به عمق آب که یکی از ویژگی‌های محیط انتشار موج است بستگی دارد.

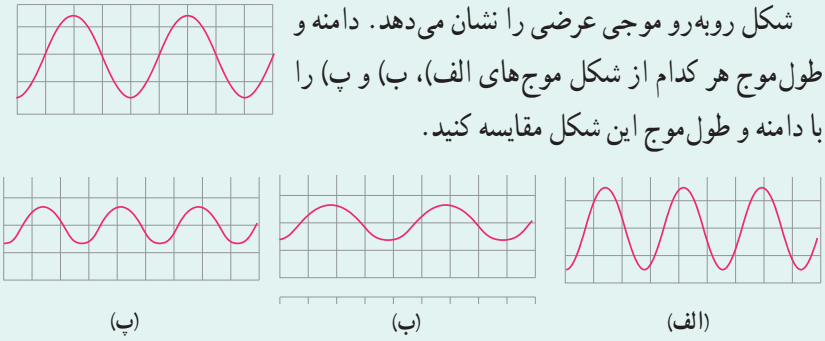
موج عرضی و مشخصه‌های آن : اگر یک سر فنر بلند کشیده‌شده‌ای را با حرکت هماهنگ ساده، پیاپی به بالا و پایین حرکت دهید موج عرضی پیوسته‌ای در طول فنر منتشر می‌شود (شکل ۳ــ۱۸ الف). امواج عرضی، همانند موج عرضی ایجاد شده در این فنر، در هر لحظه از زمانِ انتشار موج را می‌توان با شکل موجی سینوسی مانند شکل ۳ــ۱۸ ب مدل‌سازی کرد. در این شکل طول‌موج و دامنهٔ این موج عرضی، نیز نشان داده شده است.



شکل ۳ــ۱۸ الف) یک موج عرضی در فنر کشیده شده و ب) مدل سینوسی برای این موج

پرسش ۳ـ۴

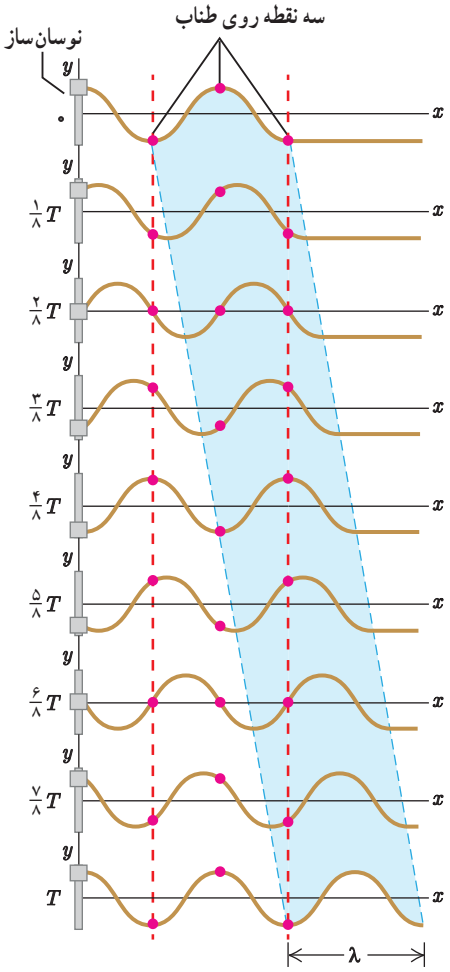
شکل روبه‌رو موجی عرضی را نشان می‌دهد. دامنه و طول‌موج هر کدام از شکل موج‌های الف)، ب) و پ) را با دامنه و طول‌موج این شکل مقایسه کنید.



شکل ۳ـ۱۹، نقش یک موج عرضی را در چند لحظهٔ متفاوت در مدت یک دورهٔ تناوب (T) نشان می‌دهد. در این مدت، هر ذره از محیط یک نوسان کامل انجام داده است و موج به اندازهٔ یک طول‌موج (λ) پیشروی کرده است. بنابراین تندی انتشار موج عرضی نیز از همان رابطهٔ ۳ـ۹ به‌دست می‌آید.

همان‌طور که پیش از این گفتیم تندی انتشار موج به جنس و ویژگی‌های محیط انتشار بستگی دارد. برای مثال، تندی انتشار موج عرضی در یک فنر، تار یا ریسمان کشیده به نیروی کشش (F) و چگالی خطی جرم ($\mu = m/L$) بستگی دارد و از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \qquad \text{(تندی انتشار موج عرضی در تار یا فنر)} \qquad (۳ـ۱۰)$$



شکل ۳ـ۱۹ نُه عکس لحظه‌ای از یک موج عرضی منتشر شده در یک تار کشیده شده

مثال ۳ـ۶

فنری به جرم ۰/۶۰kg و طول ۴/۰m را با نیروی ۱/۲N می‌کشیم. الف) تندی انتشار موج در این فنر چقدر است؟ ب) سر آزاد فنر را با چه بسامدی تکان دهیم تا طول موج ایجاد شده در فنر ۱/۰m شود؟

پاسخ : الف) با استفاده از رابطهٔ ۳ـ۱۰ تندی انتشار موج را به‌دست می‌آوریم. در اینجا $F = ۱/۲\text{N}$ است و چگالی خطی جرم برابر است با :

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{۰/۶۰\,\text{kg}}{۴/۰\,\text{m}} = ۰/۱۵\,\text{kg/m}$$

بنابراین تندی انتشار v چنین می‌شود :

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{۱/۲\,\text{N}}{۰/۱۵\,\text{kg/m}}} = ۲/۸۳\ \text{m/s} \simeq ۲/۸\text{m/s}$$

ب) با استفاده از رابطهٔ ۳ـ۹ بسامد f را به‌دست می‌آوریم :

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{۲/۸۳\,\text{m/s}}{۱/۰\,\text{m}} = ۲/۸۳\,\text{Hz} \simeq ۲/۸\,\text{Hz}$$

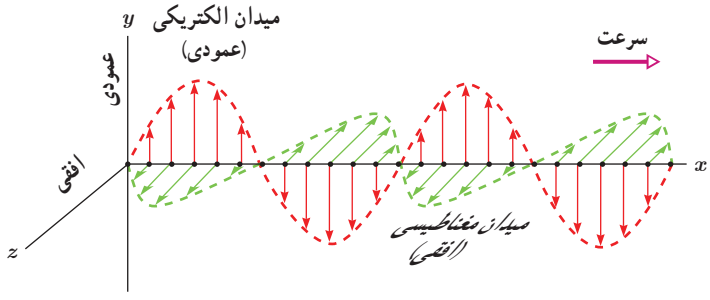
تمرین ۳ــ۴

در سازهای زهی همانند تار، کمانچه و گیتار با سفت یا شُل کردن تار، تندی انتشار موج عرضی در تار تغییر می‌کند. در یک گیتار طول هر تار بین دو انتهای ثابت ۰/۶۲۸m است. برای نواختن بالاترین بسامد، جرم تار ۰/۲۰۸g و برای نواختن پایین‌ترین بسامد، جرم تار ۳/۳۲g است. تارها تحت کششی برابر ۲۲۶N قرار دارند. تندی انتشار موج برای ایجاد این دو بسامد چقدر است؟

