فصل سوم

نوسان و موج

۳ـ۱ـ نوسان دوره‌ای
۳ـ۲ـ حرکت هماهنگ ساده
۳ـ۳ـ انرژی در حرکت هماهنگ ساده
۳ـ۴ـ تشدید
۳ـ۵ـ موج و انواع آن
۳ـ۶ـ مشخصه‌های موج
راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳

پیامدها

دانش‌آموزان با درک مفاهیم این فصل :

- حرکت هماهنگ ساده را به‌عنوان قسمی از نوسان‌های دوره‌ای می‌شناسند و به تحلیل آن می‌پردازند.
- با استفاده از پایستگی انرژی مکانیکی به درکی از تبدیل انرژی‌های جنبشی و پتانسیل برای هر گونه نوسانگر هماهنگ ساده می‌رسند.
- با پدیدهٔ تشدید و آثار آن آشنا می‌شوند.
- با دسته‌بندی امواج و انواع موج آشنا می‌شوند.
- مشخصه‌های موج را می‌شناسند و می‌توانند آنها را برای موج‌های عرضی و طولی تبیین کنند.
- امواج الکترومغناطیسی، چگونگی تولید، مشخصه‌ها و طیف آن را می‌شناسند.
- موج صوتی را می‌شناسند و می‌توانند تحلیلی از چگونگی ایجاد آن ارائه کنند.
- با شدت تراز صوت و ادراک شنوایی آشنا می‌شوند.
- اثر دوپلر را می‌شناسند و بسته به حرکت چشمهٔ صوتی یا ناظر می‌توانند آن را تحلیل کنند.

چه شناختی مطلوب است؟

- نوسان‌ها می‌توانند دوره‌ای یا غیر دوره‌ای باشند.
- حرکت هماهنگ ساده نمونه‌ای از حرکت دوره‌ای است.
- انرژی مکانیکی هر نوسانگر هماهنگ ساده با مربع دامنه و مربع بسامد نوسان نوسانگر متناسب است.
- هرجسم بسامدی طبیعی دارد که اگر با همان بسامد به نوسان واداشته شود، دامنهٔ نوسان‌های آن بیشینه می‌شود و اصطلاحاً برای آن تشدید رخ می‌دهد.
- در مورد موج‌های پیش‌رونده، این موج است که حرکت می‌کند، نه ماده‌ای که موج در آن حرکت می‌کند.
- هر موج با مشخصه‌های آن که عبارت‌اند از طول موج، دامنه، دورهٔ تناوب، بسامد، و تندی انتشار موج مشخص می‌شود.
- تندی انتشار موج به جنس و ویژگی‌های محیط انتشار بستگی دارد.
- هر موج حامل انرژی است و در هنگام انتشار، انرژی را انتقال می‌دهد.
- امواج الکترومغناطیسی باید لزوماً ناشی از تغییرات هم‌زمان میدان الکتریکی و مغناطیسی باشند.
- امواج مکانیکی برای انتشار به محیط مادی نیاز دارند، اما انتشار امواج الکترومغناطیسی نیازی به محیط مادی ندارد و این امواج انرژی را نه به‌صورت انرژی جنبشی و پتانسیل، بلکه به‌صورت انرژی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی منتقل می‌کنند.
- تندی انتشار امواج طولی در یک محیط جامد بیشتر از تندی انتشار امواج عرضی در همان محیط است.

- موج صوتی یک موج طولی است که از مجموعه‌ای از تراکم‌ها و انبساط‌ها تشکیل شده است.
- چون نسبت شدت‌های صوت در گسترهٔ شنوایی انسان وسیع است، راحت‌تر آن است که از لگاریتم (در پایهٔ ۱۰) استفاده کنیم.
- ارتفاع و بلندی دو ویژگی تُن موسیقی است که به ادراک شنوایی‌ها مربوط است.
- بسته به حرکت چشمهٔ صوتی یا ناظر، بسامدی که ناظر می‌شنود، نسبت به حالتی که چشمه و ناظر ساکن‌اند تغییر می‌کند.

چه پرسش‌هایی اساسی است و باید درنظر گرفته شود؟

- حرکت هماهنگ ساده چیست و چه اهمیتی دارد؟
- انرژی در حرکت هماهنگ ساده چیست و به چه عواملی بستگی دارد؟
- نوسان طبیعی چیست و در چه شرایطی تشدید رخ می‌دهد؟
- موج چیست و چه ارتباطی به نوسان دارد؟
- موج‌های عرضی و طولی چگونه به‌وجود می‌آیند؟
- یک موج را با چه مشخصه‌هایی می‌توان تمیز داد؟
- تندی انتشار موج به چه عواملی بستگی دارد؟
- امواج الکترومغناطیسی چگونه به‌وجود می‌آیند و مشخصه‌های آنها چیست؟
- موج صوتی چگونه ایجاد می‌شود؟
- چرا تراز شدت صوت معرفی می‌شود؟
- ادراک شنوایی چیست و به چه عواملی مربوط است؟
- چرا با حرکت چشمهٔ صوتی یا حرکت ناظر نسبت به یک چشمهٔ صوتی، بسامد صدایی که دریافت می‌کنیم تغییر پیدا می‌کند؟

در پایان این واحد یادگیری دانش آموزان چه دانش و مهارت‌های اساسی را کسب می‌کنند؟

الف) دانشی

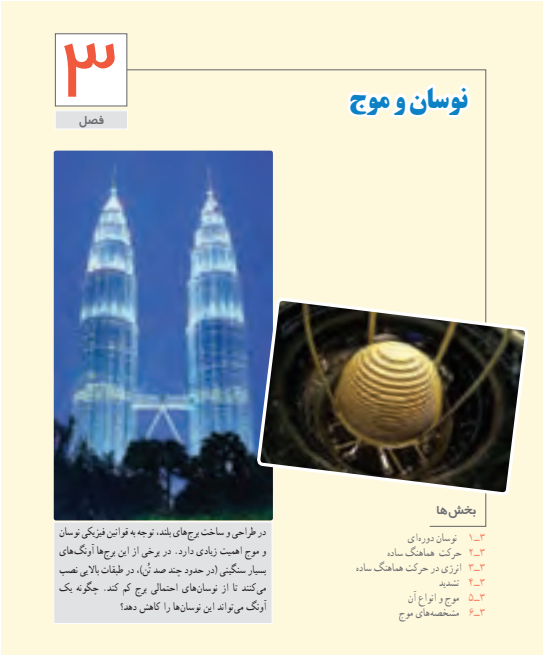
با مفاهیم نوسان دوره‌ای، حرکت هماهنگ ساده، بسامد زاویه‌ای، دورهٔ تناوب جرم ــ فنر و آونگ، انرژی در حرکت هماهنگ ساده، بسامد طبیعی و تشدید، موج و انواع آن، موج‌های پیش‌رونده، مشخصه‌های موج، موج‌های الکترومغناطیسی و صوتی، شدت و تراز شدت صوت، ارتفاع و بلندی صوت و اثر دوپلر آشنا می‌شوند.

ب) مهارتی

پدیده‌های نوسانی دنیای اطراف خود را براساس مفاهیم این فصل می‌تواند توجیه کند. با استفاده از معادلهٔ مکان ــ زمان در حرکت هماهنگ ساده می‌تواند به توصیف حرکت هماهنگ ساده بپردازد. با نوسان‌نگار آشنا می‌شود و می‌تواند از آن برای ثبت نوسان ها استفاده کند. با سامانهٔ جرم ــ فنر و آونگ ساده آشنا می‌شود و می‌تواند دورهٔ تناوب نوسان آنها را به‌دست آورد. می‌تواند به توجیه حوادث ناشی از زمین‌لرزه‌ها بپردازد و مثال‌هایی از تشدید در زندگی خود ارائه کند. با استفاده از دستگاه تشت موج و اهمیت استفاده از آن در پدیده‌های موجی آشنا می‌شود. می‌تواند تندی انتشار موج عرضی در تار یا فنر را محاسبه کند. با کاربرد مفاهیم موج در ابزار آلات موسیقایی آشنا می‌شود. با طیف امواج الکترومغناطیسی و کاربردهایشان آشنا می‌شود. می‌تواند تندی صوت را اندازه‌گیری کند. می‌تواند اساس کار صفحه‌های مرتعش، دیاپازن و ... را توضیح دهد و به توجیه کار آنها بپردازد. می‌تواند تراز شدت‌های صوت صداهای اطراف خود را محاسبه کند. گسترهٔ شنوایی خود را می‌شناسد و می‌تواند تغییر بسامدی را که از صدای چشمه‌های صوتی متحرک درک می‌کند توجیه کند.

بودجه‌بندی پیشنهادی

بنا به صلاحدید مدرس می‌توان ۱۴ جلسهٔ ۹۰ دقیقه‌ای به آموزش این فصل اختصاص داد.



آونگ نقش میراگرِ نوسان را بازی می‌کند و با نوسان ناهمگام با نوسان ساختمان موجب تضعیف آن می‌شود. مثال‌هایی از این دست فراوانند. یک نمونه برج *هینکاک*[1] در بوستون آمریکا به طول ۲۴۱ متر است که جرم آونگ به‌کار رفته در آن ۳۰۰,۰۰۰ کیلوگرم است. همچنین برجی در چین *تایپه* به طول ۵۰۸ متر، آونگی به جرم ۶۸۰,۰۰۰ کیلوگرم دارد. ولی میراگرها می‌توانند غیر از آونگ هم باشند. مثلاً تصویر اول فصل ۳ رشتهٔ ریاضی فیزیک مربوط به برج *پتروناس*[2] در مالزی است که در آن پلی هوایی به طول ۵۸/۴m و جرم ۷۵۰ تن که به دو ساق تکیه‌گاه متصل‌اند نقش میراگر نوسان را بازی می‌کنند. یک نوع دیگر میراگرها یک وسیلهٔ جرم ــ فنر است. یک انتهای فنر به سقف متصل شده است. و انتهای دیگر آن به جرمی که می‌تواند در مسیری موازی با فنر حرکت کند. بسامدی که جسم به‌طور طبیعی در انتهای فنر نوسان می‌کند طوری تنظیم می‌شود که با بسامد طبیعی ساختمان برابر باشد. آنگاه وقتی ساختمان تاب بخورد، فنر کشیده می‌شود و موجب نوسان جسم با همان بسامد می‌شود. ولی نوسان جسم از نوسان ساختمان عقب‌تر است و به عبارتی این دو نوسان **کاملاً** ناهمگام هستند. برای مثال، وقتی ساختمان به چپ تاب می‌خورد، جرم به سمت راست نوسان می‌کند و بدین ترتیب اثر تاب خوردن را خنثی می‌کند. برخی ساختمان‌ها هم یک نوسانگر آبی دارند که در آنها آب از طرفی به طرف دیگر به طور ناهمگام با ساختمان نوسان می‌کنند.

فیلم

در این فیلم یک نمونهٔ آزمایشی میراگر را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم میراگرهای نسل سوم سازه‌ها را مشاهده می‌کنید.

۱ــ Hancock tower

۲ــPetronas tiwer

در اینجا حتماً اشاره شود که در نوسان دوره‌ای، نقش‌ها **دقیقاً** تکرار می‌شوند. بنابراین مواردی مثل جزر و مدها، حرکت کشتی روی امواج دریا و کلیهٔ حرکت‌های میرا، حرکت غیردوره‌ای محسوب می‌شوند، زیرا تفاوت دوره‌های متوالی محسوس است.

فیزیک ۳

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 ۳ـ۱). 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.

۳ـ۱ نوسان دوره‌ای

نوسان‌ها می‌توانند دوره‌ای یا غیردوره‌ای باشند؛ مثلاً شکل ۳ـ۲ تصویری از ضرباهنگ (ریتم) قلب یک شخص را نشان می‌دهد که در هر دقیقه ۶۵ بار می‌زند. نقش‌های این تصویر به‌طور منظم تکرار می‌شوند، که به آن چرخهٔ (سیکل) نوسان گفته می‌شود. چنین نوسان‌هایی را که هر چرخهٔ آن در دوره‌های 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 $\frac{1}{65}$ دقیقه، یا ۰/۹۲ ثانیه است.

شکل ۳ـ۱ (الف) ضربان قلب انسان، (ب) تاب خوردن، (پ) بالا و پایین رفتن سرنشینان کشتی، (ت) زمین‌لرزه، نمونه‌هایی از نوسان هستند.

شکل ۳ـ۲ نمونه‌ای از نمودار الکترو قلب نگار[1] (نوار قلب) یک شخص[2]

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

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{(بسامد)} \qquad (۳ـ۱)$$

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

$$1\ \text{Hz} = 1\ \text{s}^{-1} = \text{۱ چرخه بر ثانیه}$$

پرسش ۳ـ۱

بسامد ضربان قلب مربوط به نمودار شکل ۳ـ۲ چقدر است؟

۱ـ Electrocardiogram (ECG)

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

۶۲

پاسخ پرسش ۳ـ۱

همان‌طور که در متن کتاب آمده، نمودار الکتروکاردیوگرام نشان داده شده در شکل ۳ـ۲ مربوط به ضربان قلبی با دورهٔ تناوب ۰/۹۲s است. بنابراین برای بسامد داریم:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0/92\text{s}} = 1/09\ \text{Hz} \approx 1/1\text{Hz}$$

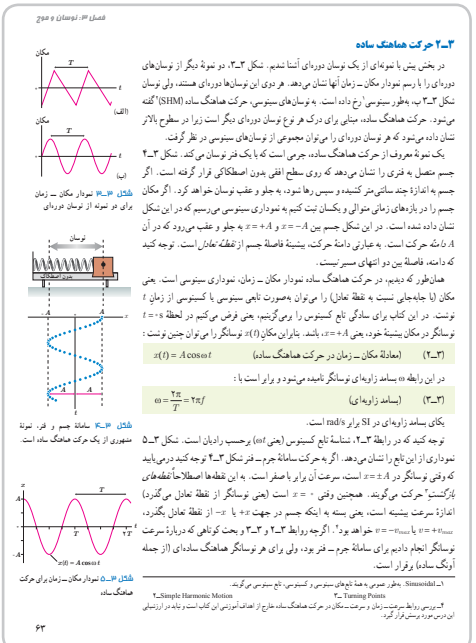
پرسش پیشنهادی

۱ آیا تکان‌خوردن شاخه‌های درخت در باد و یا حرکت آونگ در یک شاره، دوره‌ای هستند یا خیر؟

پاسخ: هیچ‌کدام دوره‌ای نیستند، زیرا حرکتی دوره‌ای است که هر دور آن در دورهای دیگر دقیقاً تکرار می‌شود. در این موارد، هر دور دقیقاً تکرار نمی‌شود. مثلاً وقتی گلولهٔ آونگ در آب قرار گیرد، آب موجب میرایی نوسان‌ها می‌شود و دامنهٔ نوسان‌ها کاهش می‌یابد.

توجه کنید که تعمدی در جداسازی مبحث حرکت هماهنگ ساده از نوسان دوره‌ای بوده است. این ممکن است خطایی رایج باشد، و بنابراین در تدریس این مبحث به این تفاوت حتماً اشاره شود. به عبارتی هر حرکت هماهنگ نوسانی ساده‌ای دوره‌ای هست ولی هر حرکت دوره‌ای، نوسان ساده نیست.

قضیه‌ای به نام قضیهٔ فوریه حاکی از آن است که هر نوسان دوره‌ای مجموعی از نوسان‌های هماهنگ است و به جای یک بسامد تنها، با دسته بسامدهای f، $2f$، $3f$، و . . . (یعنی مضرب‌هایی از پایین‌ترین بسامد f) مشخص می‌شوند.



فصل ۳: نوسان و موج

۳ـ۲ حرکت هماهنگ ساده

در بخش پیش با نمونه‌ای از یک نوسان دوره‌ای آشنا شدیم. شکل ۳ـ۳، 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 ۳ـ۳ب، به‌طور سینوسی[1] رخ داده است. به نوسان‌های سینوسی، حرکت هماهنگ ساده (SHM)[2] 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.

یک نمونهٔ معروف از حرکت هماهنگ ساده، جرمی است که با یک فنر نوسان می‌کند. شکل ۳ـ۴ 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.

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 زمان t نوشت. در این کتاب برای سادگی تابع کسینوس را برمی‌گزینیم، یعنی فرض می‌کنیم در لحظهٔ $t = 0\text{s}$ نوسانگر در مکان بیشینهٔ خود، یعنی $x = +A$، باشد. بنابراین مکان $x(t)$ نوسانگر را می‌توان چنین نوشت:

$$x(t) = A\cos\omega t \quad \text{(معادلهٔ مکان ــ زمان در حرکت هماهنگ ساده)} \qquad (۳ـ۲)$$

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

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad \text{(بسامد زاویه‌ای)} \qquad (۳ـ۳)$$

یکای بسامد زاویه‌ای در SI برابر rad/s است.

توجه کنید که در رابطهٔ ۳ـ۲، شناسهٔ تابع کسینوس (ωt) برحسب رادیان است. شکل ۳ـ۵ نموداری از این تابع را نشان می‌دهد. اگر به حرکت سامانهٔ جرم ــ فنر شکل ۳ـ۴ توجه کنید درمی‌یابید که وقتی نوسانگر در $x = \pm A$ است، سرعت آن برابر با صفر است. به این نقطه‌ها اصطلاحاً نقطه‌های بازگشت[3] 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[4]. اگرچه روابط ۳ـ۲ و ۳ـ۳ 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 ۳ـ۳ نمودار مکان ــ زمان برای دو نمونه از نوسان دوره‌ای

شکل ۳ـ۴ سامانهٔ جسم و فنر، نمونهٔ مشهوری از یک حرکت هماهنگ ساده است.

شکل ۳ـ۵ نمودار مکان ــ زمان برای حرکت هماهنگ ساده

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

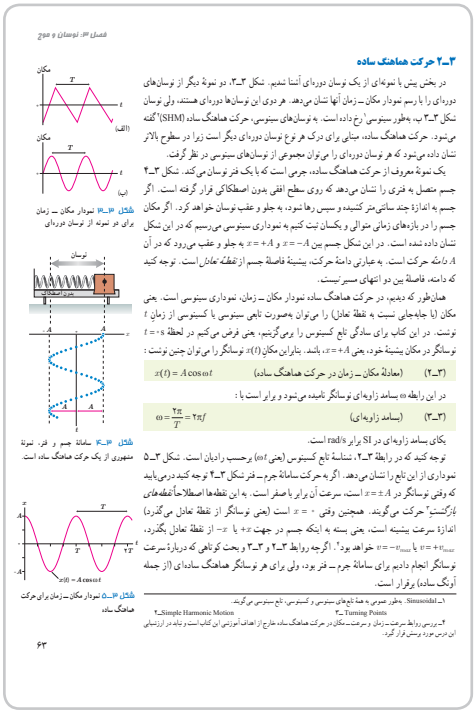
۲ـ Simple Harmonic Motion

۳ـ Turning Points

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

۶۳

در مورد شکل ۳ــ۴، در توصیفی که در متن درس برای آن آمده است توجه داده شود که اگر اصطکاک وجود داشته باشد دیگر حرکت هماهنگ ساده نخواهیم داشت، چرا که اصلاً حرکتی دوره‌ای نخواهیم داشت. زیرا تعریف حرکت دوره‌ای مبتنی بر آن است که دورها دقیقاً تکرار شوند. اصطکاک، دامنهٔ نوسان را کم می‌کند. اصطکاک نه تنها بر دامنهٔ نوسان، بلکه بر مدت زمان نوسان نیز تأثیر می‌گذارد. این مدت زمان را نمی‌توان دوره نامید؛ زیرا همان‌طور که گفتیم، اصطکاک حرکت نوسان را نادوره‌ای می‌کند. البته اگر میرایی شدید نباشد، می‌توان به‌طور قراردادی از دوره صحبت کرد. بنا به قرارداد، در این صورت زمان طی شده بین دو عبور از نقطهٔ تعادل (در یک جهت) را دوره در نظر می‌گیرند که با افزایش اصطکاک بزرگ‌تر می‌شود.