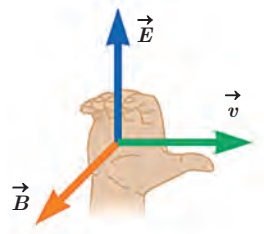
انتقال انرژی در موج عرضی : هر موجی حامل انرژی است. وقتی در یک ریسمان یا فنر کشیده موجی عرضی را ایجاد می‌کنیم، در واقع، انرژی را برای ایجاد موج در ریسمان فراهم کرده‌ایم. با انتشار موج، این انرژی به‌صورت انرژی جنبشی و پتانسیل در ریسمان انتقال می‌یابد. انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل لازم برای حرکت و کشیدگی هر جزء ریسمان یا فنر را شخصی تأمین می‌کند که سر ریسمان یا فنر را دائماً به نوسان درمی‌آورد. ثابت می‌شود مقدار متوسط آهنگ انتقال انرژی (توان متوسط) در یک موج سینوسی برای همهٔ انواع امواج مکانیکی با مربع دامنه (A^2) و نیز مربع بسامد (f^2) موج متناسب است.

جیمز کلارک ماکسول (۱۸۷۹ــ۱۸۳۱ م.)
در شهر ادینبورگ اسکاتلند زاده شد. جیمز در دوران دانش‌آموزی بسیار کنجکاو بود و به ساختن اسباب‌ها و دستگاه‌های فنّی خیلی علاقه داشت و پدرش هم او را به این کار تشویق می‌کرد. وی در دانشگاه‌های ادینبورگ و کمبریج تحصیل نمود. ماکسول قدرت شگرفی در تجزیه و تحلیل مسائل ریاضی داشت و با استفاده از روش‌های ریاضی توانست روی حلقه‌های سیارهٔ زحل و همچنین نظریهٔ جنبشی گازها مطالعات ارزنده‌ای انجام دهد. در سال ۱۸۶۵ کتاب معروف وی تحت عنوان «نظریهٔ دینامیکی میدان الکترومغناطیسی» به چاپ رسید و انتشار این کتاب کمک‌های فراوانی به علم و فناوری کرد و راه جدیدی را بر روی دستگاه‌هایی مانند رادیو، تلویزیون، رادار و غیره گشود که همگی بر اساس امواج الکترومغناطیس کار می‌کنند.

امواج الکترومغناطیسی : در کتاب فیزیک ۲ آموختیم که بار الکتریکی، میدان الکتریکی ایجاد می‌کند و جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی تولید می‌کند. اگر بارهای الکتریکی ساکن باشند، میدان الکتریکی حاصل از آنها با زمان تغییر نمی‌کند. به همین ترتیب اگر جریان الکتریکی ثابت باشد، میدان مغناطیسی حاصل از آن ثابت و بدون تغییر می‌شود. امواج الکترومغناطیسی از رابطهٔ متقابل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به‌وجود می‌آیند. یعنی هر تغییری در میدان الکتریکی در هر نقطه از فضا، میدان مغناطیسی متغیری ایجاد می‌کند و این میدان مغناطیسی متغیر، خود میدان الکتریکی متغیری به‌وجود می‌آورد. این رابطهٔ متقابل میدان‌ها سبب انتقالِ نوسان‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی از یک نقطهٔ فضا به نقاط دیگر و یا همان انتشار موج الکترومغناطیسی می‌شود. ایجاد میدان الکتریکی به علت تغییر میدان مغناطیسی همان القای الکترومغناطیسی است که در سال ۱۸۳۱ میلادی توسط مایکل فاراده به‌طور تجربی کشف شد و در کتاب فیزیک ۲ با آن آشنا شدید. پدیدهٔ معکوس این اثر، یعنی تولید میدان مغناطیسی بر اثر تغییر میدان الکتریکی بعدها توسط جیمز کلارک ماکسول، فیزیک‌دان انگلیسی، در سال ۱۸۶۵ میلادی پیش‌بینی شد. ماکسول از این دو پدیده نتیجه گرفت که امواج الکترومغناطیسی باید لزوماً ناشی از تغییرات هم‌زمانِ میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (اصطلاحاً میدان الکترومغناطیسی) باشد. شکل ۳ــ۲۰، یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در لحظه‌ای از زمان و در نقطه‌ای دور از چشمهٔ تولید موج نشان می‌دهد.



شکل ۳ــ۲۰ یک تصویر لحظه‌ای از موجی الکترومغناطیسی که میدان الکتریکی در امتداد قائم (y) و میدان مغناطیسی در امتداد افقی (z) و انتشار موج در جهت x است.



شکل ۳ــ۲۱ قاعدهٔ دست راست برای یافتن جهت انتشار موج الکترومغناطیسی

چند مشخصهٔ بارز چنین موجی به قرار زیر است :

۱ــ میدان الکتریکی $\vec{E}$ همواره عمود بر میدان مغناطیسی $\vec{B}$ است.

۲ــ میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی $\vec{E}$ و $\vec{B}$ همواره بر جهت حرکت موج عمودند و در نتیجه موج الکترومغناطیسی، یک موج عرضی است.

۳ــ میدان‌ها با بسامد یکسان و همگام با یکدیگر تغییر می‌کنند.

جهت انتشار امواج الکترومغناطیسی را می‌توان مطابق شکل ۳ــ۲۱ از قاعدهٔ دست راست تعیین کرد.

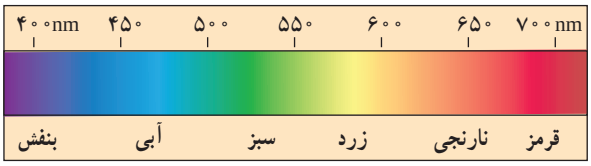
پرسش ۳ــ۵

در یک لحظهٔ خاص، میدان الکتریکی مربوط به یک موج الکترومغناطیسی در نقطه‌ای از فضا در جهت $z+$ و میدان مغناطیسی مربوط به آن در جهت $y+$ است. جهت انتشار در کدام سو است؟ (جهت‌های $x+$، $y+$ و $z+$ را مانند شکل ۳ــ۲۰ در نظر بگیرید.)