فصل ۳: نوسان و موج

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[1] رخ داده است. به نوسان‌های سینوسی، حرکت هماهنگ ساده (SHM)[2] گفته می‌شود. حرکت هماهنگ ساده، مبنای 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.

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 نشده 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.

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 زمان 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:

$$x(t)=A\cos\omega t \qquad \text{(معادلهٔ مکان ــ زمان در حرکت هماهنگ ساده)} \qquad (۳\text{ــ}۲)$$

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

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

یکای بسامد زاویه‌ای در SI برابر rad/s است.

توجه کنید که در رابطهٔ ۳ــ۲، تناسبهٔ 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[3] 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[4]. 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 ۳ــ۳ نمودار مکان ــ زمان برای دو نمونه از نوسان دوره‌ای

شکل ۳ــ۴ سامانهٔ جسم و فنر، نمونهٔ مشهوری از یک حرکت هماهنگ ساده 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 تنها در آزمایش این درس جزء پیش قرار گیرد.

۶۳

گرچه در فصل ۲، تندی زاویه‌ای مطرح نشده است، اما خوب است در اینجا به یک خطای بسیار رایج در مورد اشتباه گرفتن تندی زاویه‌ای و بسامد زاویه‌ای (که در رابطهٔ ۳ــ۳ معرفی شده) بپردازیم. چراکه هر دو کمیّت نماد و یکای یکسانی دارند. با این حال، آنها ماهیتاً متفاوت‌اند. در اینجا می‌خواهیم یک قاعدهٔ کلّی را برای تمییز این دو کمیت ارائه کنیم. نخست به تعریفی مقدماتی می‌پردازیم:

«بسامد زاویه‌ای در مورد حرکت نوسانی هماهنگ ساده به‌کار می‌آید و تندی زاویه‌ای در مورد حرکت چرخشی». در واقع تندی زاویه‌ای یک جسم چرخان، جابه‌جایی زاویه‌ای یک جسم چرخان در یک بازهٔ زمانی مشخص است. نماد این رابطه همان ω و یکای آن نیز rad/s است. یک دانش‌آموز هوشمند می‌تواند بلافاصله این پرسش را مطرح کند که اگر من یک چرخش کامل را در نظر بگیرم، تندی زاویه‌ای $\omega=2\pi\,rad/s$ می‌شود که پس از تعمیم آن به n دور چرخش کامل $\omega=2\pi f$ می‌گردد، که این همان رابطهٔ ۳ــ۳ برای بسامد زاویه‌ای است. بنابراین برای محکم کردن تعریف خود باید این قاعده را نیز اضافه کنیم که تندی زاویه‌ای، مقدار یک کمیت برداری به نام سرعت زاویه‌ای است، درحالی‌که بسامد زاویه‌ای اساساً کمیتی نرده‌ای است. اندازهٔ این دو کمیت صرفاً در حرکت دایره‌ای یکنواخت بر هم منطبق می‌شود، ولی آنها ماهیتاً با هم متفاوت‌اند.

توصیف دیگر برای حرکت هماهنگ ساده آن است که حرکتی است که تحت تأثیر نیرویی انجام می‌گیرد که متناسب با جابه‌جایی ذره، ولی با علامت مخالف است. چون بزرگی نیرو با جابه‌جایی متناسب است، دیگر شتاب ثابت نیست و به دانش‌آموزان باید توجه داد که به فکر استفاده از معادله‌های حرکت با شتاب ثابت در بررسی حرکت هماهنگ ساده نباشند.

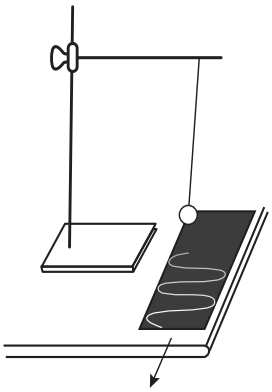
فیلم

در این فیلم مقایسه حرکت آونگی و حرکت دایره‌ای را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم مقایسه حرکت جرم ــ فنر و حرکت دایره‌ای را می‌بینید.

پاسخ فعالیت ۳ــ۱



روش دیگر این آزمایش که در اغلب کتاب‌های آموزشی به این صورت مطرح می‌گردد به این ترتیب است که تار مویی (یا رشتهٔ نازکی از یک سیم) را به سر وزنهٔ آونگی می‌بندیم و در حالی که آونگ را به نوسان درمی‌آوریم، آن را روی شیشهٔ دوداندودی قرار می‌دهیم که با تندی ثابت در راستای عمود بر صفحهٔ نوسان‌های آونگ حرکت داده می‌شود. آنگاه روی صفحهٔ دوداندود خط موج‌داری ایجاد می‌شود و بدین ترتیب نوسان‌های آونگ بر صفحهٔ دوداندود ثبت می‌گردد. شکل بالا طرحی از این آزمایش را نشان می‌دهد.

همچنین توجه کنید در تصویر فعالیت کتاب سه نوسان دیده می‌شود که بسته به تندی حرکت دیاپازون روی شیشهٔ دوداندود حاصل شده‌اند.

فیزیک ۳

فعالیت ۳ــ۱

نوسان‌نگار: نوسان‌نگار وسیله‌ای برای ثبت نوسان‌ها است. می‌خواهیم یک نوسان‌نگار ساده درست کنیم. به این منظور، یک وجه قطعه نیشه‌ای 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[1] کم‌بسامدی (در حدود ۱۰۰Hz) محکم بچسبانید. دیاپازون را به نوسان وادارید و آن را به‌سرعت روی نیشهٔ دوداندود به حرکت درآورید، طوری که اثر نوک تیز تیغه روی سطح دوداندود بیفتد. روی نیشه، خط موج‌داری رسم می‌شود که به آن *نوسان‌نگاشت*[2] گفته می‌شود.

دیاپازون با تیغه‌ای نوک‌تیز

اثر ارتعاش‌های دیاپازون روی نیشهٔ دوداندود

مثال ۳ــ۱

جرمی متصل به یک فنر با بسامد ۰/۲۰Hz و دامنهٔ ۳/۰cm به‌طور هماهنگ 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 تعادل جرم ــ فنر را محاسبه می‌کنیم:

مکان (cm)
زمان (s)
A
A

که در آن:

$A = 0/03\,m$, $\omega = 2\pi f = 2\pi\,(0/20\,s^{-1}) = 0/4\pi\,rad/s$, $t = 10/66\,s$

در نتیجه، در یکای SI داریم[3]:

$x = (0/03\,m)\cos(0/4\pi\,rad/s \times 10/66\,s) = 0/02\,m$

تمرین ۳ــ۱

ذره‌ای در حال نوسان هماهنگ ساده با دورهٔ تناوب T است. با فرض اینکه در $t = 0s$ ذره در $x = +A$ باشد، تعیین کنید در هر یک از لحظات زیر، آیا ذره در $x = -A$، در $x = +A$، یا در $x = 0$ خواهد بود؟ الف) $t = 0/0T$ ، ب) $t = 3/5T$ ، پ) $t = 5/25T$

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

تمرین ۳ــ۲

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 $A\cos\omega t = A\cos\omega(t+T)$. بر این اساس نشان دهید $\omega = 2\pi / T$.

۱ــ Tuning Fork
۲ــ Oscillogram
۳ــ اگر از ماشین‌حساب برای محاسبهٔ چنین روابطی استفاده می‌کنید، دقت کنید که مُد ماشین‌حساب روی رادیان (RAD) باشد.

۶۴

فیلم

در این فیلم، چگونگی ایجاد یک نوسان نگاشت را توسط نوسان‌نگار می‌بینید.

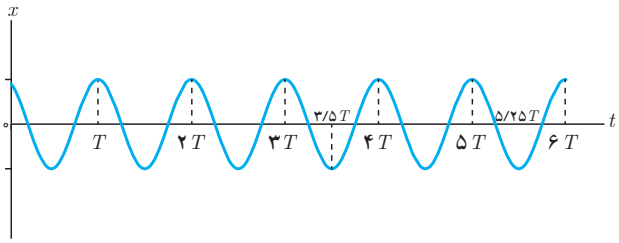
در اینجا خوب است توجه کنید در برخی از تمرین‌ها و مسئله‌های این مبحث، از جمله مثال ۳ــ۱، دانش‌آموزان ناگزیرند از ماشین‌حساب با قابلیت انجام محاسبه روابط مثلثاتی استفاده کنند و همان‌طور که در پانوشت کتاب نیز آمده است به دانش‌آموزان گوشزد کنید در این صورت توجه کنند که در محاسباتی از قبیل آنچه در مثال ۳ــ۱ آمده، مُد ماشین‌حسابشان روی RAD باشد.

فیلم

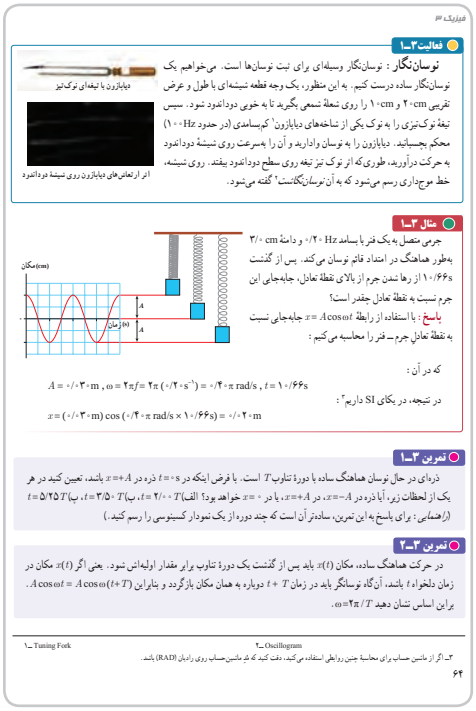
در این فیلم، نمایشی از رسم تابع سینوسی مثال ۳ــ۱ را می‌بینید.

پاسخ تمرین ۳ــ۱

می‌توانیم زمان‌های داده شده را در معادلهٔ ۳ــ۲ بگذاریم و با در نظر داشتن معادلهٔ ۳ــ۳، مکان‌های ذره را تعیین کنیم. اما همان‌طور که در متن تمرین آمده است ساده‌تر آن است که یک نمودار کسینوسی رسم کنیم و با استفاده از آن مشاهده کنیم که ذره در زمان‌های داده شده در چه مکانی قرار دارد.



از روی شکل درمی‌یابیم که در الف) $t = ۲/۰۰\,T$ ذره در $x = +A$، در ب) $t = ۳/۵۰\,T$ ذره در $x = -A$، و در پ) $t = ۵/۲۵\,T$ ذره در $x = ۰$ قرار دارد.



فیزیک ۳

فعالیت ۳ــ۱

نوسان‌نگار : نوسان‌نگار وسیله‌ای برای ثبت نوسان‌ها است. می‌خواهیم یک نوسان‌نگار ساده درست کنیم. به این منظور، یک وجه قطعه نیشه‌ای با طول و عرض تقریبی ۲۰cm و ۱۰cm را روی شعلهٔ شمعی بگیرید تا به خوبی دودانود شود. سپس تیغهٔ نوک‌تیزی را به نوک یکی از شاخه‌های دیاپازون[1] کم‌بسامدی (در حدود ۱۰۰Hz) محکم بچسبانید. دیاپازون را به نوسان وادارید و آن را به‌سرعت روی نیشهٔ دودانود به حرکت درآورید، طوری که از نوک تیز تیغه روی سطح دودانود بیفتد. روی شیشه، خط موج‌داری رسم می‌شود که به آن *نوسان‌نگاشت*[2] گفته می‌شود.

دیاپازون با تیغه‌ای نوک‌تیز

اثر ارتعاش‌های دیاپازون روی نیشهٔ دودانود

مثال ۳ــ۱

جرمی متصل به یک فنر با بسامد ۰/۲۰Hz و دامنهٔ ۳/۰cm به‌طور هماهنگ 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 تعادل جرم ــ فنر را محاسبه می‌کنیم :

که در آن :

در نتیجه، در یکای SI داریم[3] :

$A = ۰/۰۳\text{m}$, $\omega = ۲\pi f = ۲\pi\,(۰/۲\,\text{s}^{-1}) = ۰/۴\pi\ \text{rad/s}$, $t = ۱۰/۶۶\text{s}$

$x = (۰/۰۳\text{m})\cos(۰/۴\pi\ \text{rad/s} \times ۱۰/۶۶\text{s}) = ۰/۰۲\text{m}$

مکان(cm)

زمان(s)

تمرین ۳ــ۱

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 ۳ــ۲

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 $\omega = ۲\pi/T$.

۱ــ Tuning Fork

۲ــ Oscillogram

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

۶۴

پاسخ تمرین ۳ــ۲

وقتی شناسهٔ تابع کسینوس به اندازهٔ ۲π رادیان افزایش می‌یابد، این تابع خودش را تکرار می‌کند. بنابراین اگر برای زمان دلخواه t، نوسانگر در زمان $t + T$ برای نخستین‌بار به مکان خود بازگردد، به این معنی است که :

$$\omega(t+T) = \omega + ۲\pi$$

و در نتیجه $\omega = ۲\pi/T$ می‌شود.

فیلم

در این فیلم چگونگی ساختن فنرهای عظیم را می‌بینید.

فصل ۳: نوسان و موج

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 (k ی متفاوت) انجام دهیم، درمی‌یابیم که با افزایش ثابت فنر k دورهٔ تناوب T ی نوسان‌ها کوتاه‌تر می‌شود.

فعالیت ۳ــ۲

با انتخاب وزنه‌ها و فنرهای مختلف، با جرم‌ها و ثابت فنرهای معلوم و مناسب، 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 ($T \propto 1/\sqrt{k}$).

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 :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad \text{(دورهٔ تناوب سامانهٔ جرم ــ فنر)} \qquad (۳\text{ــ}۴)$$

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

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{(بسامد زاویه‌ای سامانهٔ جرم ــ فنر)} \qquad (۳\text{ــ}۵)$$

مثال ۳ــ۲

قطعه‌ای به جرم $۶۸۰\,g$ به فنری با ثابت فنر $k = ۶۵\,N/m$ 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 :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{۰/۶۸\,kg}{۶۵\,N/m}} = ۰/۶۴\,s$$

ب) بسامد زاویه‌ای از رابطهٔ ۳ــ۵ به‌دست می‌آید :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{۶۵\,N/m}{۰/۶۸\,kg}} = ۹/۸\,rad/s$$

۶۵

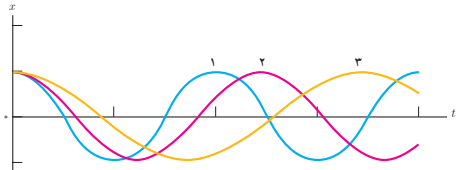
هانریش هرتز (۱۸۹۴ــ۱۸۵۷ م.)

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.

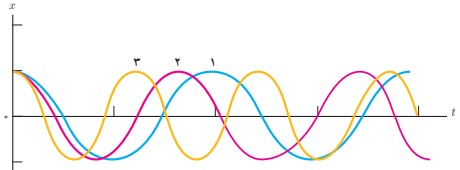
پاسخ فعالیت ۳ــ۲

در این فعالیت باید به سازوکارهای آزمایشی جهت پاسخ‌دهی مناسب این آزمایش‌ها توجه کنید. همچنین لازم است با شمردن زمان تعداد زیادی نوسان کامل، زمان یک نوسان را به‌دست آورید. همچنین خوب است این آزمایش‌ها را با دامنه‌های نوسان متفاوتی نیز انجام دهید و مستقل بودن زمان نوسان از دامنه را نیز بیازمایید.

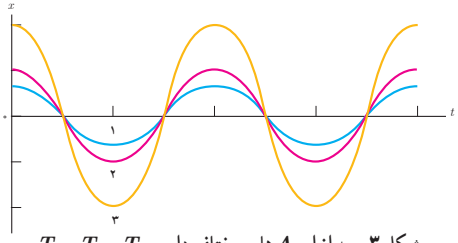
یک فعالیت پیشنهادی دیگر در امتداد این فعالیت این است که از دانش‌آموزان بخواهید با رسم نمودارهای $x - t$، یک‌بار برای سه جرم متفاوت و ثابت نگه داشتن k و A، یک‌بار برای سه ثابت فنر متفاوت و ثابت نگه داشتن m و A و یک‌بار برای سه دامنهٔ متفاوت و ثابت نگه داشتن m و k، دوره‌های تناوب را مقایسه کنند. آنها باید به ترتیب نمودارهای نوعی شکل‌های ۱، ۲ و ۳ را رسم کنند.



شکل ۱ــ به ازای $m_۳ > m_۲ > m_۱$، داریم $T_۳ > T_۲ > T_۱$



شکل ۲ــ به ازای $k_۳ > k_۲ > k_۱$، داریم $T_۱ > T_۲ > T_۳$



شکل ۳ــ به ازای A های مختلف داریم $T_۱ = T_۲ = T_۳$

توجه کنید که در این کتاب صرفاً به معرفی دورهٔ تناوب و بسامد زاویه‌ای بسنده کرده‌ایم و لذا بسامد زاویه‌ای براساس دورهٔ تناوب معرفی شده است که می‌توان آن را به‌طور تجربی به‌دست آورد. در کتاب‌های مبتنی بر حسابان، این تقدم و تأخر متفاوت است. به عبارتی، نخست بسامد زاویه‌ای با محاسبهٔ ساده‌ای از قانون دوم نیوتون به‌دست می‌آید و سپس دورهٔ تناوب با استفاده از رابطهٔ $T=2\pi/\omega$ محاسبه می‌شود. در اینجا همان‌طور که اشاره شد، با توجه به اینکه دانش‌آموزان در فعالیت ۳ـ۲ با روش محاسبهٔ تجربی دورهٔ تناوب آشنا شده‌اند، دورهٔ تناوب پیش از بسامد زاویه‌ای معرفی شده است.

فصل ۳: نوسان و موج

آزمایش‌های متعدد با جرم و فنر نشان می‌دهد که افزایش جرم m در سامانهٔ جرم ـ 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 (kی متفاوت) انجام دهیم، درمی‌یابیم که با افزایش ثابت فنر k، دورهٔ تناوب Tی نوسان‌ها کوتاه‌تر می‌شود.