ماکسول با یک تحلیل ریاضی نشان داد که تندی انتشار امواج الکترومغناطیسی در خلأ از رابطهٔ $c=\frac{۱}{\sqrt{\mu_{۰}\varepsilon_{۰}}}$ به‌دست می‌آید، که در آن $\mu_{۰}$ تراوایی مغناطیسی خلأ و برابر $۴\pi\times۱۰^{-۷}\mathrm{T.m/A}$ و $\varepsilon_{۰}$ ضریب گذردهی الکتریکی خلأ و برابر $۸/۸۵\times۱۰^{-۱۲}\mathrm{C^{۲}/N.m^{۲}}$ است. مقدار c با استفاده از این رابطه $۳/۰۰\times۱۰^{۸}\mathrm{m/s}$ می‌شود که همان تندی انتشار نور در خلأ است که پیش‌تر توسط فیزیک‌دان فرانسوی آرماند لوئیس فیزو (۱۸۹۶ــ ۱۸۱۹م.) به روش تجربی به‌دست آمده بود. این نتیجه‌ای بسیار مهم بود، زیرا نشان می‌داد نور، یک موج الکترومغناطیسی است.

نظریهٔ ماکسول نیاز به تأیید تجربی داشت. هاینریش هرتز در سال ۱۸۸۸ میلادی با ایجاد نوسان‌های الکتریکی پُر بسامدی، آزمایش‌های مشهوری در تأیید نظریهٔ ماکسول انجام داد. هرتز نشان داد که امواج رادیویی نیز با همان تندی نور مرئی در آزمایشگاه حرکت می‌کنند و این حاکی از سرشت یکسان امواج رادیویی و نور مرئی بود.

مثال ۳ــ۷



گسترهٔ تقریبی طول‌موج نور مرئی در خلأ از ۴۰۰nm (نور بنفش) تا ۷۰۰nm (نور قرمز) است. گسترهٔ بسامد مربوط به نور مرئی را بر حسب هرتز تعیین کنید.

پاسخ : نور یک نوع موج است و برای آن می‌توان از رابطهٔ $v=f\lambda$ استفاده کرد. اما برای این موج v برابر با تندی نور ($c=۳/۰۰\times۱۰^{۸}\mathrm{m/s}$) است. بنابراین برای دو حد بالا و پایین بسامد طیف نور مرئی به‌ترتیب داریم :

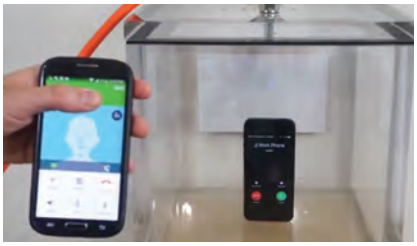
$$f_{\text{بنفش}}=\frac{c}{\lambda_{\text{بنفش}}}=\frac{۳/۰۰\times۱۰^{۸}\mathrm{m/s}}{۴۰۰\times۱۰^{-۹}\mathrm{m}}=۷/۵\times۱۰^{۱۴}\ \mathrm{Hz}$$

$$f_{\text{قرمز}}=\frac{c}{\lambda_{\text{قرمز}}}=\frac{۳/۰۰\times۱۰^{۸}\mathrm{m/s}}{۷۰۰\times۱۰^{-۹}\mathrm{m}}=۴/۳\times۱۰^{۱۴}\ \mathrm{Hz}$$

تمرین ۳ـ۵

طول آنتن یک گوشی تلفن همراه قدیمی معمولاً $\frac{۱}{۴}$ طول‌موج دریافتی است. اگر طول چنین آنتنی تقریباً برابر ۸/۵cm باشد بسامدی را که این گوشی با آن کار می‌کند تعیین کنید.

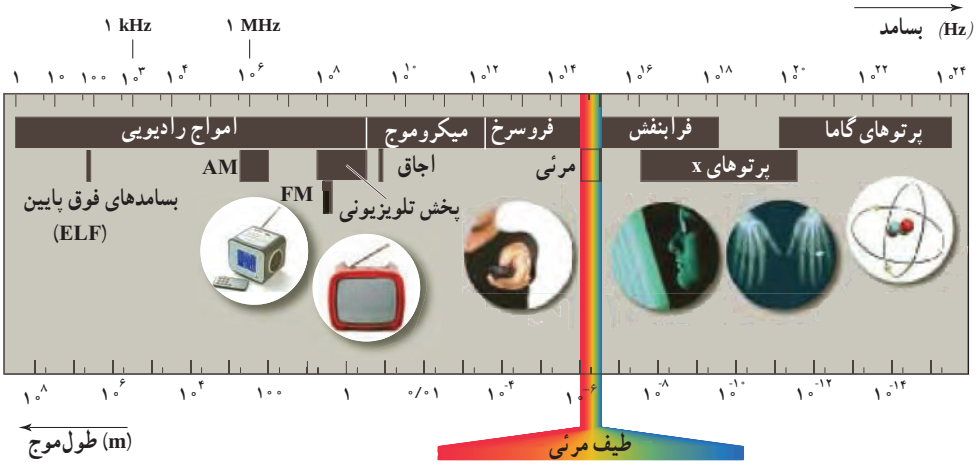
فعالیت ۳ـ۴



مطابق شکل روبه‌رو یک گوشی تلفن همراه را در یک محفظهٔ تخلیهٔ هوای شیشه‌ای آویزان کنید. با برقراری تماس با گوشی، صدای آن را خواهید شنید. ولی با به‌کار افتادن پمپ تخلیهٔ هوا، صدا به‌تدریج ضعیف و سرانجام خاموش می‌شود، در حالی‌که امواج الکترومغناطیسی همچنان به گوشی می‌رسند. از این آزمایش چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

همان‌طور که پیش‌تر گفتیم امواج مکانیکی برای انتشار به محیط مادی نیاز دارند. اما انتشار امواج الکترومغناطیسی به محیط مادی نیاز ندارد و این امواج، انرژی را نه به‌صورت انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل ذرات محیط، بلکه به‌صورت انرژی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی منتقل می‌کنند. مثلاً کل انرژی دریافتی از خورشید که باعث بقای زندگی روی کرهٔ زمین می‌شود از نوع امواج الکترومغناطیسی است. با اینکه خورشید در فاصلهٔ ۱۵۰ میلیون کیلومتری از زمین قرار دارد، توان امواج الکترومغناطیسی گسیل شده از خورشید که به سطح زمین می‌رسد، تقریباً ۱۰۰ میلیون گیگاوات است. جالب است که بدانید مرتبهٔ بزرگی توان تولیدی یک نیروگاه هسته‌ای، ۱ گیگاوات است.