فعالیت ۳ـ۲

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

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

محاسبات و همچنین آزمایش‌هایی مشابه با آنچه در فعالیت ۳ـ۲ دیدید نشان می‌دهد دورهٔ تناوب سامانهٔ جرم ـ فنر با وزنه‌ای به جرم m و فنری با ثابت k برابر است با :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad \text{(دورهٔ تناوب سامانهٔ جرم ـ فنر)} \quad (۳ـ۴)$$

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

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{(بسامد زاویه‌ای سامانهٔ جرم ـ فنر)} \quad (۳ـ۵)$$

مثال ۳ـ۲

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 ۳ـ۴ به‌دست می‌آید :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{0/68\,kg}{65\,N/m}} = 0/64\,s$$

ب) بسامد زاویه‌ای از رابطهٔ ۳ـ۵ به‌دست می‌آید :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{65\,N/m}{0/68\,kg}} = 9/8\,rad/s$$

هاینریش هرتز (۱۸۹۴ـ۱۸۵۷ 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 بن‌کنیک کالسروهه منصوب شد. در آنجا یک فرستنده و یک گیرندهٔ رادیویی ساخت که موردِ توجه قرار گرفت و به کمک آن توانست تندی امواج رادیویی را به‌دست آورد. آزمایش‌های متعدد هرتز، به قول خود او، همگی نتیجه‌ای از پیروزی درخشان نظریهٔ ماکسول بود.

۶۵

تمرین‌های پیشنهادی

۱ در حالت بی‌وزنی نمی‌توان جرم یک شخص را با استفاده از ترازو محاسبه کرد. یک فضانورد در سفینه‌ای چرخان به دور مدار زمین با استفاده از وسیله‌ای فنری می‌تواند جرم خود را تعیین کند. در این وسیله، فنری به محل نشستن فضانورد متصل است و فضانورد با استفاده از دورهٔ تناوب نوسان، جرم خود را تعیین می‌کند. فرض کنید ثابت فنر این فنر $606\,N/m$، جرم صندلی $12\,kg$، و دورهٔ تناوب اندازه‌گیری شده $2/41\,s$ باشد. جرم فضانورد چقدر است؟

پاسخ : از رابطهٔ ۳ـ۴ استفاده می‌کنیم که در اینجا جرم، مجموع جرم صندلی و فضانورد است. در نتیجه

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

و از آنجا

$$M = \left(\frac{k}{4\pi^2}\right)T^2 - m = \left(\frac{606\,N/m}{4\pi^2}\right)(2/41\,s)^2 - 12\,kg = 77/2\,kg$$

۲ فرض کنید روی یک ترازو ایستاده‌اید و تا پیش از اینکه ترازو جرم ۵۰ کیلوگرمی شما را نشان دهد، عقربهٔ آن چندین بار با دورهٔ تناوب ۱s حول مکان تعادل نوسان می‌کند. ثابت فنر درون این ترازو چقدر است؟

پاسخ : دوباره از رابطهٔ ۳ـ۴ استفاده می‌کنیم و از آنجا ثابت فنر k را به‌دست می‌آوریم :

$$k = \frac{4\pi^2 m}{T^2} = 4\pi^2\frac{50\,kg}{(1\,s)^2} \approx 2000\,N/m$$

۳ ۰/۷۵s طول می‌کشد تا یک دستگاه قطعه ــ فنر نوسانی شروع به تکرار حرکت خود کند. (الف) دورهٔ تناوب، (ب) بسامد، و (پ) بسامد زاویه‌ای چقدر است؟

پاسخ :

الف) بدیهی است که دورهٔ تناوب برابر همان ۰/۷۵s است.

ب) بسامد برابر با عکس دورهٔ تناوب است :

$$f = \frac{۱}{T} = \frac{۱}{۰/۷۵\,s} = ۱/۳\,s^{-۱} = ۱/۳\,Hz$$

پ) بسامد زاویه‌ای چنین می‌شود :

$$\omega = \frac{۲\pi}{T} = \frac{۲\pi}{۰/۷۵\,s} = ۸/۴\,rad/s$$

۴ شخصی به جرم ۸۵/۰ kg از یک طناب کشسان با ثابت فنر ۲۷۰N/m آویزان است. شخص تا نقطه‌ای پایین می‌آید که در آن طناب ۵/۰ m بیشتر از طول کشیده نشده‌اش است و سپس رها می‌شود. اگر حرکت طناب، نوسانی ساده باشد. الف) دامنهٔ نوسان چقدر است؟ ب) شخص ۲/۰s بعد از رها شدن در کجا قرار دارد؟ (راهنمایی : $y(t) = A\cos\omega t$ است.)

پاسخ : الف) نخست باید نقطهٔ تعادل را به‌دست آوریم :

$$\Delta L = \frac{mg}{k} = \frac{(۸۵kg)(۹/۸N/kg)}{۲۷۰N/m} = ۳/۰m$$

چون طناب ۵/۰ m پایین کشیده شده، بنابراین دامنهٔ نوسان $A = ۵/۰m - ۳/۰m = ۲/۰m$ می‌شود.

ب) با استفاده از راهنمایی داریم :

$$y(t) = A\cos\omega t$$

که در آن

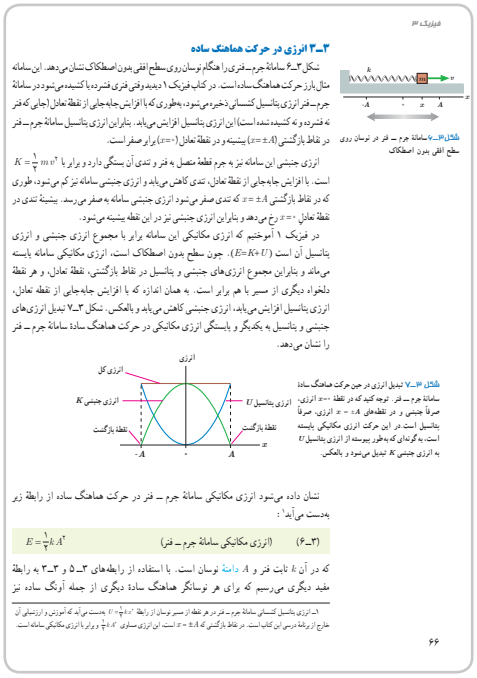
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{۲۷۰N/m}{۸۵/۰kg}} = ۱/۸۰\,rad/s$$

و در نتیجه :

$$y = (۲/۰m)\cos((۱/۸۰rad/s)(۲/۰s)) = -۱/۸m$$

در نتیجه در ۱/۸ m زیر نقطهٔ تعادل است.

خوب است اشاره شود برخی کتاب‌ها به این سامانهٔ قطعه ــ فنر، نوسانگر هماهنگ سادهٔ خطی نیز می‌گویند که همان‌طور که پیش‌تر اشاره کردیم، خطی به معنی آن است که نیروی وارد بر قطعه متناسب با توان اول (و نه توان دیگری از x) است.



فیزیک ۳

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 نشده 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.

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 تعادل $x=0$ 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 بایسته 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 نقطهٔ تعادل، انرژی پتانسیل افزایش می‌یابد، انرژی جنبشی کاهش می‌یابد و بالعکس. شکل ۳ــ۷ تبدیل انرژی‌های جنبشی و پتانسیل به یکدیگر و بایستگی انرژی مکانیکی در حرکت هماهنگ سادهٔ سامانهٔ جرم ــ فنر را نشان می‌دهد.

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

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

نشان داده می‌شود انرژی مکانیکی سامانهٔ جرم ــ فنر در حرکت هماهنگ ساده از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید[1]:

$$E=\frac{1}{2}kA^2 \qquad \text{(انرژی مکانیکی سامانهٔ جرم ــ فنر)} \qquad (۳\text{ــ}۶)$$

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

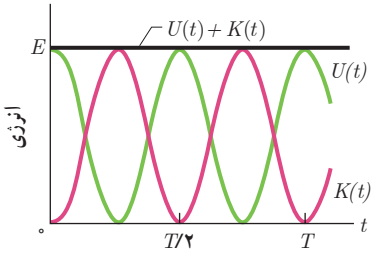
۱ــ انرژی پتانسیل کشسانی سامانهٔ جرم ــ فنر در هر نقطه از مسیر نوسان از رابطهٔ $U=\frac{1}{2}kx^2$ به‌دست می‌آید که آموزش و ارزشیابی آن خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است. در نقاط بازگشتی که $x=\pm A$ است، این انرژی مساوی $\frac{1}{2}kA^2$ و برابر با انرژی مکانیکی سامانه است.

۶۶

نرم‌افزار PhET شبیه‌سازهای خوبی برای این مباحث دارد :
https: //phet.colorado.edu/en/simulation mass–spring–lab

فیلم

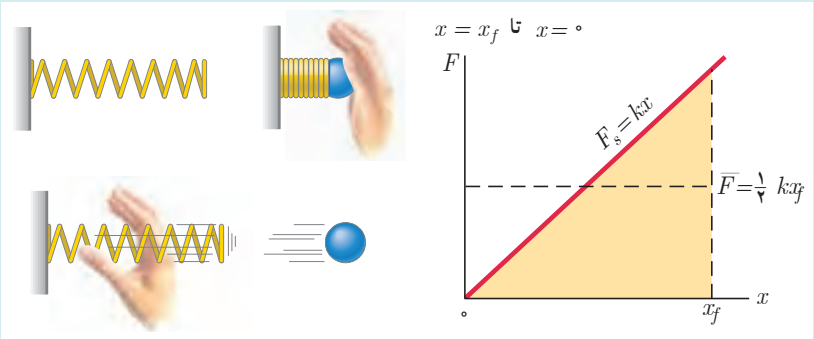
دراینجا حتماً اشاره شود که انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی نوسانگر به زمان وابسته است (شکل زیر) ولی انرژی مکانیکی سامانهٔ جرم ــ فنر ثابت و مستقل از زمان است.



دانستنی معلم

انرژی پتانسیل کشسانی

با توجه به قانون هوک و با توجه به این که ثابت فنر مقدار ثابتی است، نیروی فنر تابعی خطی از تغییر طول فنر (کشیده یا فشرده) است، که به‌طور یکنواخت، از صفر (در طول واهلیدهٔ فنر، $x_i=0$) تا F افزایش می‌یابد (شکل ۱).



شکل ۱ــ با کشیده (یا فشرده) شدن فنر، بزرگی F_s نیروی فنر به‌طور خطی با x افزایش می‌یابد.

بنابراین در هنگام فشرده یا کشیده شدن فنر تا $x_f = x$ (شکل ۲) می‌توان نیروی متوسطی را به‌صورت $\overline{F} = \frac{F+0}{2} = \frac{F}{2}$ در نظر گرفت. آنگاه طبق تعریف کار، برای کار نیروی فنر داریم :

$$W = \overline{F}d\cos\theta = (\frac{F}{2})x\cos 180^\circ = (\frac{kx}{2})(x)(-1) = -\frac{1}{2}kx^2$$

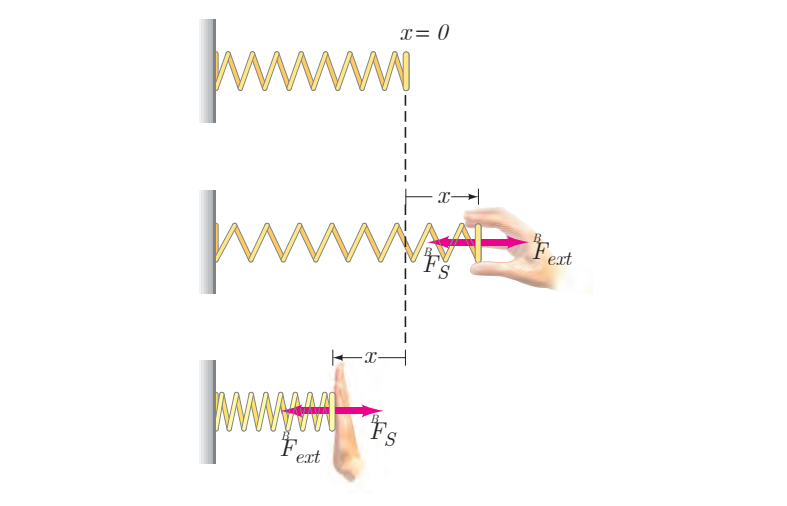
با توجه به اینکه تغییر انرژی پتانسیل فنر با منفی کار نیروی کشسالی فنر برابر است، داریم

$$\Delta U = -W$$

$$U - U_0 = -(-\frac{1}{2}kx^2) = \frac{1}{2}kx^2$$

اگر انرژی پتانسیل فنر با طول واهلیده را صفر درنظر بگیریم ($U_0 = 0$)، برای فنر که به اندازهٔ x کشیده یا فشرده شده است خواهیم داشت.

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



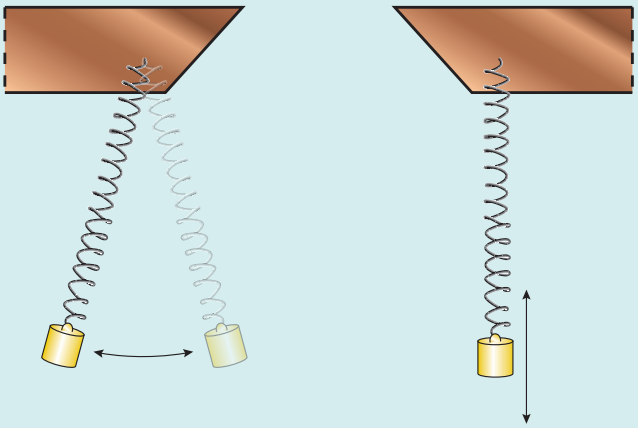
شکل ۲ـ (الف) فنر ابتدا در طول واهلیدهٔ خود است و سپس با اعمال نیروی خارجی $\vec{F}_{ext}$، کشیده و (ب) فشرده شده است.

دانستنی معلم

آونگ فنری و آونگ‌های جفت‌شده

آونگ فنری و آونگ‌های جفت‌شده مثال‌هایی مشهور از تبدیل انرژی در حرکت‌های نوسانی هستند. برای ساختن یک آونگ فنری، فنر نسبتاً سختی را از یک انتها آویزان کنید و سپس وزنه‌ای را به انتهای پایینی آن متصل کنید که بتواند فنر را به حدود $\frac{۴}{۳}$ طول اولیه‌اش برساند. جسم را پایین بکشید و سپس رها کنید. جسم در ابتدا در امتداد قائم نوسان می‌کند. اما به‌زودی این حرکت قائم با یک حرکت آونگی جایگزین می‌شود. با میراشدن این حرکت آونگی دوباره حرکت قائم ظاهر می‌شود. این دو نوع حرکت به‌طور متناوب جایگزین هم می‌شوند. اگر به‌جای حرکت قائم با حرکت آونگی نیز آغاز می‌کردید می‌توانستید به همین رفتار دو حالته برسید. در واقع در آونگ فنری انرژی به‌طور متناوب بین حرکت آونگی و نوسان‌های جرم ــ فنر مبادله می‌شود. شکل الف طرحی از یک آونگ فنری را نشان می‌دهد.

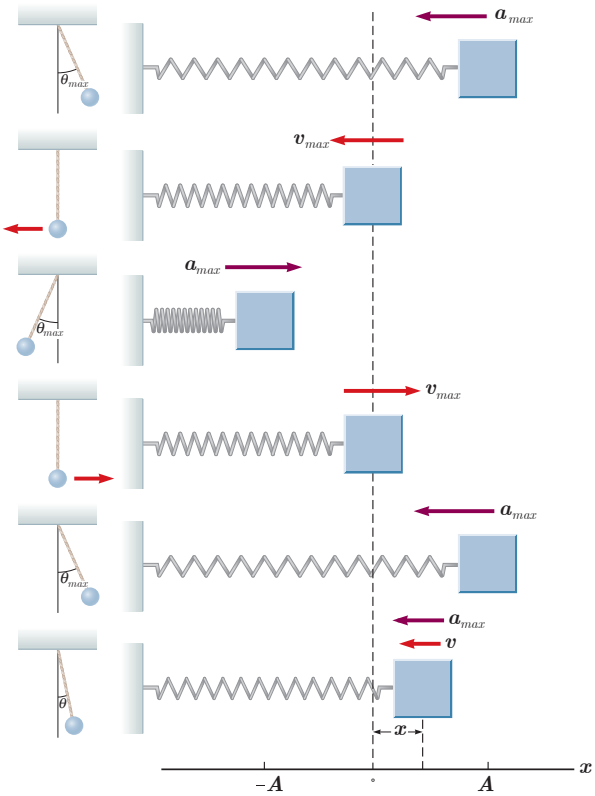
برای ساختن نوعی از آونگ‌های جفت شده دو نخ هم طول را به یک تختهٔ آویز وصل کنید و سپس با پیچیدن هر نخ دور یک میلهٔ افقی یا عبور دادن آن از این میله مانند شکل ب، انتهای دیگر هر نخ را بر وزنه‌های مشابهی وصل کنید به‌طوری که فاصلهٔ وزنه‌ها از میله حدوداً $\frac{۲}{۳}$ کل طول هر نخ باشد. حال اگر یکی از دو جرم را نگه دارید و دیگری را به موازات میله به یک طرف ببرید و سپس رها کنید درخواهید یافت حرکت آونگ جابه‌جا شده به‌تدریج به آونگ دوم منتقل می‌شود. به محض این که این انتقال کامل شود آونگ اول ساکن شده و انتقال معکوس می‌گردد. این انتقال حرکت به‌طور متناوب بین دو آونگ ادامه خواهد یافت. در واقع در این جا نیز انرژی به‌طور متناوب بین این دو حرکت نوسانی مبادله می‌شود.

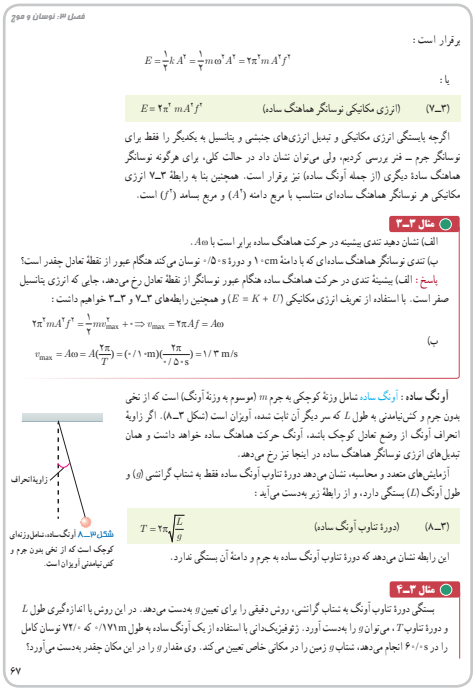


(الف) نوسان فنرها

(ب) حرکت آونگی

خوب است در اینجا به همانندی حرکت آونگ ساده با حرکت هماهنگ ساده اشاره کنید و با تصاویری مانند شکل زیر به همانندی این دو دستگاه اشاره کنید و بیان کنید تمام آنچه برای مثال دستگاه جرم ــ فنر بیان کردیم برای آونگ ساده نیز برقرار است و همان تبدیل‌های انرژی نیز در اینجا رخ می‌دهد.