طیف امواج الکترومغناطیسی: امروزه طیف وسیعی از امواج الکترومغناطیسی را می‌شناسیم. این طیف شامل امواج رادیویی، میکروموج، فروسرخ، طیف نور مرئی، فرابنفش، پرتوهای x و پرتوهای گاما است، که از کمترین بسامد تا بیشترین بسامد گسترده شده‌اند (شکل ۳ـ۲۲). تمام این امواج به‌رغم تفاوت فراوان در روش‌های تولید و کاربردهای آنها، امواجی الکترومغناطیسی هستند و همگی با تندی نور در خلأ حرکت می‌کنند و هیچ گسستگی‌ای در این طیف وجود ندارد.



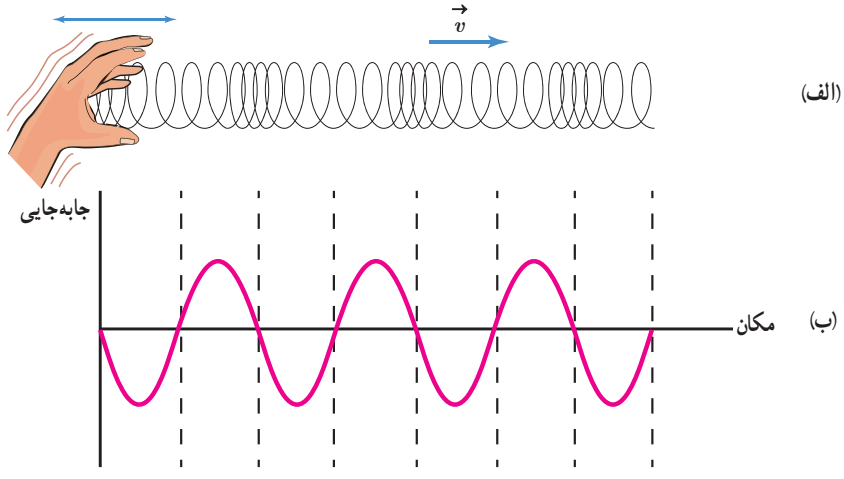
شکل ۳ـ۲۲ طیف امواج الکترومغناطیسی

فعالیت ۳ــ۵

در مورد نواحی اصلی طیف امواج الکترومغناطیسی، چگونگی تولید و کاربردهای آنها تحقیق کنید.

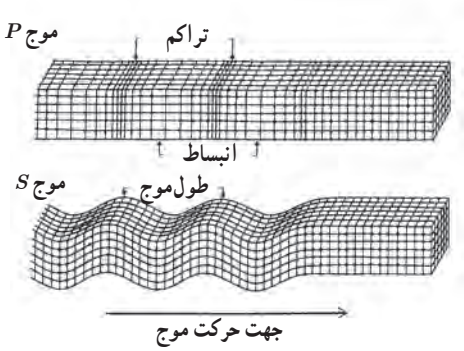
موج طولی و مشخصه‌های آن : در انتشار موج طولی در یک فنر بلندِ کشیده شده دیدیم که با انتشار موج، ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی به‌طور متناوب در طول فنر ظاهر می‌شوند. برای اینکه این موج را مدل‌سازی کنیم لازم است ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی را با دقت بیشتری مورد بررسی قرار دهیم. در یک لحظه از زمان، در مکان‌هایی که بیشترین جمع‌شدگی یا بیشترین بازشدگی حلقه‌ها رخ می‌دهد، جابه‌جایی هر جزء فنر از وضعیت تعادل برابر صفر است. در وسط فاصلهٔ بین یک جمع‌شدگی بیشینه و یک بازشدگی بیشینهٔ مجاورِ هم، اندازهٔ جابه‌جایی هر جزء فنر از وضعیت تعادل، بیشینه است. به این ترتیب می‌توان برای فنرِ شکل ۳ــ۲۳الف، نمودار جابه‌جایی ــ مکانِ شکل ۳ــ۲۳ ب را رسم کرد. با استفاده از چنین نموداری، برای یک موج طولی نیز می‌توانیم همان مشخصه‌های موج عرضی را تعریف کنیم؛ مثلاً در حالی که طول‌موج برای امواج عرضی برابر با فاصلهٔ دو قله یا دو درهٔ متوالی است، در مورد امواج طولی، طول‌موج برابر با فاصلهٔ بین دو تراکم (برای فنر، جمع‌شدگی) یا دو انبساط (برای فنر، بازشدگی) متوالی است. همچنین دامنهٔ موج طولی برابر با بیشینهٔ جابه‌جایی از مکان تعادل است.

در اینجا نیز همانند موج عرضی، هر جزء فنر در مدت یک دوره (T) یک نوسان کامل انجام می‌دهد و در این مدت موج به اندازهٔ یک طول‌موج (λ) پیشروی می‌کند. بنابراین تندی انتشار موج طولی نیز از همان رابطهٔ موج عرضی با طول‌موج و دورهٔ تناوب ($v=\lambda/T$) به‌دست می‌آید. البته این به این معنا نیست که در یک جسم تندی انتشار هر دو نوع موج برابر است. برای امواج مکانیکی، تندی انتشار امواج طولی در یک محیط جامد بیشتر از تندی انتشار امواج عرضی در همان محیط است.



شکل ۳ــ۲۳ الف) تصویری لحظه‌ای از ایجاد نواحی جمع‌شدگی و بازشدگی در طول یک فنر بلند کشیده، هنگام انتشار موج طولی سینوسی در فنر ب) نمودار جابه‌جایی ــ مکان برای موج ایجاد شده در فنر

مثال ۳ــ۸



امواج لرزه‌ای[1] موج‌های مکانیکی‌ای هستند که از لایه‌های زمین عبور می‌کنند. یکی از منشأهای مهم امواج لرزه‌ای، زمین‌لرزه‌ها هستند. دو نوع از امواج لرزه‌ای، امواج اولیهٔ P[2] و امواج ثانویهٔ S[3] هستند. امواج P، امواجی طولی و امواج S امواجی عرضی هستند. معمولاً تندی موج‌های P در حدود $8/0\,km/s$ و تندی موج‌های S در حدود $4/5\,km/s$ است. یک دستگاه لرزه‌نگار[4] موج‌های P و S حاصل از یک زمین‌لرزه را ثبت می‌کند. فرض کنید نخستین امواج P، $3/0$ دقیقه پیش از نخستین امواج S دریافت شوند. اگر این موج‌ها روی خط راستی حرکت کنند، زمین‌لرزه در چه فاصله‌ای از محل لرزه‌نگار رخ داده است؟