فصل ۳: نوسان و موج

برقرار است :

$$E=\frac{1}{2}kA^2=\frac{1}{2}m\omega^2A^2=2\pi^2mA^2f^2$$

یا :

$$E=2\pi^2mA^2f^2 \qquad (۳\text{ــ}۷)$$ (انرژی مکانیکی نوسانگر هماهنگ ساده)

اگرچه بایستگی 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^2) و مربع بسامد (f^2) 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 $10\,cm$ و دورهٔ $0/50\,s$ 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 :

$$2\pi^2mA^2f^2=\frac{1}{2}mv_{max}^2+0 \Rightarrow v_{max}=2\pi Af=A\omega$$

ب)

$$v_{max}=A\omega=A(\frac{2\pi}{T})=(0/10\,m)(\frac{2\pi}{0/50\,s})=1/3\,m/s$$

آونگ ساده : آونگ ساده شامل وزنهٔ کوچکی به جرم m (موسوم به وزنهٔ آونگ) است که از نخی بدون جرم و کش‌ناپذیر 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 :

$$T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \qquad (۳\text{ــ}۸)$$ (دورهٔ تناوب آونگ ساده)

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

زاویهٔ انحراف

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

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 $0/171\,m$ که $72/0$ نوسان کامل را در $60/0\,s$ انجام می‌دهد، شتاب g زمین را در مکانی خاص تعیین می‌کند. وی مقدار g را در این مکان چقدر به‌دست می‌آورد؟

۶۷

فیلم

در این فیلم می‌بینید با افزایش دامنه، حرکت هماهنگ ساده نیست.

فیلم

در این فیلم تأثیر جرم بر دورهٔ تناوب آونگ ساده را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم تأثیر طول بر دورهٔ تناوب آونگ ساده را می‌بینید.

در مورد زاویهٔ انحراف آونگ ساده برای آنکه حرکت هماهنگ ساده داشته باشد خوب است اشاره شود که این زاویه نباید از 15° فراتر رود. در حالت کلی دورهٔ تناوب آونگ ساده از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}\left[1+\frac{1}{16}\theta^2+\frac{11}{3072}\theta^4+\cdots\right]$$

که θ زاویهٔ انحراف آونگ است.

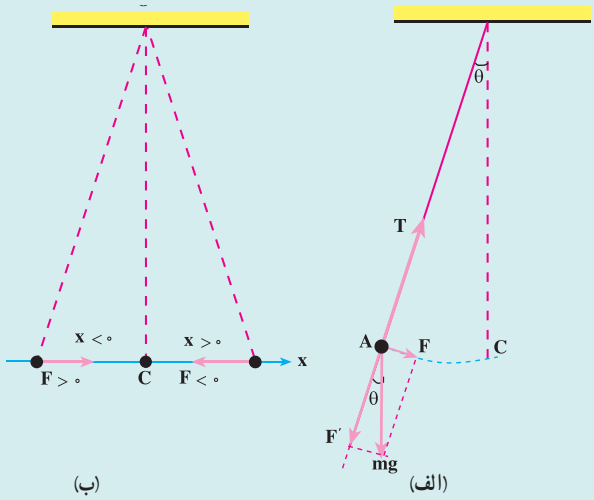
دانستنی معلم

دورهٔ تناوب آونگ ساده

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

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

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



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

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

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

اکنون با توجه به قانون دوم نیوتون داریم :

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

$$a = -\frac{g}{l}x \qquad (۱)$$

از طرفی، از قانون دوم نیوتون و قانون هوک داریم :

$$a = \frac{F}{m} = \frac{-kx}{m} = -\frac{k}{m}x = -\omega^{۲}x \qquad (۲)$$

پس

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

و در نتیجه

$$T = \frac{۲\pi}{\omega} = ۲\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

پرسش پیشنهادی

۱ چگونه می‌توانید یک تاب را که ساکن است، بی‌آنکه کسی آن را هل دهد به حرکت درآورید؟

پاسخ : یک روش این است که در بالاترین نقطهٔ مسیر به حالت چنباتمه بنشینید و در پایین‌ترین نقطه بایستید. ایستادن، سرعت شما را زیاد می‌کند. با ایستادن، شما مرکز جرم خود را بالا می‌برید و کار انجام می‌دهید و این کار به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود و سرعت شما را زیاد می‌کند.

تمرین‌های پیشنهادی

۱ در مریخ شتاب گرانشی ۰/۳۸ شتاب سقوط آزاد در زمین است. دورهٔ تناوب آونگی ساده در سطح مریخ ۱/۵s اندازه‌گیری شده است. اگر شخصی این آونگ را به سطح سیارهٔ دیگری ببرد، دورهٔ تناوب ۰/۹۲s را برای آن به‌دست می‌آورد. این، کدام سیاره است؟

پاسخ : از رابطهٔ $T = ۲\pi\sqrt{L/g}$ به طول $L = ۰/۲۱\text{m}$ به دست می‌آید و از آنجا

$$g_{\text{مجهول}} = \frac{۴\pi^۲ L}{T^۲} = ۴\pi^۲ \frac{۰/۲۱\text{m}}{(۱/۵\text{s})^۲} = ۹/۸\text{m/s}^۲$$

بنابراین، سیاره همان زمین است.

۲ دورهٔ نوسان دستگاه جرم ــ فنری که دامنهٔ نوسان آن ۱۲/۲۵cm است و تندی بیشینهٔ ۵/۱۳m/s را دارد چقدر است؟ ثابت فنر ۵/۰۳N/m است.

پاسخ : انرژی جنبشی بیشینه برابر با انرژی پتانسیل بیشینه است :

$$\frac{۱}{۲}mv_{\max}^۲ = \frac{۱}{۲}kA^۲$$

از اینجا m به‌دست می‌آید :

$$m = \frac{kA^۲}{v_{\max}^۲} = \frac{(۵/۰۳\text{N/m})(۰/۱۲۲۵\text{m})^۲}{(۵/۱۳\text{m/s})} = ۲/۸۶۸\times۱۰^{-۳}\text{kg}$$

و اکنون T به‌دست می‌آید :

$$T = ۲\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = ۲\pi\sqrt{\frac{۲/۸۶۸\times۱۰^{-۳}\text{kg}}{۵/۰۳\text{N/m}}} = ۰/۱۵۰\text{s}$$

آزمایش پیشنهادی

۱ آونگی با گلولهٔ آهنی به جرم ۲۰۰g و به طول ۱/۰m از مرکز وزنهٔ آونگ را اختیار کنید. وزنهٔ آونگ را حدود °۵/۰ به یک طرف بکشید و رها کنید و در همان لحظه زمان‌سنج را نیز به‌کار اندازید. وقتی وزنه به نقطهٔ اول بازگردد یک نوسان کامل انجام داده است. برای دقت بیشتر زمان ۲۰ نوسان آونگ را به‌دست آورید و به کمک آن زمان یک نوسان کامل را به‌دست آورید. بار دیگر آونگ را حدود °۱۰ بکشید و این آزمایش را تکرار کنید. سرانجام آزمایش را برای زاویهٔ نوسان °۲۰ انجام دهید و نتایج را در جدولی ثبت کنید. نتایج به‌دست آمده را تحلیل کنید. سپس همین آزمایش را با جرم‌های وزنهٔ آونگ دیگری نیز انجام دهید و نتایج به‌دست آمده را تحلیل کنید.

فیزیک ۳

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

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

که در آن T دورهٔ تناوب این آونگ است :

$$T=\frac{\text{زمان}}{\text{تعداد نوسان‌ها}}=\frac{60/0\,s}{72/0}=0/833\,s$$

در نتیجه g چنین به‌دست می‌آید :

$$g=\frac{4\pi^2 L}{T^2}=\frac{4\pi^2(0/171\,m)}{(0/833\,s)^2}=9/73\,m/s^2$$

۳ـ۴ تشدید

در تمام مثال‌هایی که تا اینجا بررسی کردیم، نوسانگر (مثلاً جرم ـ 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 ـ فنر $f_0=\sqrt{k/m}/2\pi$ و بسامد طبیعی آونگ ساده $f_0=\sqrt{g/L}/2\pi$ 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[1]. مثالی از یک نوسان واداشته، تاب خوردن کودکی است که به‌طور دوره‌ای هُل داده می‌شود (شکل ۳ـ۹). 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 ($f_d=f_0$) اصطلاحاً گفته می‌شود که برای نوسانگر تشدید (رزونانس) رخ داده است. اگر تاب را با بسامدهای بیشتر یا کمتر از بسامد طبیعی آن هُل دهیم، دامنهٔ نوسان کوچک‌تر از حالتی خواهد شد که آن را با بسامد طبیعی‌اش هُل می‌دهیم. پدیدهٔ تشدید را می‌توان با فعالیت سادهٔ زیر بررسی کرد.

شکل ۳ـ۹ با هُل دادن تاب، کودک به نوسان واداشته می‌شود.

فعالیت ۳ـ۳

آونگ‌های بارتون[2] : 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 واداراننده*[3] 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 واداراننده را به نوسان درآورید و آنچه را مشاهده می‌کنید توضیح دهید.

۱ـ تماضی پایین‌ی سروازه driven به معنی واداشته است.

۲ـ Barton's Pendulums

۳ـ Driver Pendulum

۶۸

اشاره شود نوسان‌های واداشته دوره‌ای هستند تا بدین ترتیب انرژی‌ای که صرف اصطکاک می‌شود به‌طور پیوسته با کاری که توسط نیروی دوره‌ای انجام می‌گیرد، جبران شود.

توجه کنید نوسان واداشته در برابر نوسان آزاد (نوسان با بسامد طبیعی) تعریف می‌شود. یعنی اگر نوسانی آزاد نباشد، واداشته است و ما شقّ دیگری نداریم. یا نوسان آزاد است یا واداشته. بدیهی است اگر اصطکاک و سایر عوامل بازدارنده وجود داشته باشند، نوسان آزاد میرا خواهد شد. در نبود اصطکاک و سایر عوامل یازدارنده، نوسانگر همواره با بسامد طبیعی خود نوسان می‌کند.

فیزیک ۳

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

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

که در آن T دورهٔ تناوب این آونگ است :

$$T=\frac{\text{زمان}}{\text{تعداد نوسان‌ها}}=\frac{60/0\,s}{72/0}=0/833\,s$$

در نتیجه g چنین به‌دست می‌آید :

$$g=\frac{4\pi^2 L}{T^2}=\frac{4\pi^2(0/171\,m)}{(0/833\,s)^2}=9/73\,m/s^2$$

۳ـ۴ تشدید

در تمام مثال‌های که تا اینجا بررسی کردیم، نوسانگر (مثلاً جرم ـ 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 ـ فنر $f_0=\sqrt{k/m}/2\pi$ و بسامد طبیعی آونگ ساده $f_0=\sqrt{g/L}/2\pi$ است. اما این نوسانگرها می‌توانند با اعمال یک نیروی خارجی، با بسامدهای دیگری نیز به نوسان درآیند. به چنین نوسانی، نوسان وادانشته گفته می‌شود و بسامد این نوسان را با f_d نمایش می‌دهند[1]. مثالی از یک نوسان وادانشته، تاب خوردن کودکی است که به‌طور دوره‌ای هُل داده می‌شود (شکل ۳ـ۹). 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 وادانشته با بسامد طبیعی تاب برابر شده است. در چنین وضعیتی ($f_d=f_0$) 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 هُل می‌دهیم. پدیدهٔ تشدید را می‌توان با فعالیت سادهٔ زیر بررسی کرد.

شکل ۳ـ۹ با هُل دادن تاب، کودک به نوسان وادانشته می‌شود.

فعالیت ۳ـ۳

آونگ‌های بارتون[2] : 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*[3] گفته می‌شود، زیرا به نوسان درآوردن این آونگ در صفحهٔ عمود بر صفحهٔ شکل، موجب تاب خوردن نخ آویز و در نتیجه به نوسان وادانستن سایر آونگ‌ها می‌شود. آونگ وادارنده را به نوسان درآورید و آنچه را مشاهده می‌کنید توضیح دهید.

تختهٔ آویز — نخ — آونگ وادارنده — مخروط‌های کاغذی

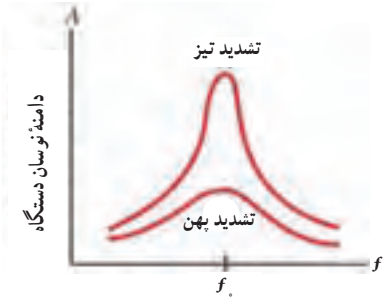
۱ـ تشخیص پایین d سرواژهٔ driven به معنی وادانشته است.

۲ـ Barton's Pendulums

۳ـ Driver Pendulum

۶۸

خوب است در اینجا به تفاوت تشدید در میرایی ضعیف و قوی اشاره کنیم. اگر میرایی دستگاه ضعیف باشد، پدیدهٔ تشدید بزرگ‌تر و واضح‌تر است (به این تشدید، ***تشدید تیز*** می‌گویند.) در این تشدید، یک تفاوت ناچیز بین بسامد نیرو و بسامد طبیعی، دامنهٔ نوسان‌ها را به‌شدت کاهش می‌دهد. ولی در دستگاهی با میرایی زیاد (مثلاً آونگ در داخل آب) دامنهٔ نوسان در تشدید کامل خیلی بارز نمی‌شود (به این تشدید، ***تشدید پهن*** می‌گویند)، اما خیلی هم سریع کاهش پیدا نمی‌کند.



بسامد خارجی

تعریف دقیق‌تر تشدید مبتنی بر افزایش دامنهٔ سرعت است و در این کتاب با اندکی اغماض آن را براساس افزایش دامنهٔ جابه‌جایی تعریف کرده‌ایم.

در اینجا ممکن است دانش‌آموزان به نوسان‌های دیگری هم اشاره کنند که بدون ضربه‌ای وادارنده رخ می‌دهند و مثلاً در یک تاب دونفره با نشستن و برخاستنِ به نوبت بچه‌ها انجام می‌گیرد. این نوع تشدید با آنچه در متن درس بررسی شد متفاوت است و خوب است به دانستنی مربوط به آن رجوع شود.

فیلم

در این فیلم تشدید در تاب و نوعی آونگ را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم تشدید در یک آونگ را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم تشدید در دو دستگاه جرم ــ فنر را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم دیاپازون‌های رُخ به رُخی را می‌بینید که دومی با بسامد اول به تشدید درمی‌آید.

فیلم

در این فیلم دیاپازون‌های موازی‌ای را می‌بینید که بسامد ارتعاش آنها کم و مثلاً یکی ۲۵۶Hz و دیگری ۲۵۷Hz است. در این صورت شما صدایی موسوم به *زَنش*[1] را با بسامدی برابر اختلاف این دو بسامد (یعنی ۱Hz) را می‌شنوید.

فیزیک ۳

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

$$g=\frac{۴\pi^۲L}{T^۲}$$

که در آن T دورهٔ تناوب این آونگ است :

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

در نتیجه g چنین به‌دست می‌آید :

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

۳ــ۴ تشدید

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 $f_0=\sqrt{k/m}/۲\pi$ و بسامد طبیعی آونگ ساده $f_0=\sqrt{g/L}/۲\pi$ است. اما این نوسانگرها می‌توانند با اعمال یک نیروی خارجی، با بسامدهای دیگری نیز به نوسان درآیند. به چنین نوسانی، نوسان وادانشته گفته می‌شود و بسامد این نوسان را با f_d نمایش می‌دهند[2]. مثالی از یک نوسان وادانشته، 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 وادانشته با بسامد طبیعی تاب برابر شده است. در چنین وضعیتی ($f_d=f_0$) اصطلاحاً گفته می‌شود که برای نوسانگر تشدید (رزوناس) 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.

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

فعالیت ۳ــ۳

آونگ‌های بارتون[3] : 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*[4] گفته می‌شود، زیرا به نوسان درآوردن این آونگ در صفحهٔ عمود بر صفحهٔ شکل، موجب تاب خوردن نخ آویز و در نتیجه به نوسان وادانشتن سایر آونگ‌ها می‌شود. آونگ وادارنده را به نوسان درآورید و آنچه را مشاهده می‌کنید توضیح دهید.

تختهٔ آویز
نخ
آونگ وادارنده
مخروط‌های کاغذی

۱ــ شاخص پایین d سرواژهٔ driven به معنی وادانشته است.
۲ــ f_d
۳ــ Barton's Pendulums
۴ــ Driver Pendulum

۶۸

پاسخ فعالیت ۳ــ۳

با به نوسان درآوردن آونگ وادارنده، می‌توان دید برخی از آونگ‌ها با دامنهٔ بزرگی به نوسان درمی‌آیند، در حالی که برخی ساکن مانده و یا با دامنه‌های بسیار کوچکی به نوسان درمی‌آیند. در واقع آنچه رخ می‌دهد براساس پدیدهٔ تشدید توضیح داده می‌شود و آن آونگ‌هایی که با دامنهٔ بزرگ به نوسان درمی‌آیند در واقع بسامد طبیعی‌ای دارند که برابر یا در حول و حوش بسامد آونگ وادارنده است و اگر تکانی ناچیز در برخی دیگر از آونگ‌ها مشاهده می‌شود صرفاً براساس انتقال انرژی ناچیزی است که برای این آونگ‌ها رخ می‌دهد. در مورد آونگی که با بیشترین دامنه به نوسان در می‌آید، اصطلاحاً گفته می‌شود که این آونگ برای تشدید کوک (tune) شده است. در تمرین ۳ــ۳ به طور عددی، پدیدهٔ مشابهی را بررسی می‌کنیم. در مورد آونگ‌های بارتون، بدیهی است آونگی با بیشترین دامنه به نوسان درمی‌آید که هم‌طول آونگ وادارنده باشد.

از لحاظ تاریخی خوب است بدانید آونگ‌های بارتون منتسب به *ادوین هنری بارتون* (۱۹۲۵ــ۱۸۵۸ م.) استاد فیزیک دانشگاه ناتینگهام بوده که برای نخستین بار برای نشان دادن پدیدهٔ تشدید این آزمایش را تدارک دید.

فیلم

در این فیلم تشدید آونگ‌های هم‌طول را می‌بینید.

۱ــ beat

فیلم

در این فیلم فروپاشی پل تاکوما (Tacoma) را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم چگونگی فروپاشی یک ساختمان واقع بر زمینی نرم در حین یک زمین‌لرزه را می‌بینید.

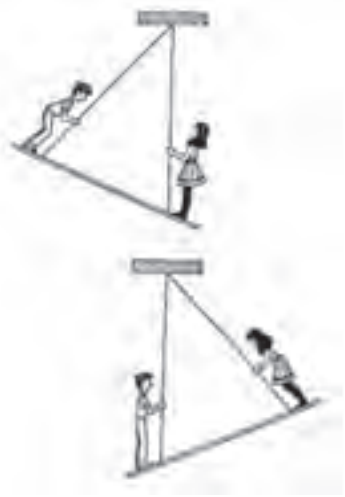
فیلم

در فیلم تشدید در یک لیوان و در نهایت شکستن آن را می‌بینید.

دانستنی برای معلم

تشدیدهایی بدون ضربهٔ وادارنده

نوسان‌های تاب معمولی می‌توانند بدون هیچ ضربه‌ای از خارج زیاد شوند. برای این منظور، اشخاصی که روی تخته ایستاده‌اند باید به نوبت بنشینند و برخیزند (شکل ۱). هر کدام در طول یک دوره از نوسان‌های تاب یک‌بار می‌نشینند، و چون آنها این کار را به نوبت انجام می‌دهند، معلوم است که در طول یک دوره مرکز جرم آونگ (تاب) دوبار بالا و پایین می‌رود. این روش



شکل ۱ــ زیاد شدن نوسان‌های تاب

شکل ۲ــ آزمایشی برای زیاد شدن نوسان‌های پارامتری در آونگ ساده.

برانگیزش نوسان‌ها اساساً با روشی که در کتاب بررسی کردیم فرق دارد : دستگاه نوسان‌کننده (در این مثال، تاب) به این دلیل با بسامد طبیعی‌اش تکان می‌خورد که کمیت تعیین کنندهٔ دورهٔ دستگاه (در حالت موردنظر ما، این کمیت فاصلهٔ بین نقطهٔ آویز و مرکز جرم است) با بسامد دوبرابر تغییر می‌کند. نوسان‌ها با صرف کاری که جهت تغییر دورهٔ دستگاه انجام می‌گیرد برانگیخته و ثابت نگه‌داشته می‌شوند.

این روش برانگیزش نوسان‌ها را می‌توان با آونگ ساده، مثلاً گلولهٔ آویزان از نخ، به آسانی به‌وجود آورد. نخ باید از داخل یک حلقهٔ سیمی ثابت بگذرد. انتهای آزاد نخ را باید با دست به‌طور دوره‌ای کشید و وزنه را بالا و پایین برد، یعنی طول آونگ را به‌طور دوره‌ای بلند و کوتاه کرد (شکل ۲). اگر طول آونگ چنان تغییر کند که هنگام گذر آونگ از وضع قائم (یا نزدیک به آن) کوتاه‌تر شود، یعنی دوبار در یک دوره و نیز دوبار در طول هر دوره، هنگامی که آونگ در مکان‌های حدی (یا نزدیک به آن) قرار دارد، طول آن بلندتر شود، دامنهٔ نوسان‌ها افزایش می‌یابد. این امر به این معناست که انرژی آونگ در حال نوسان افزایش یافته است.

این انرژی را از کجا به‌دست می‌آید؟

در حالت مورد بررسی، انرژی از کار انجام شده توسط عضلات دست گرفته می‌شود. بدیهی است، هرگاه طول آونگ را هنگام گذر از وضع قائم به اندازهٔ L کوتاه‌تر کنیم، وزنه به جرم m را به اندازهٔ ارتفاع L بالا برده‌ایم و به آونگ مقدار mgL انرژی داده‌ایم. افزایش طول آونگ هنگامی صورت می‌گیرد که به اندازهٔ زاویهٔ بیشینهٔ منحرف شده باشد. در این حالت، وزنه به اندازهٔ طول $L\cos\alpha$ پایین‌تر می‌آید، و در نتیجه آونگ مقدار $mgL\cos\alpha$ انرژی از دست می‌دهد. اختلاف بین انرژی‌های گرفته و پس داده شده برابر است با $mgL(1-\cos\alpha)$. این درست انرژی‌ای است که در هر نیم‌دوره به آونگ داده می‌شود و باعث می‌شود دامنه افزایش یابد. باید به خاطر داشت که هر چه زاویهٔ بیشینه بزرگ‌تر (به $\frac{\pi}{2}$ نزدیک‌تر) باشد، مقدار انرژی‌ای که آونگ در نیم‌دوره دریافت می‌کند زیادتر است، یعنی دامنه به میزان بیشتری بزرگ‌تر می‌شود. ج

بیشتر شدن دامنهٔ تاب نیز با همین سازو کار عمل می‌کند : به ازای کاری که با بلند شدن تاب‌بازها (بالا بردن مرکز جرمشان) به هنگام گذر از وضع قائم و نشستن آنها به هنگام انحراف بیشینهٔ تاب انجام می‌گیرد انرژی تاب افزایش می‌یابد. چون این اثر به تغییر طول آونگ، یعنی پارامتر تعیین‌کنندهٔ دورهٔ دستگاه، متکی است، چنین تأثیری به ***تأثیر پارامتری*** معروف است. پیداست که وقتی اثر پارامتری موجب افزایش دامنهٔ نوسان‌ها می‌شود که بسامد این اثر دو برابر بسامد طبیعی دستگاه باشد.

فصل ۳: نوسان و موج

تمرین ۳ـ۳

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 نوسان‌های 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 تندید در بسامد مشخصی رخ می‌دهد، اما دامنهٔ نوسان در تزدیک این بسامد همچنان بزرگ است).

پرسش ۳ـ۲

در یی 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.

۳ـ۵ 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 دورترند، و به این ترتیب آنچه را که موج می‌نامند به‌وجود می‌آید. موج‌ها را عموماً به دو دسته تقسیم‌بندی می‌کنند: موج‌های مکانیکی و موج‌های الکترومغناطیسی. موج‌های مکانیکی ــ مانند موج‌های روی سطح آب (شکل ۳ـ۱۰) 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.

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 ۳ـ۱۱ 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 سر آزاد فنر را مانند شکل ۳ـ۱۲ 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

شکل ۳ـ۱۰ با پرتاب سنگ در آب، فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌هایی دایره‌ای شکل بر سطح آب پخش می‌شوند.

شکل ۳ـ۱۱ نمایش ایجاد موج در یک فنر بلند کشیده

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

۶۹

پاسخ تمرین ۳ــ۳

لازم به توضیح است که در کتاب‌ها شرط تشدید عموماً به صورت برابری بسامدهای زاویه‌ای بیان می‌شود و اگر بسامد زاویه‌ای طبیعی ωی دستگاه با بسامد زاویه‌ای وادارندهٔ ω_d برابر شود، تشدید رخ می‌دهد: $\omega_d = \omega$. در این تمرین نیز (به‌درستی) گسترهٔ بسامدهای زاویه‌ای آونگ وادارنده داده شده است و باید بررسی کنیم که آیا بسامدهای زاویه‌ای آونگ‌ها در این گستره قرار می‌گیرد یا خیر.

$\omega = ۲\pi / T$ بسامد زاویه‌ای است که در آن $T = ۲\pi\sqrt{L/g}$ دورهٔ نوسان آونگ ساده است. همان‌طور که گفتیم برای آنکه آونگ‌ها به‌شدت به نوسان درآیند باید بسامد زاویه‌ای آنها در گسترهٔ بسامدهای زاویه‌ای داده شده قرار گیرد. اگر بررسی کنید درمی‌یابید فقط دو تا از آونگ‌های داده شده دارای مقادیر ωی مناسب برای تشدید هستند. آونگ با طول ۰/۸۰m که برای آن ω چنین می‌شود:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}} = \sqrt{\frac{۹/۸\ m/s^۲}{۰/۸۰m}} = ۳/۵\,rad/s$$

آونگ با طول ۱/۲m که برای آن ω چنین می‌شود:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}} = \sqrt{\frac{۹/۸m/s^۲}{۱/۲m}} = ۲/۸۶ \approx ۲/۹\,rad/s$$

اگر بسامد زاویه‌ای را برای سه آونگ دیگر بررسی کنیم، به ترتیب برای آونگ‌های به طول ۰/۴۰m، ۲/۸m و ۳/۵m به مقادیر ۴/۹rad/s، ۱/۹rad/s و ۱/۷rad/s می‌رسیم که در گسترهٔ بسامدهای زاویه‌ای داده شده نیستند و بنابراین به تشدید نمی‌انجامند. البته با توجه به تذکر داده شده در صورت تمرین، درمی‌یابیم آونگ به طول ۲/۸m نیز با دامنهٔ نسبتاً بزرگی به نوسان درمی‌آید، گرچه بنا به تعریف، برای آن تشدید رخ نداده است.

پاسخ پرسش ۳ــ۲

این رویداد به این دلیل رخ داد که بسامد زاویه‌ای امواج لرزه‌ای در خاک شهر مکزیکوسیتی تقریباً برابر با بسامد زاویه‌ای طبیعی ساختمان‌های نیمه‌بلند بود، در حالی که ساختمان‌های کوتاه‌تر (با بسامدهای زاویه‌ای طبیعی بیشتر) پابرجا ماندند. در ادامه به توضیح بیشتر این رویداد می‌پردازیم. امواج لرزه‌ای حاصل از این زمین‌لرزه وقتی به مکزیکوسیتی در فاصلهٔ ۴۰۰ کیلومتری از محل وقوع زمین‌لرزه رسیدند چنان ضعیف شده بودند که واقعاً نمی‌توانستند موجب چنان تخریب گسترده‌ای شوند. ولی بخش عمده‌ای از مکزیکوسیتی روی بستر یک دریاچهٔ قدیمی بنا شده است که خاک آن بر اثر اختلاط با آب، نرم است. گرچه دامنهٔ امواج لرزه‌ای در زمین سخت‌تر مسیر تا مکزیکوسیتی کوچک بود، ولی دامنهٔ شتاب این امواج به بزرگی $۰/۲۰g$ (۰/۲۰ شتاب گرانی)، و بسامد زاویه‌ای آنها در حول و حوش ۳rad/s بود که این تقریباً برابر با بسامد زاویه‌ای طبیعی ساختمان‌های نیمه‌بلند شهر بود.

پرسش پیشنهادی

۱ چرا یک شیرجه رو، پیش از آنکه از تختهٔ پرش شیرجه بزند، چندبار روی تختهٔ پرش جست و خیز می‌کند؟

پاسخ : می‌دانیم تختهٔ پرش بسامدی طبیعی دارد که اگر خم شود و رها گردد با آن بسامد به نوسان درمی‌آید. اکنون اگر شناگری بر روی تخته قرار گیرد و شروع به جستن کند، تخته پرش ناچار است همراه با این جستن‌ها نوسان کند. در آغاز که دامنهٔ نوسان‌های تخته کوچک است اصطلاحاً می‌گویند تخته تحت *ارتعاشات زوری* به نوسان واداشته شده است. وقتی شناگر می‌کوشد تا برای شیرجه رفتن به ارتفاع بالاتری برسد باید بسامد نیروی وارد شده به گونه‌ای باشد که برابر بسامد طبیعی تخته گردد. در این حالت است که دامنهٔ نوسان‌های تختهٔ پرش بسیار بزرگ می‌شود و به عبارتی تخته به تشدید درمی‌آید.

فعالیت‌های پیشنهادی

۱ آونگ‌های بارتونی متشکل از شش آونگ با بسامدهای طبیعی ۰/۵۰Hz، ۰/۷۵Hz، ۱/۰ Hz، ۱/۲Hz، ۱/۵Hz و ۲/۰Hz بسازید و فعالیت ۳ـ۳ را با آن بیازمایید.

۲ ساعت‌های کوارتز نیز برمبنای پدیدهٔ تشدید کار می‌کنند. کوارتز این ویژگی را دارد که با اعمال ولتاژ خم می‌شود. حال اگر تپ‌های ولتاژ طوری تنظیم شوند که با بسامد طبیعی کوارتز همنوا گردند، بلور کوارتز را به نوسان وامی‌دارند. دربارهٔ این ساعت‌ها تحقیق کنید.

پیش از آموزش این مبحث خوب است از دانش‌آموزان بخواهید مفهوم موج را براساس دانسته‌هایشان به بحث بگذارند. بحث‌های مطرح شده توسط دانش‌آموزان به شما کمک می‌کند تا با دانسته‌های قبلی و همچنین برداشت‌های بعضاً نادرست آنها نسبت به مفهوم موج آشنا شوید و بکوشید تدریس خود را مبتنی بر آن دانسته‌ها و با رفع برداشت‌های نادرست آنها انجام دهید.

فصل ۳: نوسان و موج

تمرین ۳ـ۳

طول تمدادی آونگ ساده که از میله‌ای افقی آویزان‌اند، عبارت‌اند از، ۰/۴۰m ، ۰/۸۰m ، ۱/۲m ، ۲/۴m ، 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 ۳ـ۲

در یی 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.

۳ـ۵ 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 دورترند، و به این ترتیب آنچه را که موج می‌نامند به‌وجود می‌آید. موج‌ها را عموماً به دو دسته تقسیم‌بندی می‌کنند: موج‌های مکانیکی و موج‌های الکترومغناطیسی. موج‌های مکانیکی ــ مانند موج‌های روی سطح آب (شکل ۳ـ۱۰) 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.

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 ۳ـ۱۱ 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 سر آزاد فنر را مانند شکل ۳ـ۱۲ 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

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

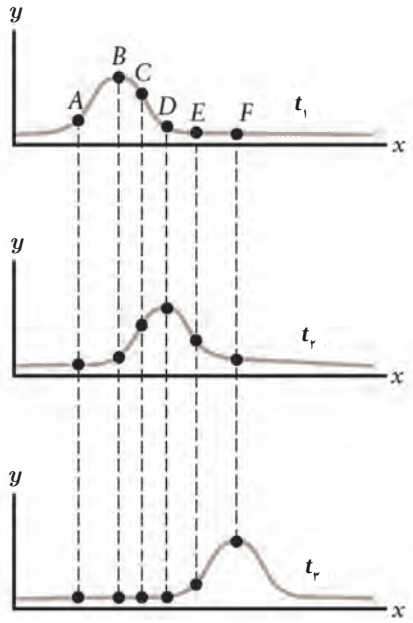
شکل ۳ـ۱۰ با پرتاب سنگ در آب، فرورفتگی‌ها و برامدگی‌هایی دایره‌ای شکل بر سطح آب پخش می‌شوند.

شکل ۳ـ۱۱ نمایش ایجاد موج در یک فنر بلند کشیده

۶۹

حتماً توجه داده شود که وجود محیط کشسان برای موج‌های مکانیکی و نه الکترومغناطیسی لازم است. در حالت کلی، هرگاه به طریقی ارتعاشی در ناحیه‌ای از فضا موجب پدید آمدن ارتعاش‌های پی‌درپی دیگری شود که از محل ارتعاش دورتر و دورتر می‌روند موج ایجاد می‌شود. به عبارتی، انتشار موج معادل با انتقال تأخیری حرکت نوسانی از نقطه‌ای از محیط به نقطهٔ دیگری در محیط است. در مورد موج‌های مکانیکی باید محیطی کشسان داشته باشیم و موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار خود اصلاً به محیط مادی نیاز ندارند که بخواهد کشسان یا غیرکشسان باشد. آنچه مهم است پیوستگی نواحی مختلف محیط است. تحلیل مبتنی بر انتشار نوسان‌ها در مورد ارتعاش‌های مکانیکی بدین ترتیب است که حرکت ارتعاشی ذرات محیط به یکدیگر منتقل می‌شود. مثلاً دایره‌های پخش شده روی سطح آب که در آن سنگی انداخته می‌شود ناشی از پیوستگی بین نواحی مجاور روی سطح آب است، و یا انتشار صوت به خاطر ویژگی‌های کشسان هوای جو است. امواج لرزه‌ای نیز که در زمین‌لرزه‌ها انتشار می‌یابند، در واقع انتشار ارتعاش پوستهٔ زمین از مرکز ناحیهٔ زمین‌لرزه است. اما در مورد امواج الکترومغناطیسی، این امواج، نوسان‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را که توسط بارها و جریان‌ها تولید شده‌اند از ناحیه‌ای از فضا به ناحیه‌ای دیگر منتقل می‌کنند. پیوستگی بین نواحی مجاور در اینجا ناشی از آن است که هر ارتعاش میدان الکتریکی موجب پدید آمدن یک میدان مغناطیسی می‌شود و نیز هر ارتعاش میدان مغناطیسی موجب پدید آمدن یک میدان الکتریکی می‌شود.

خوب است به تمایز بین تپ و موج اشاره شود. هردوی اینها به آشفتگی در محیط اشاره دارند. اما موج آشفتگی‌ای پیوسته است، درحالی‌که تپ یک آشفتگی تنها است. خوب است به‌عنوان مثالی مفهومی نقش یک تپ را در سه زمان مختلف نشان دهید. اشاره کنید که تپ به طرف راست در حال حرکت است و هنگام حرکت، ذره‌های طناب را به بالا و پایین به نوسان درمی‌آورد. نقش تپ هنگام حرکت تغییری نمی‌کند و هر ذرهٔ طناب پس از نوسان به حالت تعادل خود بازمی‌گردد. در واقع کشش موجود در طناب پس از عبور تپ است که آن را به شکل خط راست بازمی‌گرداند. بنابراین در اینجا همچنین خوب است حتماً اشاره شود چه در مورد تپ و چه موج، حتماً طناب یا فنر باید تحت کشش باشند.



فصل ۳: نوسان و موج

تمرین ۳ـ۳

طول تعدادی آونگ ساده که از میله‌ای افقی آویزان‌اند، عبارت‌اند از، ۰/۴۰m، ۰/۸۰m، ۱/۲۰m، ۲/۸۰m، ۳/۵۰m. 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 تندید در بسامد مشخصی رخ می‌دهد، اما دامنهٔ نوسان در نزدیک این بسامد همچنان بزرگ است).

پرسش ۳ـ۲

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.

۳ـ۵ 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 دورترند، و به این ترتیب آنچه را که موج می‌نامند به‌وجود می‌آید. موج‌ها را عموماً به دو دسته تقسیم‌بندی می‌کنند: موج‌های مکانیکی و موج‌های الکترومغناطیسی. موج‌های مکانیکی ــ مانند موج‌های روی سطح آب (شکل ۳ـ۱۰) 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.

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 ۳ـ۱۱ 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 سر آزاد فنر را مانند شکل ۳ـ۱۲ 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

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

شکل ۳ـ۱۰ــ با پرتاب سنگ در آب، فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌هایی دایره‌ای شکل بر سطح آب پخش می‌شوند.

شکل ۳ـ۱۱ تمایش ایجاد موج در یک فنر بلند کشیده.

۶۹

فیلم

در این فیلم انتشار موج عرضی (و نیز بازتاب آن) را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم انتشار موج طولی (و نیز بازتاب آن) را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم نمایشی از انتشار موج‌های طولی و عرضی را می‌بینید.

فیزیک ۳

راستای توسان هر جزء فنر

راستای انتشار موج

شکل ۳ـ۱۳ در حالی که موج به سمت راست منتشر می‌شود، هر جزء فنر عمود بر راستای انتشار موج، به بالا و پایین توسان می‌کند.

شکل ۳ـ۱۴ نمایش ایجاد یک تپ طولی در یک فنر بلند کشیده شده

راستای توسان هر جزء فنر

راستای انتشار موج

شکل ۳ـ۱۴ در حالی که موج به سمت راست حرکت می‌کند، هر حلقهٔ فنر همراستا با حرکت موج به جب و راست توسان می‌کند. به‌طوری که ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی به‌طور متناوب در طول فنر ظاهر می‌شود.