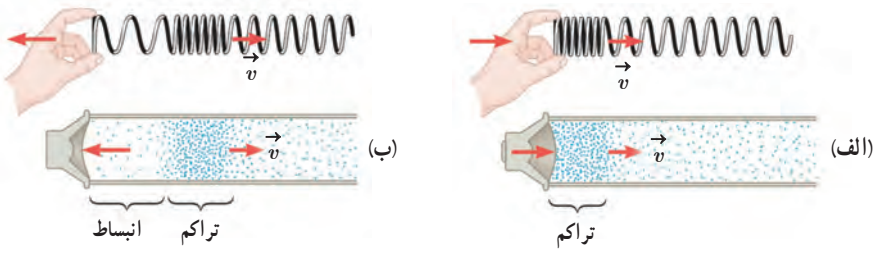
پاسخ : نخست با استفاده از رابطهٔ $\Delta x=v\Delta t$ که در فصل ۱ آموختیم، زمان پیمودن هر یک از دو موج را می‌یابیم. اگر تندی موج S را با v_s و تندی موج P را با v_P نشان دهیم، اختلاف زمان رسیدن این دو موج چنین می‌شود :

$$\Delta t=\frac{\Delta x}{v_s}-\frac{\Delta x}{v_P}=\frac{(v_P-v_s)\Delta x}{v_s v_P}$$

و از آنجا Δx را به‌دست می‌آوریم

$$\Delta x=\frac{v_s v_P}{v_P-v_s}\Delta t=\frac{(4/5\,km/s)(8/0\,km/s)}{(8/0\,km/s)-(4/5\,km/s)}(3/0\times 60\,s)=1/9\times 10^3\,km$$

موج صوتی : صوت یک موج طولی است که توسط جسمی مرتعش از قبیل سیم گیتار، تارهای صوتی حنجره انسان، دیاپازون، و یا پوسته‌های مرتعشی مانند صفحهٔ مرتعش (دیافراگم) یک بلندگو، تولید می‌شود، که اصطلاحاً به اینها *چشمهٔ صوت* گفته می‌شود. وقتی یک چشمهٔ صوت مرتعش می‌شود، معمولاً صوت ایجادشده در تمام جهت‌ها منتشر می‌شود. افزون بر این، صوت فقط در محیط‌های مادی مانند گاز، مایع، یا جامد می‌تواند ایجاد و منتشر شود. امواج صوتی به دلیل طبیعت طولی خود، مثل موج طولی ایجاد شده در یک فنر کشیده، در مقایسه با بازشدگی‌ها و جمع‌شدگی‌های فنر، از مجموعه‌ای از *تراکم‌ها* و *انبساط‌ها* تشکیل شده‌اند؛ مثلاً با ارتعاش دیافراگم یک بلندگو، موجی صوتی ایجاد می‌شود. حرکت رو به بیرون دیافراگم، هوای جلوی آن را متراکم می‌کند. این تراکم که با تندی صوت از بلندگو دور می‌شود مشابه ناحیهٔ جمع‌شدگی در یک فنرِ کشیده است که در آن موجی طولی روانه شده است (شکل ۳ــ۲۴ الف). پس از تولید یک ناحیهٔ متراکم، دیافراگم حرکتش



شکل ۳ــ۲۴ الف) با حرکت رو به بیرون دیافراگم، یک تراکم ایجاد می‌شود. ب) با حرکت رو به داخل دیافراگم، یک انبساط ایجاد می‌شود. این تراکم و انبساط شبیه به جمع‌شدگی و بازشدگی در یک فنر بلند است.

۱ــ Seismic Waves
۲ــ Primary Waves
۳ــ Secondary Waves
۴ــ Seismograph

را برعکس می‌کند و به سمت داخل می‌رود. حرکت رو به داخل دیافراگم، هوای جلوی آن را منبسط می‌کند. این انبساط که با تندی صوت از بلندگو دور می‌شود، مشابه ناحیهٔ بازشدگی در یک فنر کشیده است که در آن موجی طولی روانه شده است (شکل ۳ــ۲۴ ب). توجه کنید، درحالی‌که موج از بلندگو به شنونده می‌رسد، هر مولکول هوا، با موج حرکت نمی‌کند، بلکه در مکان ثابتی به جلو و عقب نوسان می‌کند (شکل ۳ــ۲۵).

شکل ۳ــ۲۵ در حالی که موج از بلندگو به سمت شنونده حرکت می‌کند، مولکول‌های هوا در جای خود نوسان می‌کنند.

پرسش ۳ــ۶

الف) چگونگی ایجاد صوت توسط دیاپازون را توضیح دهید.
ب) به نظر شما چه سازوکاری موجب صدای وزوزِ حشرات هنگام پرواز می‌شود؟

تندی انتشار صوت نیز مانند هر موج مکانیکی دیگری با رابطهٔ $v=f\lambda$ به بسامد و طول‌موج مربوط می‌شود و به ویژگی‌های فیزیکی محیط بستگی دارد.

اندازه‌گیری‌ها نشان داده است که عموماً صوت در جامدها سریع‌تر از مایع‌ها و در مایع‌ها سریع‌تر از گازها حرکت می‌کند، گرچه استثناهایی نیز وجود دارد. جدول ۳ــ۱ تندی صوت را در تعدادی از گازها، مایع‌ها و جامدها نشان می‌دهد. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تندی صوت افزون بر جنس محیط به دما نیز بستگی دارد و از این رو معمولاً تندی صوت در مواد، همراه با دمای متناظر آنها نوشته می‌شود.

جدول ۳ــ۱ تندی صوت در محیط‌های مختلف

محیط	تندی (m/s)
گازها*	
هوا (۰°C)	۳۳۱
هوا (۲۰°C)	۳۴۳
هلیم (۰°C)	۹۶۵
هیدروژن (۰°C)	۱۲۸۴
مایع‌ها	
متیل الکل (۲۵°C)	۱۱۴۳
آب (۰°C)	۱۴۰۲
آب (۲۰°C)	۱۴۸۲
آب دریا (۲۰°C و شوری ۳/۵٪)	۱۵۲۲
جامدها	
فولاد	۵۹۴۱
گرانیت	۶۰۰۰
آلومینیم	۶۲۲۰

* فشار همهٔ گازها ۱atm است.

فعالیت ۳ــ۶

اندازه‌گیری تندی صوت: یک روش ساده برای اندازه‌گیری تندی صوت به این ترتیب است: دو میکروفون را مطابق شکل به یک زمان‌سنج حساس[۱] متصل کنید. این زمان‌سنج می‌تواند بازه‌های زمانی را با دقت میلی‌ثانیه اندازه‌گیری کند. وقتی چکش را به صفحهٔ فلزی بکوبیم، امواج صوتی که به سمت دو میکروفون روانه می‌شوند، نخست میکروفون نزدیک‌تر و سپس میکروفون دورتر را متأثر می‌سازند. اختلاف فاصلهٔ میکروفون‌ها از محل برخورد چکش با صفحهٔ فلزی را اندازه می‌گیریم. با استفاده از زمان‌سنج می‌توانیم تأخیر زمانی بین دریافت صوت توسط دو میکروفون را ثبت کنیم. اکنون با استفاده از رابطهٔ $v=\Delta x/\Delta t$ می‌توانیم تندی صوت را در هوا بیابیم. درصورتی‌که این اسباب را در مدرسه دارید با استفاده از آن، تندی صوت را در هوا اندازه بگیرید.

۱ــ Fast timer

تمرین ۳ـ۶

شخصی با چکّش به انتهای میلهٔ باریک بلندی ضربه‌ای می‌زند. تندی صوت در این میله ۱۵ برابر تندی صوت در هوا است. شخص دیگری که گوش خود را نزدیک به انتهای دیگر میله گذاشته است، دو صدا را که یکی از میله می‌آید و دیگری از هوای اطراف میله، با اختلاف زمانی ۰/۱۲s می‌شنود. اگر تندی صوت در هوا ۳۴۰m/s باشد، طول میله چقدر است؟

تجربهٔ حس خوب

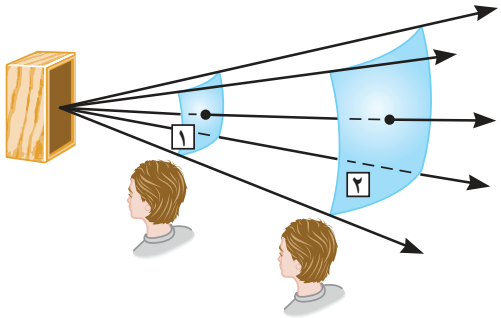
خطای شنوایی در زیر آب

سازوکاری که مغز برای تعیین جهت چشمهٔ صدا به‌کار می‌برد مبتنی بر تأخیر زمانی بین رسیدن صدا به گوش نزدیک‌تر به چشمه و گوشی است که دورتر از چشمه قرار دارد. مثلاً اگر چشمهٔ صدا مستقیماً در طرف راست شما باشد، تأخیر زمانی ۰/۰۰۰۵۸s است و تجربهٔ قبلی به درستی به شما می‌گوید که چشمه در سمت راست شما قرار دارد. ولی اگر شما و چشمهٔ صدا هر دو در آب فرو روید میزان تأخیر زمانی تنها $\frac{۱}{۴}$ تأخیر زمانی قبلی خواهد بود، زیرا تندی صوت در آب ۴ برابر تندی صوت در هوا است. پس صدا سریع‌تر از گوش نزدیک‌تر به گوش دیگر حرکت می‌کند. این تأخیر زمانی کوتاه‌تر و تجربهٔ قبلی شما این علامت اشتباه را می‌دهد که چشمه در زاویهٔ دیگری از جهت مقابل شما قرار دارد.

شدت و تراز شدت صوت: انتشار صوت از هر چشمهٔ صوتی همراه با انتقال پی‌درپی انرژی از ناحیه‌ای از محیط به ناحیه‌ای دیگر از آن است. در واقع چشمهٔ صوت، این انرژی را با به حرکت درآوردن لایه‌ای از محیط که در تماس مستقیم با چشمه است به محیط می‌دهد. انرژی از این لایه به لایهٔ بعدی و از آنجا به لایه‌های بعدتر منتقل و در تمام جهت‌ها منتشر می‌شود. شدت یک موج صوتی (I) در یک سطح، برابر با آهنگ متوسط انرژی‌ای است که توسط موج به واحد سطح، عمود بر راستای انتشار صوت می‌رسد یا از آن عبور می‌کند (شکل ۳ـ۲۶).

$$I = \frac{P_{av}}{A} \qquad \text{(شدت صوت)} \qquad (۳ـ۱۱)$$

که در آن P_{av} آهنگ متوسط انتقال انرژی و A مساحت سطحی است که صوت با آن برخورد می‌کند. بنابراین یکای شدت صوت، وات بر مترمربع (W/m^2) است.



شکل ۳ـ۲۶ با انتشار صوت از چشمه، انرژی به‌طور عمود، نخست از سطح ۱ و سپس از سطح ۲ که مساحت بیشتری دارد، می‌گذرد.

شدت صوت را می‌توان با یک آشکارساز اندازه گرفت. با اندازه‌گیری شدت صوت‌های مختلف درمی‌یابیم نسبت شدت‌های صوت در گسترهٔ شنوایی انسان می‌تواند در حدود 10^{12} باشد (جدول ۳ــ۲). برای بررسی چنین گسترهٔ وسیعی از شدت‌ها راحت‌تر آن است که از لگاریتم (در پایهٔ ۱۰) استفاده کنیم. یعنی به‌جای شدت I یک موج صوتی، ساده‌تر این است که از تراز شدت صوت (تراز صوتی) که به‌صورت زیر تعریف می‌شود استفاده کنیم :

$$\beta = (10\,\text{dB}) \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \qquad \text{(تراز شدت صوت)} \qquad (۳ــ۱۲)$$

که در آن dB مخفف دسی‌بل، یکای تراز شدت صوت است که به افتخار الکساندر گراهام بل (۱۹۲۲ــ۱۸۴۷ م.) انتخاب شده است. همچنین I_0 شدت مرجع ($1/00\times10^{-12}\,\text{W/m}^2$) به این دلیل انتخاب شده است که نزدیک به حد پایین گسترهٔ شنیداری انسان است. یک موج صوتی با شدت $I=I_0$ تراز شدت صوتی برابر ۰dB دارد. جدول ۳ــ۲، شدت‌ها و ترازهای شدت صوت را برای چند صدای متفاوت داده است.

جدول ۳ــ۲ شدت و تراز شدت صوت برای چند صدای متفاوت

صوت	شدت صوت (W/m^2)	تراز شدت صوت (dB)
نفس کشیدن در فاصلهٔ ۳m	10^{-11}	۱۰
پچ‌پچ در فاصلهٔ ۱m	10^{-10}	۲۰
کتابخانه	10^{-9}	۳۰
خیابان بی‌سروصدا	10^{-8}	۴۰
رستوران ساکت	10^{-7}	۵۰
صحبت معمولی در فاصلهٔ ۱m	10^{-6}	۶۰
خیابان پر سروصدا	10^{-5}	۷۰
در نزدیکی جاروبرقی	10^{-4}	۸۰
قطار در عبور از یک تقاطع	10^{-3}	۹۰
کارگاه ماشین‌آلات پر سروصدا	10^{-2}	۱۰۰
دستگاه پخش صوت در بیشترین صدای خود	10^{-1}	۱۱۰
متهٔ سنگ‌شکن	10^{0}	۱۲۰
موتور جت در فاصلهٔ ۳۰m	10^{1}	۱۳۰