فنر 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 توسان می‌کند دقت کنید درمی‌یابید جابه‌جایی هر جزء توسان‌کننده‌ای 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، سر آزاد فنر را به جای اینکه به بالا و پایین یا به جب و راست حرکت دهید، به‌سرعت به جلو و عقب ببرید، یک تپ در طول فنر به راه می‌افتد (شکل ۳ـ۱۳) 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 جب و راست توسان می‌کند دقت کنید، درمی‌یابید جابه‌جایی هر جزء توسان‌کننده‌ای از فنر در راستای حرکت موج است (شکل ۳ـ۱۴). به همین دلیل است که به جنین موجی، موج طولی می‌گویند.

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 موج 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 (جسمهٔ) توسانی نیاز دارید و موج از این جسمه دور می‌شود، و اگر جسمه به‌طور هماهنگ ساده توسان کند، اجزای محیط حول نقطهٔ تعادل خود با همان بسامد جسمه توسان می‌کنند.

پرسش ۳ـ۳

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 بلند کشیده شده، این ویژگی را توضیح دهید.

۳ـ۶ مشخصه‌های موج

برای مطالعهٔ برخی از مشخصه‌های موج از وسیله‌ای موسوم به *تنت موج*[1] استفاده می‌شود. طرح ساده‌ای از این وسیله در شکل ۳ـ۱۵ نشان داده شده است. این وسیله شامل یک تنت شیشه‌ای کم‌عمق و یک توسان‌ساز است. یک راه مشاهدهٔ رفتار موج، استفاده از سایه‌ای است که توسط لامب از سطح آب داخل تنت بر ورقهٔ کاغذی زیر تنت تشکیل می‌شود. برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های موج

لامب

توسان‌ساز

تنت موج

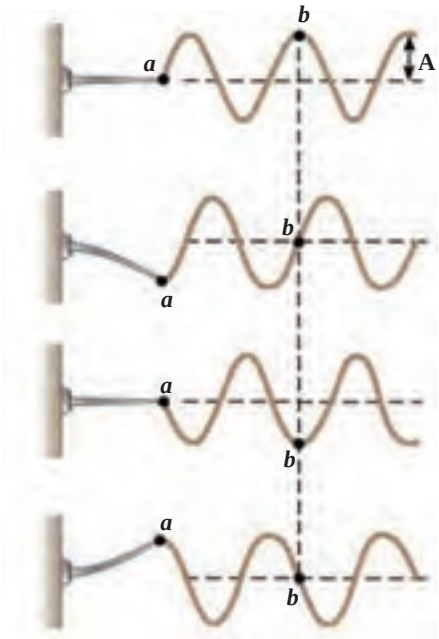
کاغذ سفید

شکل ۳ـ۱۵ طرحی از دستگاه تنت موج

۱ـ Ripple Tank

۷۰

خوب است در مورد چگونگی انتقال انرژی موج مکانیکی پیش‌رونده اشاره شود که برای تولید موج مکانیکی، باید نیرویی بر بخشی از محیط کشسان وارد شود. نقطه‌ای که به آن نیرو وارد می‌شود حرکت می‌کند و در نتیجه روی محیط کار انجام می‌شود. با انتشار موج، هر بخش از محیط نیرویی وارد می‌کند و بدین ترتیب بر بخش مجاور خود کار انجام می‌دهد. به این روش که موج می‌تواند انرژی را از یک ناحیهٔ محیط کشسان به ناحیهٔ دیگر آن محیط انتقال دهد.



هرچند به کرّات در متن درس اشاره شده است، با این حال خوب است همچنان در کلاس به این خطای رایج که برخی دانش‌آموزان می‌اندیشند با انتشار موج، ذره‌های محیط نیز از جایی به جای دیگر منتقل می‌شوند، اشاره کنید. به عبارت دیگر، دانش‌آموزان اغلب حرکت نوسانیِ ذره‌های محیط کشسان حول نقطهٔ تعادل را با حرکت موج اشتباه می‌گیرند. ارجاع به شکل ۳ـ۱۹ کتاب و یا شکل روبه‌رو ــ با توجه دادن دانش‌آموزان به نقطهٔ b محیط ــ می‌تواند راهگشا باشد.

فیزیک ۳

فنر موجب پایین کشیده شدن بخش‌های بعدی فنر می‌شود، و بدین ترتیب آشفتگی‌ای در شکل فنر ایجاد می‌شود که با تندی[1] در طول فنر حرکت می‌کند. اگر دست خود را بیایی به بالا و پایین حرکت دهید یک موج پیوسته با تندی[1] 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، سر 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 ۳ـ۱۳) و اگر دست خود را بیایی به جلو و عقب حرکت دهید یک موج طولی پیوسته با تندی[1] 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 ۳ـ۱۴). به همین دلیل است که به جنین موجی، موج طولی می‌گویند.

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 موج 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.

راستای نوسان هر جزء فنر

راستای انتشار موج

شکل ۳ـ۱۳ در حالی که موج به سمت راست منتشر می‌شود هر جزء فنر عمود بر راستای انتشار موج، به بالا و پایین نوسان می‌کند.

شکل ۳ـ۱۴ نمایش ایجاد یک تپ طولی در یک فنر بلند کشیده شده

راستای نوسان هر جزء فنر

راستای انتشار موج

شکل ۳ـ۱۴ در حالی که موج به سمت راست حرکت می‌کند، هر حلقهٔ فنر همراستا با حرکت موج به چپ و راست نوسان می‌کند، به‌طوری که ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی به‌طور متناوب در طول فنر ظاهر می‌شود.

پرسش ۳ـ۳

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 بلند کشیده شده، این ویژگی را توضیح دهید.

۳ـ۶ مشخصه‌های موج

برای مطالعهٔ برخی از مشخصه‌های موج از وسیله‌ای موسوم به *تشت موج*[1] استفاده می‌شود. طرح ساده‌ای از این وسیله در شکل ۳ـ۱۵ 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 کاغذی زیر تشت تشکیل می‌شود. برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های موج

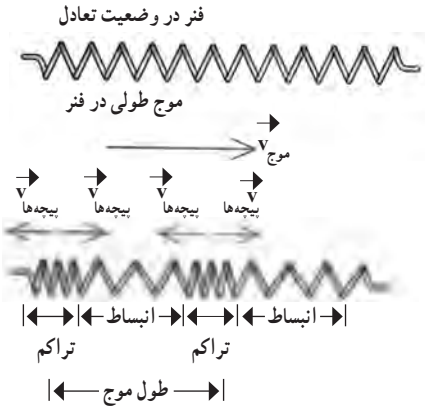
لامپ — نوسان‌ساز — تشت موج — کاغذ سفید

شکل ۳ـ۱۵ طرحی از دستگاه تشت موج

۱ـ Ripple Tank

۷۰

در اینجا خوب است با رسم شکل‌هایی واضح‌تر و اندکی اغراق‌آمیز ــ مانند شکل زیر ــ نشان دهید پیچه‌های فنر چگونه موازی با جهت حرکت موج در محیط، به عقب و جلو نوسان می‌کنند.



در اینجا می‌توان به‌عنوان اطلاعات عمومی به ماشین‌های موج و فعالیت‌های پیشنهادی ۲ اشاره کرد.

فیلم

در این فیلم یک ماشین سازندهٔ موج را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم حرکت یک تپ طولی در فنر اسلینکی را می‌بینید.

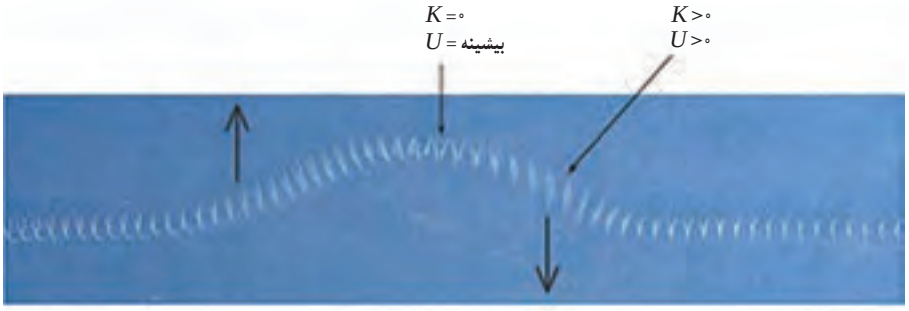
پاسخ پرسش ۳ـ۳

همان‌طور که در متن کتاب آمده است وقتی یک سر فنر بلند کشیده شده‌ای را به‌سرعت به جلو و عقب تکان دهیم یک تپ طولی در فنر به حرکت در می‌آید. این تپ که در طول فنر به حرکت می‌افتد، انرژی را از یک سر فنر به سر دیگر آن انتقال می‌دهد. توجه کنید که در محل تپ، فنر دارای انرژی جنبشی (ناشی از حرکت به جلو و عقب اجزا) و انرژی پتانسیل (ناشی از تغییر کشیدگی اجزای فنر در محلّ عبور تپ) است. بنابراین تپ موج پیش‌رونده با خود انرژی حمل می‌کند و این انرژی از ناحیه‌ای به ناحیهٔ دیگر منتقل می‌شود. در واقع کار مکانیکی ما در جلو و عقب بردن فنر است که انرژی تپ را فراهم می‌سازد. خوب است به عنوان پرسشی تکمیلی همین پرسش را برای تپی عرضی نیز بررسی کنید.

پرسش پیشنهادی

پرسش ۳ـ۳ را برای تپ عرضی پاسخ دهید. به عبارتی، چگونگی انتقال انرژی برای یک تپ عرضی را توضیح دهید.

پاسخ : برای یک تپ عرضی، وقتی بخشی از فنر از موضع تعادل به بالای تپ حرکت می‌کند، آن بخش هم انرژی جنبشی (ناشی از حرکت در جهت تپ) و انرژی پتانسیل کشسانی (ناشی از تغییر کشیدگی) دارد. منتها توجه کنید در محل بالای تپ، اجزای فنر به‌طور لحظه‌ای ساکن‌اند و فنر تنها انرژی پتانسیل کشسانی دارد و بدین ترتیب دوباره به وضعیت تعادل بازمی گردد که در آنجا هم انرژی جنبشی و هم پتانسیل دارد. شکل زیر این تغییر انرژی را نشان می‌دهد. در این شکل، پیکانه‌ها، جهت حرکت اجزای فنر را نشان داده‌اند.



تمرین پیشنهادی

۱ فرض کنید یک تپ عرضی با دامنهٔ ۴۵cm ایجاد می‌کنید. ۰/۸۰s طول می‌کشد تا این تپ دوباره به وضعیت تعادل فنر بازگردد. اگر تپ با تندی ۲/۵m/s حرکت کند، طول تپ چقدر است؟

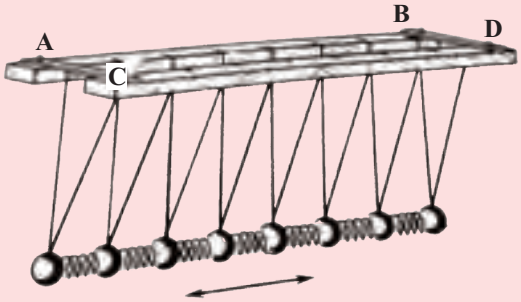
پاسخ : طول تپ از رابطه $l = v\Delta t$ به‌دست می‌آید :

$$l = v\Delta t = (۲/۵\text{m/s})\,(۰/۸۰\text{s}) = ۲/۰\text{m}$$

فعالیت‌های پیشنهادی

۱ اسبابی مطابق شکل الف را درنظر بگیرید که طرح آن در شکل ب رسم شده است. این اسباب از دو قطعهٔ AB و CD تشکیل شده است که به دو میلهٔ عرضی AC و BD لولا شده‌اند. گوی‌ها که توسط فنرهایی به هم متصل شده‌اند به‌طوری از قطعه‌ها آویزان شده‌اند که هرگوی به دو رشته نخ که سرهای بالایی آنها به ترتیب AB و CD قرار دارند، محکم شده‌اند. بسته به اینکه $ABCD$ مطابق شکل چارچوبی مستطیلی باشد و یا اینکه قطعه‌های AB و CD باهم در تماس باشند، گوی‌ها می‌توانند فقط در یک امتداد خاص نوسان کنند. تحقیق کنید چگونه این اسباب آزمایشگاهی می‌تواند موج‌های طولی و عرضی را مدل‌سازی کند.

الف) تصویری واقعی از اسباب آزمایش



ب) طرحی از این اسباب آزمایش

۲ ماشین سازندهٔ موج (Wave making machine) ماشین‌های سازندهٔ موج ابزاری جالب برای نمایش ایجاد موج هستند. مثلاً در شکل روبه‌رو شخصی با به نوسان درآوردن یک اسباب چوبی خودساخته، موجی پیشرونده ایجاد کرده است. با رجوع به وب‌گاه PracticalPhysics.org/ Building– wave– machine.html دانش‌آموزان را ترغیب کنید ماشین مشابه‌ای بسازند. فیلمی از این ماشین سازندهٔ موج در وب‌گاه گروه فیزیک گذاشته شده است.

فصل ۳: نوسان و 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 دَرّه (باستیغ) گفته می‌شود. فاصلهٔ بین دو برآمدگی یا دو فرورفتگی مجاور، طول‌موج نامیده می‌شود و آن را با λ نشان می‌دهند (شکل ۳ـ۱۷). طول‌موج λ برابر با مسافتی است که موج در مدت دورهٔ تناوب نوسان چشمه طی می‌کند.

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

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 جبههٔ 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 جبههٔ موج نیز هست. بنابراین $f=\frac{1}{T}$.

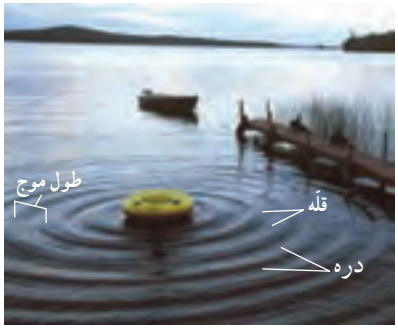
تندی انتشار موج (v): اگر جبههٔ موج در مدت Δt مسافت L را طی کند، تندی انتشار موج از رابطهٔ $v=\frac{L}{\Delta t}$ به‌دست می‌آید. از آنجا که طول‌موج λ در دورهٔ T طی می‌شود، داریم:

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

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

۷۱

خوب است در کنار شکل ۳ـ۱۶، بلافاصله شکل‌هایی مانند شکلی که در مثال ۳ـ۵ آورده شده است را نیز به دانش‌آموزان نشان دهید تا با قله‌ها، دره‌ها و طول موج برای امواج دایره‌ای آشنا شوند.

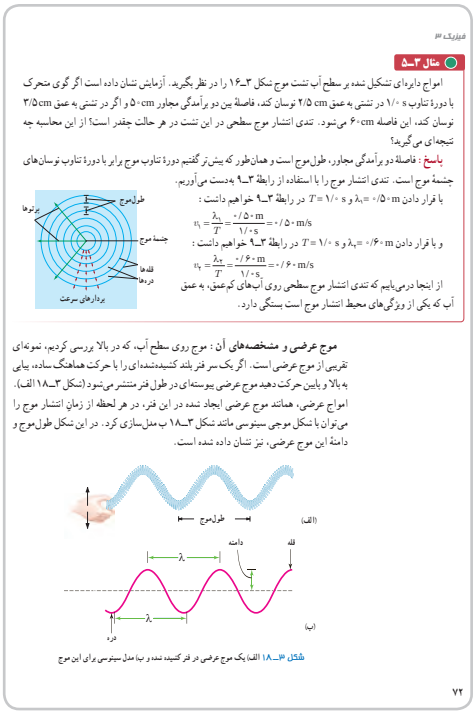


فیلم

وب‌گاه www.falsald.com/ripple شبیه‌سازی‌هایی دربارهٔ کلیهٔ آزمایش‌های ممکن با تشت موج دارد.

فیلم

در این فیلم تشکیل موج پیش‌رونده با آب را می‌بینید.



فیزیک ۳

مثال ۳ـ۵

امواج دایره‌ای تشکیل شده بر سطح آب تشت موج شکل ۳ـ۱۶ را در نظر بگیرید. آزمایش نشان داده است اگر گوی متحرک با دورهٔ تناوب ۰/۱ s در تشتی به عمق ۲/۵ cm نوسان کند، فاصلهٔ بین دو برآمدگی مجاور ۵ cm و اگر در تشتی به عمق ۳/۵ cm نوسان کند، این فاصله ۶ 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 ۳ـ۹ به‌دست می‌آوریم.

با قرار دادن $\lambda_1=0/05\,m$ و $T=0/1\,s$ در رابطهٔ ۳ـ۹ خواهیم داشت:

$$v_1=\frac{\lambda_1}{T}=\frac{0/05\,m}{0/1\,s}=0/5\,m/s$$

و با قرار دادن $\lambda_2=0/06\,m$ و $T=0/1\,s$ در رابطهٔ ۳ـ۹ خواهیم داشت:

$$v_2=\frac{\lambda_2}{T}=\frac{0/06\,m}{0/1\,s}=0/6\,m/s$$

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

برش‌های سرعت

موج عرضی و مشخصه‌های آن: موج روی سطح آب، که در بالا بررسی کردیم، نمونه‌ای تقریبی از موج عرضی است. 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 ۳ـ۱۸ 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 ۳ـ۱۸ ب مدل‌سازی کرد. در این شکل طول‌موج و دامنهٔ این موج عرضی، نیز نشان داده شده است.

شکل ۳ـ۱۸ الف) یک موج عرضی در فنر کشیده شده و ب) مدل سینوسی برای این موج

۷۲

نشان داده می‌شود تندی انتشار موج سطحی برای عمق‌های زیاد به طول موج و برای عمق‌های بینابین به هر دو عامل عمق و طول موج وابسته است. گرچه شاید مناسب‌تر باشد که این مبحث در دانستنی برای معلم مطرح می‌شد، ولی به دلیل اهمیت موضوع آن را در همین جا می‌آوریم. نظریهٔ تندی انتشار موج‌های سطحی بر سطح آب بیش از ۱۰۰ سال است که شناخته شده است. هوریس *لمب*[1] (۱۹۳۴ـ ۱۸۴۹م.) ریاضی‌دان و فیزیک‌دان انگلیسی در سال ۱۸۹۵ میلادی، در کتاب *هیدرودینامیک*[2] خود رابطه‌ای کلی برای تندی این امواج در شرایط آرمانی به‌دست آورد که این رابطه برای عمق‌های زیاد (بزرگ‌تر از نصف طول موج) به‌صورت

$$v\approx\sqrt{g\lambda/2\pi}\,,\qquad d>\lambda/2$$

۱ـ Sir Horace Lamb

۲ـ Hydrodynamics, Horace Lamb, 6th Edition, Dover 1945.