مثال ۳ــ۹

تراز شدت صوت یک مخلوط‌کن ۸۰dB است. شدت این صدا چقدر است؟

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۳ــ۱۲ داریم :

$$\beta = (10\,\text{dB}) \log (I/I_0)$$

$$80\,\text{dB} = (10\,\text{dB}) \log (I/I_0)$$

$$\log (I/I_0) = 8/0$$

$$(I/I_0) = 10^{8/0} \Rightarrow I = 10^{8/0}(1/00\times10^{-12}\,\text{W/m}^2) = 1/00\times10^{-4}\,\text{W/m}^2$$

تمرین ۳ــ۷

با زیاد کردن صدای تلویزیونی، شدت صوتی که به گوش ما می‌رسد ۱۰۰ برابر می‌شود. تراز شدت صوتی که می‌شنویم چند دسی‌بل افزایش یافته است؟

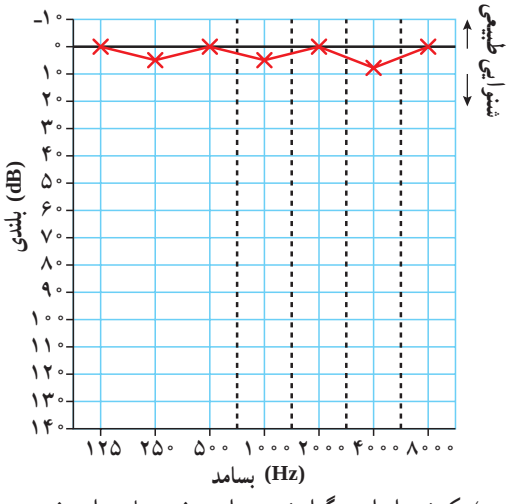
ادراک شنوایی : وقتی دیاپازونی را با ضربه‌ای به ارتعاش وامی‌داریم، دیاپازون نوسان‌هایی انجام می‌دهد که به دلیل میرایی کم، به حرکت هماهنگ ساده نزدیک است. به صوت حاصل از چنین چشمه‌هایی

تُنِ موسیقی یا به‌اختصار *تُن*[۱] گفته می‌شود. با شنیدن هر تُن، دو ویژگی را می‌توان از هم متمایز ساخت: ارتفاع[۲] و بلندی[۳] آن. ارتفاع و بلندی هر دو به ادراک شنوایی ما مربوط می‌شوند. ارتفاع، بسامدی است که گوش انسان درک می‌کند؛ مثلاً اگر چند دیاپازون با بسامدهای مختلف به‌طور یکسان نواخته شوند بسامد آنها را می‌توان از کمترین تا بیشترین مقدار تشخیص داد. اما بلندی، شدتی است که گوش انسان از صوت درک می‌کند. اگر یک دیاپازون با بسامد مشخص را با ضربه‌هایی متفاوت به ارتعاش وادارایم، با آنکه بسامد صدایی که می‌شنویم تغییر نمی‌کند، اما صداهایی با بلندی متفاوت را حس می‌کنیم که این به شدت ضربه‌ها بستگی دارد. بلندی متفاوت با شدت است. شدت را می‌توان با یک آشکارساز اندازه گرفت، در حالی که بلندی چیزی است که شما حس می‌کنید. دستگاه شنوایی انسان به بسامدهای متفاوت حساسیت‌های متفاوتی نشان می‌دهد، به‌طوری که بیشترین حساسیت گوش انسان به بسامدهایی در گسترهٔ ۲۰۰۰Hz تا ۵۰۰۰Hz است، در حالی که گوش انسان قادر به شنیدن تُن‌های صدای ۲۰Hz تا ۲۰,۰۰۰Hz است.

شنوایی‌سنجی و اودیوگرام

همان‌طور که گفتیم گوش به تمام بسامدها به‌طور یکسانی حساس نیست و بنابراین برای آزمودن شنوایی یک شخص، گستره‌ای از بسامدهای مختلف استفاده می‌شود. در حین یک آزمون شنوایی‌سنجی صداهایی با بسامدهای ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ هرتز در گوش ایجاد می‌شود (شکل الف). هر بسامد با شدت پایینی شروع می‌شود، به‌طوری که شخص ابتدا نمی‌تواند آن را بشنود. سپس شدت به‌تدریج زیاد می‌شود تا اینکه بالاخره شخص بتواند صدا را بشنود. بلندی مربوط به این صدا که اصطلاحاً *آستانهٔ شنوایی* در بسامد آزمون گفته می‌شود، ثبت می‌گردد. سپس نتایج روی نمودار بلندی (برحسب dB) در برابر بسامد رسم می‌شود. به نمودار حاصل *اودیوگرام* می‌گویند (شکل ب). اگر نتایج حاصل در محدودهٔ مشخصی قرار گیرد که به عنوان شنوایی طبیعی تعیین شده است، شنوایی شخص طبیعی محسوب می‌شود. البته افزون بر آستانهٔ شنوایی، *آستانهٔ دردناکی* نیز برای هر بسامد تعریف می‌شود که بیشینهٔ بلندی صدایی است که در آن بسامد بدون آزار شنوایی، قابل شنیدن است. آستانهٔ دردناکی برخلاف آستانهٔ شنوایی چندان به بسامد آزمایش حساس نیست.

الف) شخصی در حین آزمون شنوایی‌سنجی



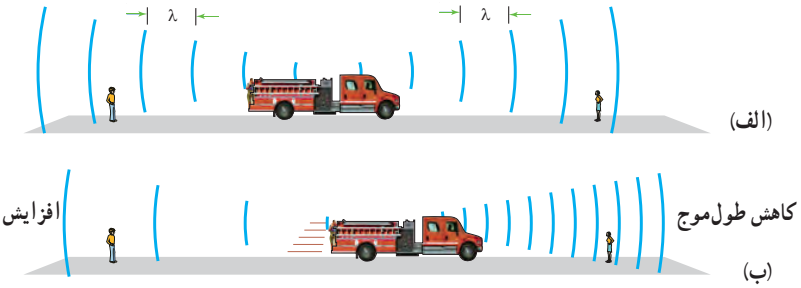
ب) یک نمودار اودیوگرام نوعی برای شخصی با شنوایی خوب

خوب است بدانید

۱ــ Tone ۲ــ Pitch ۳ــ Loudness

اثر دوپلر : فرض کنید یک ماشین آتش‌نشانی در حالی که آژیر آن روشن است در کنار خودروی شما متوقف باشد. شما همان بسامدی را از آژیر می‌شنوید که رانندهٔ ماشین آتش‌نشانی می‌شنود. ولی اگر خودروی شما به ماشین آتش‌نشانی نزدیک و یا از آن دور شود، بسامدهای متفاوتی را خواهید شنید. همچنین اگر خودروی شما ساکن باشد و ماشین آتش‌نشانی به شما نزدیک و سپس از شما دور شود باز هم بسامدهای متفاوتی را خواهید شنید. اینها مثال‌هایی از اثر دوپلر است که به افتخار کاشف آن یوهان کریستین دوپلر (۱۸۵۳ــ۱۸۰۳ م.) فیزیک‌دان اتریشی، نام‌گذاری شده است. اثر دوپلر نه‌تنها برای امواج صوتی بلکه برای امواج الکترومغناطیسی، مانند میکروموج‌ها، موج‌های رادیویی و نور مرئی نیز برقرار است. ما در اینجا نخست امواج صوتی را در نظر می‌گیریم و به‌عنوان دو حالت خاص، وضعیت‌هایی را بررسی می‌کنیم که در آنها چشمهٔ صوتی به شنوندهٔ ساکن نزدیک و یا از او دور شود، و یا شنونده به چشمهٔ صوتی ساکن نزدیک و یا از او دور شود[۱].

الف) چشمهٔ متحرک و ناظر (شنوندهٔ) ساکن : شکل ۳ــ۲۷ الف، جبهه‌های موج حاصل از صدای آژیر یک ماشین آتش‌نشانی ساکن را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود فاصلهٔ این جبهه‌ها از هم، در جلو و عقب ماشین یکسان است، ولی اگر ماشین آتش‌نشانی مثلاً به جلو حرکت کند، فاصلهٔ جبهه‌های موج در جلوی ماشین کمتر از پشت آن خواهد بود (شکل ۳ــ۲۷ ب). بنابراین اگر ناظر ساکنی را روبه‌روی ماشین در نظر بگیریم، این ناظر طول‌موج کوتاه‌تری را نسبت به وضعیتی که ماشین ساکن بود اندازه می‌گیرد، که این به معنی افزایش بسامد برای این ناظر است. در حالی که ناظر ساکن عقب ماشین طول‌موج بلندتری را نسبت به وضعیتی که ماشین ساکن بود اندازه می‌گیرد، که این به معنی کاهش بسامد برای این ناظر است.



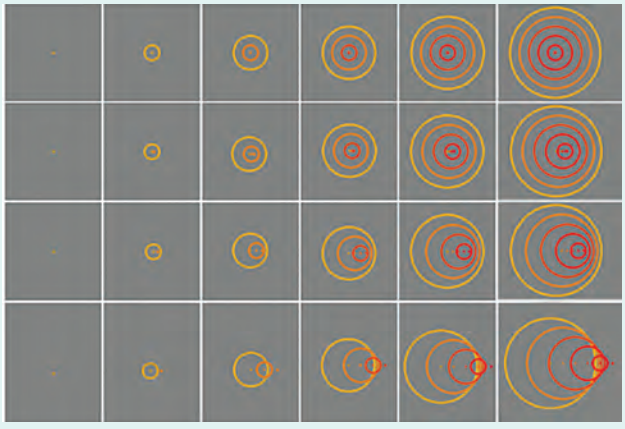
شکل ۳ــ۲۷ الف) وقتی ماشین ساکن است تجمع جبهه‌های موج در جلو و عقب ماشین یکسان است. ب) با حرکت رو به جلوی ماشین، تجمع جبهه‌های موج در جلوی ماشین بیشتر و در عقب آن کمتر می‌شود.

پرسش ۳ــ۷

در هر ردیف شکل روبه‌رو، جبهه‌های موج متوالی حاصل از یک چشمه را می‌بینید.

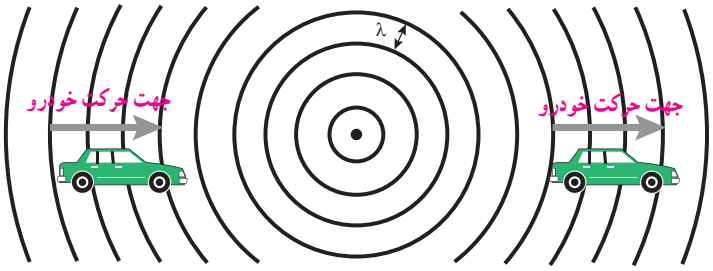
الف) تندی چشمه‌ها را با هم مقایسه کنید.

ب) تندی هر چشمه را با تندی صوت مقایسه کنید.



۱ــ روابط و محاسبات مربوط به اثر دوپلر خارج از برنامهٔ درسی است و نباید در ارزشیابی لحاظ شود.

ب) چشمهٔ ساکن و ناظر (شنوندهٔ) متحرک : در این حالت تجمع جبهه‌های موج در دو سوی چشمه یکسان است. اگر ناظر به طرف چشمه حرکت کند، در مقایسه با ناظر ساکن، در مدت زمان یکسان، با جبهه‌های موج بیشتری مواجه می‌شود که این منجر به افزایش بسامد صوتی می‌شود که ناظر می‌شنود. در حالی‌که اگر ناظر از چشمه دور شود، در مقایسه با ناظر ساکن، در مدت زمان یکسان، با جبهه‌های موج کمتری مواجه می‌شود که این منجر به کاهش بسامد صوتی می‌شود که ناظر می‌شنود (شکل ۳ــ۲۸).



شکل ۳ــ۲۸ در مدت زمان یکسان خودرویی که به چشمهٔ ساکن صوت نزدیک می‌شود با جبهه‌های موج بیشتری برخورد می‌کند، در حالی که خودرویی که از این چشمه دور می‌شود با جبهه‌های موج کمتری برخورد می‌کند.

۳ــ۷ بازتاب موج

تولید صدا در آلات موسیقی، پژواک صداها، دیدن ماه، دیدن صفحهٔ این کتاب، گرم شدن مواد غذایی در اجاق‌های خورشیدی، جمع شدن امواج رادیویی در کانون آنتن‌های بشقابی و... مثال‌هایی از کاربرد بازتاب امواج در زندگی هستند. برخی از جانداران نظیر خفاش از همین ویژگی برای یافتن مسیر خود یا طعمه استفاده می‌کنند (شکل ۳ــ۲۹). امواج الکترومغناطیسی (از جمله نور) نیز بازمی‌تابند. در واقع همان‌طور که در علوم هشتم آموختیم، وقتی نور بازتابیده از جسمی به چشم ما برسد، آن جسم را می‌بینیم. در این بخش، نخست بازتاب امواج مکانیکی و سپس بازتاب امواج الکترومغناطیسی را بررسی می‌کنیم.

شکل ۳ـ۲۹ خفاش برای یافتن طعمه از پژواک موج صوتی خود استفاده می‌کند.