و برای عمق‌های کم (کوچک‌تر از ۰/۰۵ طول موج) به‌صورت زیر می‌شود

$$v \approx \sqrt{gd} \qquad , \qquad d < \lambda / ۲۰$$

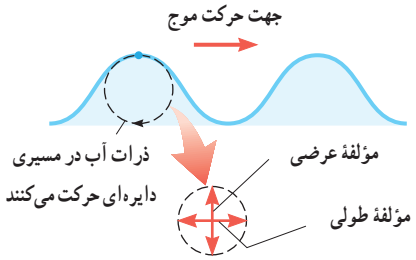
که در آنها g شتاب گرانشی است. به عبارت دیگر درمی‌یابیم تندی انتشار امواج سطحی برای عمق‌های کم با افزایش عمق زیاد می‌شود، درحالی که برای عمق‌های زیاد، این تندی نه به عمق آب، بلکه به طول موج بستگی دارد، به‌طوری که با افزایش طول موج، تندی افزایش می‌یابد. در حالت کلی این تندی از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$v \approx \sqrt{\frac{g\lambda}{۲\pi}\tanh\left(\frac{۲\pi d}{\lambda}\right)}$$

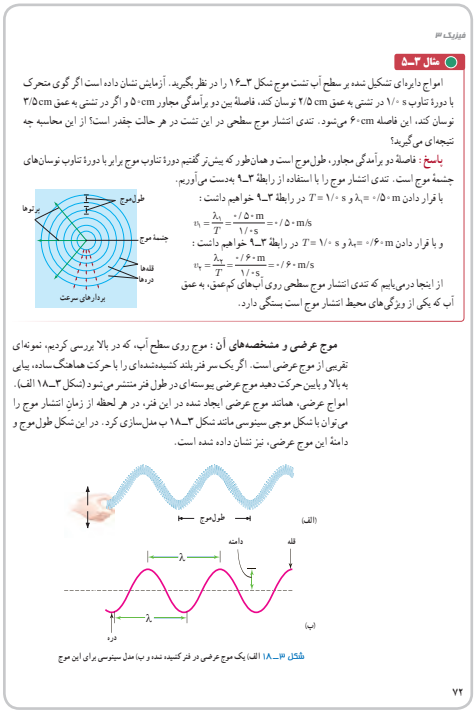
در این مبحث خواندن مقالهٔ زیر نیز خالی از لطف نیست

surface wave on water: www.phys.ust.hk/genphys/press/cityu.doc

توجه کنید موج روی سطح آب یک موج سطحی است که نه موج عرضی است و نه موج طولی؛ زیرا حرکت ذرات آب دقیقاً عمود یا موازی جهت حرکت آب نیست و در واقع دو مؤلفهٔ طولی و عرضی داریم و ذرات آب روی سطح، در مسیری تقریباً دایره‌ای حرکت می‌کنند (شکل الف). با این حال، نیم‌رخ (profile) موج در وضعیتی آرمانی مثل شکل ب، عرضی جلوه می‌کند.



(الف)



فیزیک ۳

مثال ۳ـ۵

امواج دایره‌ای تشکیل شده بر سطح آب تشت موج شکل ۳ـ۱۶ 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 ۵۰cm و اگر در تشتی به عمق ۳/۵cm نوسان کند، این فاصله ۶۰cm می‌شود. تندی انتشار موج سطحی در این تشت در هر حالت چقدر است؟ از این محاسبه چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

پاسخ : فاصلهٔ دو برآمدگی مجاور، طول موج 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 ۳ـ۹ به‌دست می‌آوریم.

با قرار دادن $\lambda_1 = ۰/۵۰\,m$ و $T = ۱/۰\,s$ در رابطهٔ ۳ـ۹ خواهیم داشت :

$$v_1 = \frac{\lambda_1}{T} = \frac{۰/۵۰\,m}{۱/۰\,s} = ۰/۵۰\,m/s$$

و با قرار دادن $\lambda_2 = ۰/۶۰\,m$ و $T = ۱/۰\,s$ در رابطهٔ ۳ـ۹ خواهیم داشت :

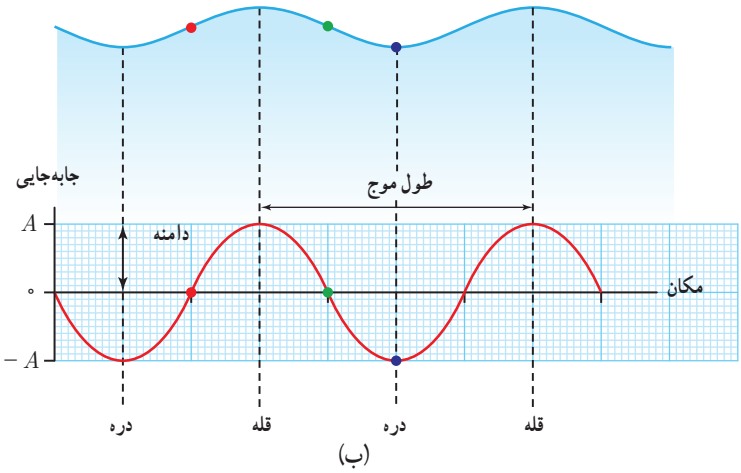
$$v_2 = \frac{\lambda_2}{T} = \frac{۰/۶۰\,m}{۱/۰\,s} = ۰/۶۰\,m/s$$

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 : موج روی سطح آب، که در بالا بررسی کردیم، نمونه‌ای تقریبی از موج عرضی است. 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 ۳ـ۱۸ الف). امواج عرضی، همانند موج عرضی ایجاد شده در این فنر، در هر لحظه از زمان انتشار موج را می‌توان با شکل موجی سینوسی مانند شکل ۳ـ۱۸ ب مدل‌سازی کرد. در این شکل طول موج و دامنهٔ این موج عرضی، نیز نشان داده شده است.

شکل ۳ـ۱۸ الف) یک موج عرضی در فنر کشیده شده و ب) مدل سینوسی برای این موج

۷۲

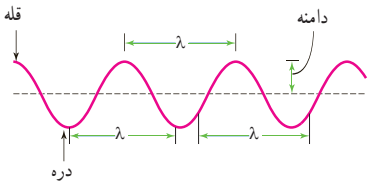


(ب)

در این فیلم حرکت دایره‌ای ذرات آب روی سطح آن را می‌بینید.

فیلم

خوب است به دانش‌آموزان گوشزد کنید که طول موج صرفاً فاصلهٔ دو قله (ستیغ) یا دو دره (پاستیغ) متوالی نیست و فاصلهٔ هر دو نقطهٔ «هم‌شکل» متوالی نیز طول موج خوانده می‌شود. مثلاً می‌توانید افزون بر دو طول موج نشان داده شده، یک طول موج دیگر را هم با رسم فاصلهٔ بین دو نقطهٔ هم‌شکل متوالی نشان دهید.



فیزیک ۳

مثال ۳ـ۵

امواج دایره‌ای تشکیل شده بر سطح آب تشت موج شکل ۳ـ۱۶ را در نظر بگیرید. آزمایش نشان داده است اگر گوی متحرک با دورهٔ تناوب ۰/۱ s در تنشی به عمق ۲/۵ cm نوسان کند، فاصلهٔ بین دو برآمدگی مجاور ۵ cm و اگر در تنشی به عمق ۳/۵ cm نوسان کند، این فاصله ۶ cm می‌شود. تندی انتشار موج سطحی در این تنشت 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 ۳ـ۹ به‌دست می‌آوریم.

با قرار دادن $\lambda_1 = 0/05\,m$ و $T = 0/1\,s$ در رابطهٔ ۳ـ۹ خواهیم داشت :

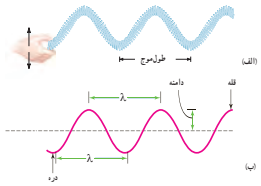
$$v_1 = \frac{\lambda_1}{T} = \frac{0/05\,m}{0/1\,s} = 0/5\,m/s$$

و با قرار دادن $\lambda_2 = 0/06\,m$ و $T = 0/1\,s$ در رابطهٔ ۳ـ۹ خواهیم داشت :

$$v_2 = \frac{\lambda_2}{T} = \frac{0/06\,m}{0/1\,s} = 0/6\,m/s$$

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 : موج روی سطح آب، که در بالا بررسی کردیم، نمونه‌ای تقریبی از موج عرضی است. 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 ۳ـ۱۸ الف). امواج عرضی، همانند موج عرضی ایجاد شده در این فنر، در هر لحظه از زمان انتشار موج را می‌توان با شکل موجی سینوسی مانند شکل ۳ـ۱۸ ب مدل‌سازی کرد. در این شکل طول‌موج و دامنهٔ این موج عرضی، نیز نشان داده شده است.



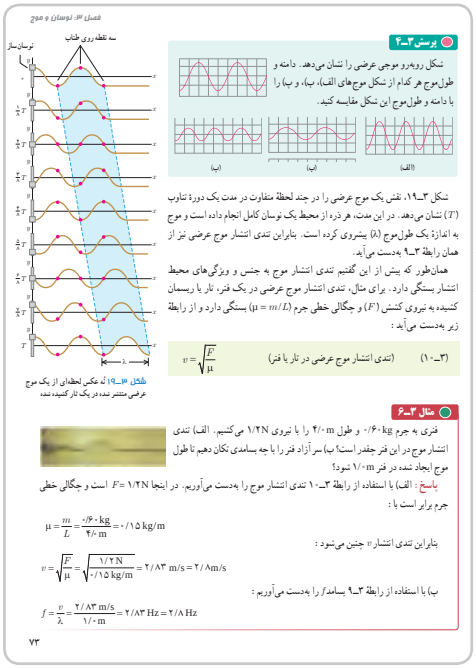
شکل ۳ـ۱۸ الف) یک موج عرضی در فنر کشیده شده و ب) مدل سینوسی برای این موج

۷۲

پاسخ پرسش ۳ــ۴

از مقیاس‌بندی طول‌موجِ موج شکل‌ها مشخص است که شکل (الف) همان دامنهٔ موج داده شده را دارد، ولی طول موج آن کوتاه‌تر است. شکل (ب) همان طول‌موجِ موج داده شده را دارد، ولی دامنهٔ آن کوتاه‌تر است. و سرانجام شکل (پ) هم طول موج و هم دامنهٔ کوتاه‌تری نسبت به موج داده شده دارد.

(توجه کنید که این شکل‌ها می‌توانستند مربوط به موج طولی نیز باشند، ولی به اقتضای اینکه تا اینجای درس به موج‌های طولی پرداخته نشده است، از آنها به عنوان موج عرضی یاد کردیم.)



فصل ۳: نوسان و موج

پرسش ۳ــ۴

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.

(الف) (ب) (پ)

شکل ۳ــ۱۹، 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 ۳ــ۹ 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:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \qquad \text{(تندی انتشار موج عرضی در تار یا فنر)} \qquad (۳ــ۱۰)$$

سه نقطهٔ روی طناب

نوسان‌ساز

شکل ۳ــ۱۹ لهٔ عکس لحظه‌ای از یک موج عرضی منتشر شده در یک تار کشیده شده

مثال ۳ــ۶

فنری به جرم ۰/۶۰kg و طول ۲/۰m 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 ۳ــ۱۰ تندی انتشار موج را به‌دست می‌آوریم. در اینجا $F = ۱/۲N$ است و چگالی خطی جرم برابر است با:

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

بنابراین تندی انتشار v چنین می‌شود:

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

ب) با استفاده از رابطهٔ ۳ــ۹ بسامد f را به‌دست می‌آوریم:

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

۷۳

برای اینکه دانش‌آموزان به درکی از تندی انتشار امواج عرضی برسند می‌توانید با تهیهٔ اسباب فعالیتی که در فعالیت پیشنهادی بخش ۳ــ۵ معرفی کردیم، از آن برای تولید امواج عرضی استفاده کنید و سپس با تغییر جرم گوی‌ها و سختی فنرها، تندی انتشار موج را در هر حالت بررسی کنیم. از آنجا که دانش‌آموزان به راحتی درخواهند یافت هرچه جرم گوی‌ها کمتر و سختی فنرها (ثابت فنرها) بیشتر باشد تندی انتشار موج بیشتر خواهد بود. از این مدل می‌توانیم به قاعده‌ای برسیم که عملاً برای اجسام کشسان برقرار است: *هر چقدر سختی جسم بیشتر و چگالی آن کمتر باشد، تندی انتشار موج بیشتر است.* بنابراین ویژگی‌های جرم و کشسانی محیط مشخص می‌کنند که یک موج به چه سرعتی در محیط حرکت می‌کند.

اثبات رابطهٔ ۳ــ۱۰ به‌سادگی با روش تحلیل ابعادی صورت می‌گیرد. همچنین در بسیاری از کتاب‌ها اشاره کرده‌اند که این رابطه برای *دامنه‌های کم* برقرار است.

در شکل ۳ــ۱۹ توجه داده شود که ناحیهٔ سایه‌دار آبی، حرکت یک طول موج از موج را نشان می‌دهد. به عبارتی، هر سه نقطهٔ نشان داده شده در شکل با پیشروی موج به اندازهٔ یک طول موج، یک نوسان کامل را انجام داده‌اند که زمان این نوسان کامل دورهٔ تناوب T است.

فیلم

در این فیلم بستگی تندی موج به کشش تار را می‌بینید.

فیلم

این فیلم بستگی تندی موج به چگالی محیط را نشان می‌دهد.

پاسخ تمرین ۳ــ۴

از رابطهٔ ۳ــ۱۰ استفاده می‌کنیم که در آن $\mu = m/L$ است.

بنابراین به ترتیب برای بالاترین و پایین‌ترین بسامد داریم :

$$v_H = \sqrt{\frac{F}{m/L}} = \sqrt{\frac{۲۲۶\text{N}}{(۰/۲۰۸\times۱۰^{-۳}\text{kg})/(۰/۶۲۸\text{m})}} = \approx$$

$$= ۸۲۶/۰\text{m/s} \approx ۸۲۶\text{m/s}$$

$$v_L = \sqrt{\frac{F}{m/L}} = \sqrt{\frac{۲۲۶\text{N}}{(۳/۳۲\times۱۰^{-۳}\text{kg})/(۰/۶۲۸\text{m})}}$$

$$= ۲۰۶/۸\text{m/s} \approx ۲۰۷\text{m/s}$$

فیزیک ۳

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 کشش 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 داماً به نوسان درمی‌آورد. ثابت می‌شود مقدار متوسط آهنگ انتقال انرژی (توان متوسط) در یک موج سینوسی برای همهٔ انواع امواج مکانیکی با موج دامنه (A)، و نیز مربع بسامد (f^2) موج متناسب است.

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 با 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. بدیهٔ 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 بدیده نتیجه گرفت که امواج الکترومغناطیسی باید لزوماً ناشی از تغییرات هم‌زمانِ میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (اصطلاحاً میدان الکترومغناطیسی) باشند. شکل ۳ــ۲۰، یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در لحظه‌ای از زمان و در نقطه‌ای دور از چشمهٔ تولید موج نشان می‌دهد.

جیمز کلارک ماکسول (۱۸۳۱ــ۱۸۷۹ م)
در شهر ادینبورگ اسکاتلند زادند. جیمز در دوران دانش‌آموزی بسیار کنجکاو بود و به ساختن اسباب‌بازی و دستگاه‌های فنی خیلی علاقه داشت و بدرش هم او را به این کار تشویق می‌کرد. وی در دانشگاه‌های ادینبورگ و کمبریج تحصیل نمود. ماکسول قدرت نگرفتی در تجزیه و تحلیل مسائل ریاضی داشت و با استفاده از روش‌های ریاضی توانست روی حلقه‌های سیاره 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.

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.

۷۴

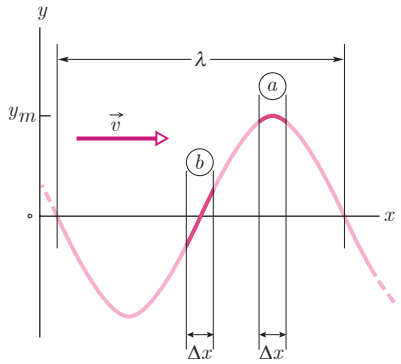
خوب است در انتهای تمرین ۳ــ۴ اشاره شود که انتشار موج‌های عرضی در طول یک تار کشیده در چگونگی کار سازهای موسیقایی زهی نظیر تار، گیتار، کمانچه، ویولن، پیانو، سنتور و . . . اهمیت دارد. در این سازها، تار توسط زخمه، آرشه، ضربه، چوب کمانه و . . . نواخته می‌شود. با سفت یا شل کردن تار، تندی انتشار موج عرضی در تار تغییر می‌کند که همان‌طور که بعداً دانش‌آموزان خواهند دید در بسامد صوت ایجاد شده از ساز زهی تأثیر مهمی دارد و اصطلاحاً به این کار، کوک کردن ساز گفته می‌شود.

فیلم

در این فیلم، ارتعاش سیم‌های گیتار را می‌بینید.

خوب است در اینجا چگونگی این انتقال انرژی در موج عرضی را بررسی کنیم. بدیهی است وقتی ریسمان را در حرکت هماهنگ ساده‌ای به‌طور عرضی به نوسان درآوریم هر جزء آن دارای انرژی جنبشی است که به سرعت عرضی آن جزء بستگی دارد. مثلاً وقتی این جزء از مکان تعادل می‌گذرد سرعت عرضی و در نتیجه انرژی جنبشی آن بیشینه است، درحالی‌که وقتی این جزء از مکان‌های بیشینهٔ جابه‌جایی (قله یا دره) می‌گذرد، سرعت عرضی و در نتیجه انرژی جنبشی آن صفر است. به همین ترتیب، انرژی پتانسیل کشسانی هر جزء ریسمان را نیز می‌توانیم بررسی کنیم. وقتی هر جزء ریسمان به‌طور عرضی نوسان کند، طول آن باید به‌طور دوره‌ای افزایش یا کاهش یابد. درست مانند فنر، به این تغییرات طول نیز یک انرژی پتانسیل کشسانی وابسته است. مثلاً وقتی یک جزء ریسمان در طول طبیعی خود باشد انرژی پتانسیل کشسانی آن برابر صفر است که این مربوط به مکان‌های بیشینهٔ جابه‌جایی (قله یا دره) است، ولی جزئی از ریسمان که از مکان تعادل می‌گذرد دارای بیشترین کشیدگی و در نتیجه بیشترین انرژی

پتانسیل کشسانی است (شکل زیر را ببینید). بنابراین هر جزء ریسمان در وضعیت تعادل هم بیشترین انرژی جنبشی و هم بیشترین انرژی پتانسیل کشسانی را دارد و در مکان‌های بیشینهٔ جابه‌جایی خود، نه انرژی جنبشی و نه انرژی پتانسیل دارد. نیروهای ناشی از کشش ریسمان دائماً انرژی را از ناحیه‌های دارای انرژی به ناحیه‌های بدون انرژی انتقال می‌دهند. بنابراین می‌گوییم موج انرژی را در طول ریسمان منتقل می‌کند.



یک عکس لحظه‌ای از موجی پیش‌رونده در ریسمان. توجه کنید که در بیشینهٔ جابه‌جایی، جزء a طول عادی خود را دارد، در حالی که در مکان تعادل، جزء b بیشترین کشیدگی را دارا است.

خوب است بدانید رابطهٔ دقیق متوسط انتقال انرژی در ریسمان به‌صورت $\overline{P} = ۲\pi^۲\mu v f^۲ A$ است، که در آن μ جرم واحد طول ریسمان، v تندی انتشار موج عرضی، f بسامد موج، و A دامنهٔ موج است.

فیزیک ۳

تمرین ۳ـ۴

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 کشش برابر ۲۲۶N قرار دارند. تندی انتشار موج برای ایجاد این دو بسامد چقدر است؟

جیمز کلارک ماکسول (۱۸۷۹ـ۱۸۳۱ م.)
در شهر ادینبورگ اسکاتلند زاده شد. جیمز در دوران دانش‌آموزی بسیار کنجکاو بود و به ساختن اسباب‌ها و دستگاه‌های قلّی خیلی علاقه داشت و هدفش هم او را به این کار تشویق می‌کرد. وی در دانشگاه‌های ادینبورگ و کمبریج تحصیل نمود. ماکسول قدرت نبوغی در تجزیه و تحلیل مسائل ریاضی داشت و با استفاده از روش‌های ریاضی توانست روی حلقه‌های بسیار از 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 کشف‌های 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 الکترومغناطیسی کار می‌کنند.

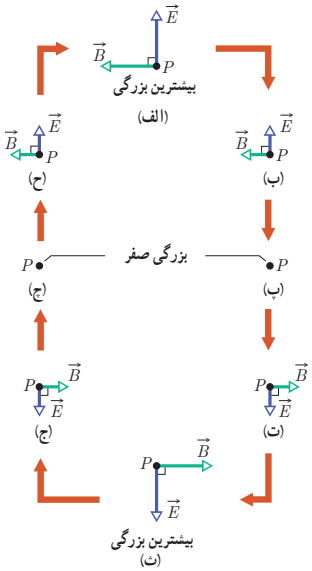
انتقال انرژی در موج عرضی: هر موجی حامل انرژی است. وقتی در یک ریسمان یا فنر کشیده موجی عرضی را ایجاد می‌کنیم، در واقع، انرژی را برای ایجاد موج در ریسمان فراهم کرده‌ایم. با انتشار موج، این انرژی به‌صورت انرژی جنبشی و پتانسیل در ریسمان انتقال می‌یابد. انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل لازم برای حرکت و کشیدگی هر جزء ریسمان با 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 ($A^۲$) و نیز مربع بسامد ($f^۲$) موج متناسب است.

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 با 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 ۳ـ۲۰، یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در لحظه‌ای از زمان و در نقطه‌ای دور از چشمهٔ تولید موج نشان می‌دهد.

شکل ۳ـ۲۰ 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.

۷۴

خوب است در اینجا تغییر میدان الکتریکی $\vec{E}$ و میدان مغناطیسی $\vec{B}$ یک موج الکترومغناطیسی سینوسی در نقطه‌ای دور، ولی در یک دورهٔ تناوب را نیز به دانش‌آموزان نشان دهیم (در چنین نقطهٔ دوری موج را **موج تخت** می‌خوانند و بحث دربارهٔ موج به مراتب ساده‌تر از نقاط نزدیک چشمه است.)



تغییرات میدان الکتریکی $\vec{E}$ و میدان مغناطیسی $\vec{B}$ در نقطه‌ای دور از یک چشمهٔ موج الکترومغناطیسی، در یک دورهٔ تناوب، توجه کنید که موج رو به خارج، عمود بر صفحهٔ شکل در حرکت است.

فیزیک ۳

تمرین ۳ـ۴

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 کشش 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 با 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.

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 انتقال توسان‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی از یک نقطهٔ فضا به نقاط دیگر و با 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 ۳ـ۲۰، یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در لحظه‌ای از زمان و در نقطه‌ای دور از چشمهٔ تولید موج نشان می‌دهد.

جیمز کلارک ماکسول (۱۸۳۱ـ۱۸۷۹ م.)
در شهر ادینبورگ اسکاتلند زاده شد. جیمز در دوران دانش‌آموزی بسیار کنجکاو بود و به ساختن اسباب‌بازی و دستگاه‌های فنی خیلی علاقه داشت و بدرش هم او را به این کار تشویق می‌کرد. وی در دانشگاه‌های ادینبورگ و کمبریج تحصیل نمود. ماکسول قدرت نگرفی 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 الکترومغناطیسی کار می‌کنند.

شکل ۳ـ۲۰ 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.

۷۴

در این فیلم‌ها چگونگی تغییر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را در حین انتشار یک موج الکترومغناطیسی می‌بینید.

فیلم

فصل ۳: نوسان و موج

چند مشخصهٔ بارز چنین موجی به قرار زیر است:

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

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

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

جهت انتشار امواج الکترومغناطیسی را می‌توان مطابق شکل ۳ـ۲۱ از قاعدهٔ دست راست تعیین کرد.

شکل ۳ـ۲۱ قاعدهٔ دست راست برای یافتن جهت انتشار موج الکترومغناطیسی

پرسش ۳ـ۵

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 ۳ـ۲۰ در نظر بگیرید.)

ماکسول با یک تحلیل ریاضی نشان داد که تندی انتشار امواج الکترومغناطیسی در خلأ از رابطهٔ $c=\frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}$ به‌دست می‌آید، که در آن μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ و برابر $4\pi\times10^{-7}\,T.m/A$ و ε_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلأ و برابر $8/85\times10^{-12}\,C^2/N.m^2$ است. مقدار c با استفاده از این رابطه $3/00\times10^8\,m/s$ می‌شود که همان تندی انتشار نور در خلأ است که پیش‌تر توسط فیزیک‌دان فرانسوی آرماند لوئیس فیزو (۱۸۱۹ـ۱۸۹۶ م.) 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 توسان‌های الکتریکی پُربسامدی، 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 ۳ـ۷

گسترهٔ بسامد نور مرئی از $4/00\times10^{14}\,Hz$ تا $7/90\times10^{14}\,Hz$ (نور قرمز) است. گسترهٔ طول‌موج‌های مربوط به نور مرئی در خلأ را بر حسب نانومتر 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 ($c=3/00\times10^8\,m/s$) است. بنابراین برای دو حد پایین و بالای طول‌موج طیف نور مرئی به‌ترتیب داریم:

$$\lambda_{\text{بنفش}}=\frac{c}{f_{\text{بنفش}}}=\frac{3/00\times10^8\,m/s}{7/90\times10^{14}\,s^{-1}}=3/80\times10^{-7}\,m=380\,nm$$

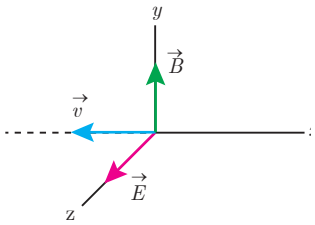
$$\lambda_{\text{قرمز}}=\frac{c}{f_{\text{قرمز}}}=\frac{3/00\times10^8\,m/s}{4/00\times10^{14}\,s^{-1}}=7/50\times10^{-7}\,m=750\,nm$$

طیف نور مرئی
۳۸۰ ۷۵۰
λ (nm)

۷۵

پاسخ پرسش ۳ـ۵

از قاعدهٔ دست راست درمی‌یابیم که جهت انتشار موج الکترومغناطیسی در جهت $-x$ است.



در اینجا خوب است دانستنی مربوط به اندازه‌گیری تندی نور توسط *فیزو* و سپس *مایکلسون* را مطرح کنید.

فصل ۳: نوسان و موج

جند منحصلهٔ بارز جنین موجی به قرار زیر است :

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

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

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

جهت انتشار امواج الکترومغناطیسی را می‌توان مطابق شکل ۳ـ۲۱ از قاعدهٔ دست راست تعیین کرد.

شکل ۳ـ۲۱ قاعدهٔ دست راست برای یافتن جهت انتشار موج الکترومغناطیسی

پرسش ۳ـ۵

در یک لحظهٔ خاص، میدان الکتریکی مربوط به یک موج الکترومغناطیسی در نقطه‌ای از فضا در جهت $+x$ و میدان مغناطیسی مربوط به آن در جهت $+y$ است. جهت انتشار در کدام سو است؟ (جهت‌های $+x$، $+y$ و $+z$ را مانند شکل ۳ـ۲۰ در نظر بگیرید.)

ماکسول با یک تحلیل ریاضی نشان داد که تندی انتشار امواج الکترومغناطیسی در خلأ از رابطهٔ $c=\frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}$ به‌دست می‌آید، که در آن μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ و برابر $4\pi\times10^{-7}T.m/A$ و ε_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلأ و برابر $8.85\times10^{-12}C^2/N.m^2$ است. مقدار c با استفاده از این رابطه $3.00\times10^8 m/s$ می‌شود که همان تندی انتشار نور در خلأ است که پیش‌تر توسط فیزیک‌دان فرانسوی آرماند لوئیس فیزو (۱۸۹۶ـ 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 ۳ـ۷

گسترهٔ بسامد نور مرئی از $4.00\times10^{14}Hz$ (نور قرمز) تا $7.90\times10^{14}Hz$ (نور بنفش) است. گسترهٔ طول‌موج‌های مربوط به نور مرئی در خلأ را برحسب نانومتر 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 ($c=3.00\times10^8 m/s$) است. بنابراین برای دو حد پایین و بالای طول‌موج طیف نور مرئی به‌ترتیب داریم :

$$\lambda_{\text{بنفش}}=\frac{c}{f_{\text{بنفش}}}=\frac{3.00\times10^8 m/s}{7.90\times10^{14}s^{-1}}=3.80\times10^{-7}m=380nm$$

$$\lambda_{\text{قرمز}}=\frac{c}{f_{\text{قرمز}}}=\frac{3.00\times10^8 m/s}{4.00\times10^{14}s^{-1}}=7.50\times10^{-7}m=750nm$$

طیف نور مرئی

۳۸۰ ۷۵۰

λ (nm)

۷۵

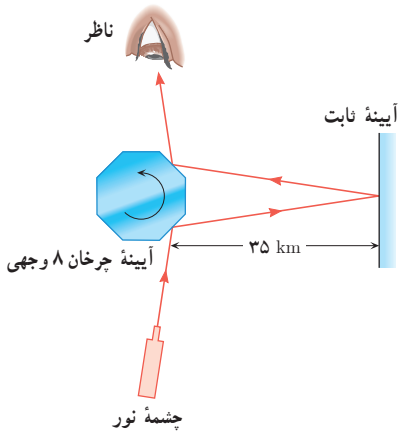
خوب است اشاره کنید تأیید تجربی نظریهٔ ماکسول به میدان‌های با شدت کافی بزرگ نیاز دارد و لازمهٔ بزرگی این میدان‌ها آن است که نوسان‌های الکتریکی و مغناطیسی با بسامد بسیار زیادی تولید شود. مثلاً بسامد برق شهر (۵۰Hz) برای چنین آزمایش‌هایی مناسب نیست و به بسامدهای بسیار بالاتری نیاز است.

دانستنی

اندازه‌گیری تندی نور

یک روش قدیمی برای اندازه‌گیری تندی نور، استفاده از چرخ دندانه‌دار چرخانی است. *آرماندلوئیس فیزو* (۱۸۹۶ ـ ۱۸۱۹م.) فیزیکدان فرانسوی، از این روش برای اندازه‌گیری تندی نور استفاده کرد. او در سال ۱۸۴۹ میلادی، مانند شکل ۱ باریکه نوری را با عبور از یکی از شکاف‌های چرخ دندانه‌دار به‌سوی آینه‌ای در فاصلهٔ دور گسیل کرد. او تندی زاویه‌ای چرخ (زاویه‌ای که چرخ در یک ثانیه می‌چرخد) را به‌گونه‌ای تنظیم کرد که با باریکهٔ نور درست در زمانی به چرخ بازگردد که با نخستین شکاف بعدی مواجه شود و بدین ترتیب ناظر برای نخستین بار باریکهٔ بازتابیدهٔ نور را ببیند. با توجه به معلوم بودن تعداد دندانه‌های چرخ، فاصلهٔ چرخ از آینه و نیز تندی زاویه‌ای چرخ در این حالت، او توانست با یک محاسبهٔ ساده تندی نور را ۳۱۳۰۰۰ km/h به‌دست آورد. بعداً ژان فوکو (۱۸۶۸ ـ ۱۸۱۹ م.) با انجام تغییراتی در این آزمایش، مقدار دقیق‌تری برای تندی نور به‌دست آورد. اما مقدار دقیق‌تر تندی نور توسط فیزیک‌دان آمریکایی *آلبرت مایکلسون* (۱۹۳۱ ـ ۱۸۵۲م.) به‌دست آمد. او توسط چینش آزمایشگاهی‌ای که در شکل ۲ نشان داده شده است، باریکهٔ نور لیزری را به سمت آینهٔ ۸ وجهی چرخانی گسیل کرد که این نور پس از بازتاب از آینه‌ای ثابت، واقع در کوه *سن آنتونی یو* که در فاصلهٔ ۳۵km از آینهٔ چرخان قرار داشت به وجه دیگری از آینهٔ چرخان برخورد کرد. او به ازای کمترین تندی زاویه‌ای چرخش آینه که ناظر می‌توانست باریکه بازتابیده از آینهٔ چرخان را ببیند، تندی نور را در سال ۱۹۲۶، برابر با $c=(2.99796\pm0.00004)\times10^8 m/s$ به‌دست آورد.

شکل ۱ـ طرحی از چینش آزمایش فیزو



شکل ۲ــ طرحی از چینش آزمایش مایکلسون

پاسخ تمرین ۳ــ۵

رابطه‌ای که باید استفاده کنیم رابطهٔ ۳ــ۹ ($v = \lambda f$) است که برای امواج الکترومغناطیسی باید به جای v از تندی نور ($c=۳/۰۰\times۱۰^{۸}\,m/s$) استفاده کنیم. از آنجا برای بسامد f خواهیم داشت:

$$f=\frac{c}{\lambda}=\frac{c}{۴L}=\frac{۳/۰۰\times۱۰^{۸}\,m/s}{۴(۸/۵\times۱۰^{-۲}\,m)}=۸۸۲\ MHz\approx ۸/۸\times۱۰^{۸}\,Hz$$

خوب است در اینجا دانستنی مربوط به آنتن‌ها را ارجاع دهید.

فیزیک ۳

تمرین ۳ــ۵

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 ۳ــ۴

مطابق شکل روبه‌رو یک گوشی تلفن همراه را در یک محفظهٔ تخلیهٔ هوای نیمه‌ای 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 حالی که 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 ۳ــ۲۲). 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 ۳ــ۲۱ طیف امواج الکترومغناطیسی

۷۶

فیلم

در این فیلم طرحی از ایجاد امواج الکترومغناطیسی توسط یک آنتن را می‌بینید.

پاسخ فعالیت ۳ــ۴

این آزمایشی مشهور برای تمیز امواج صوتی (نمونه‌ای از امواج مکانیکی) از امواج الکترومغناطیسی است. در حالی که امواج مکانیکی برای انتشار به محیط مادی نیاز دارند و انرژی را به صورت انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل ذرات محیط انتقال می‌دهند، امواج الکترومغناطیسی به محیط مادی نیاز ندارند و انرژی را به صورت انرژی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی منتقل می‌کنند. بنابراین با تخلیهٔ هوای محفظه، محیطی برای انتشار صوت باقی نمی‌ماند، در حالی که همچنان امواج الکترومغناطیسی منتقل شده و سبب فعال شدن گوشی تلفن همراه داخل محفظه می‌شوند.

فیزیک ۳

تمرین ۳ــ۵

طول آنتن یک گوشی تلفن همراه قدیمی معمولاً $\frac{1}{4}$ طول‌موج دریافتی است. اگر طول چنین آنتنی تقریباً برابر ۸/۵cm باشد بسامدی را که این گوشی با آن کار می‌کند تعیین کنید.

فعالیت ۳ــ۴

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 ۳ــ۲۲). 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 ۳ــ۲۲ طیف امواج الکترومغناطیسی

۷۶

در این فیلم، نمایشی از آزمایش فعالیت ۳ــ۴ را می‌بینید.

فیلم

برخی کتاب‌ها از طیف امواج الکترومغناطیس به عنوان ***رنگین‌کمان ماکسول*** نیز یاد کرده‌اند.

در این فیلم‌ها کاربردهایی از امواج الکترومغناطیسی را می‌بینید.

فیلم

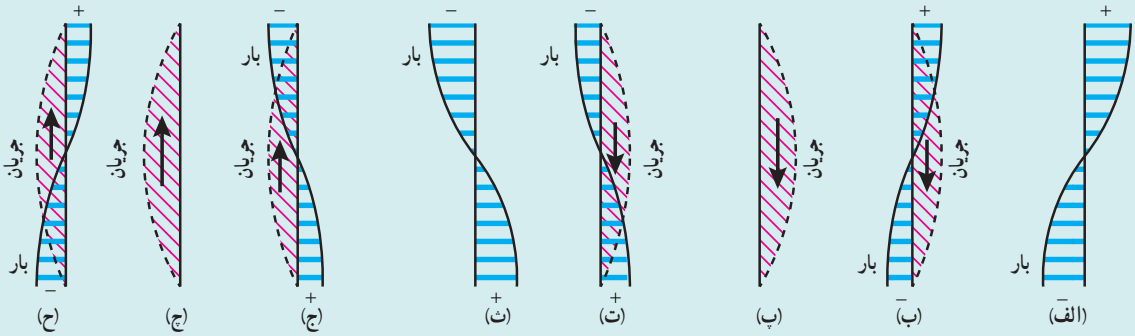
در این فیلم طرحی از انتشار موج الکترومغناطیسی را می‌بینید.

فیلم

دانستنی

آنتن‌ها

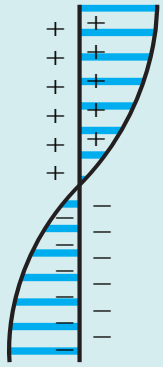
عامل اصل ایجاد موج‌های الکترومغناطیسی، ذرات باردار شتابدارند. در آنتن از یک منبع ولتاژ متناوب برای ایجاد نوسان بارالکتریکی استفاده می‌شود. از آنتن‌ها به‌عنوان چشمهٔ موج‌های الکترومغناطیسی در ایستگاه‌های رادیویی، مخابراتی و ... استفاده می‌شود. شکل ۱ چگونگی تولید یک موج الکترومغناطیسی را در یک آنتن نشان می‌دهد، دو میلهٔ فلزی به یک مولّد متناوب متصل شده‌اند. چون ولتاژ خروجی این مولد سینوسی است، بار (و در نتیجه جریان) روی میله‌ها دائماً تغییر می‌کند. شکل ۱ الف نوسانگر را در لحظه‌ای نشان می‌دهد که بارهای ناهمنام در دو نیمهٔ آن بیشترین مقدارند. در این لحظه، میدان الکتریکی در نزدیکی نوسانگر (آنتن) مقدار بیشینه را دارد، و میدان مغناطیسی موجود نیست زیرا جریانی وجود ندارد. از این لحظه، بارها شروع به حرکت از + به − می‌کنند، یعنی جریانی که آنتن را تخلیه می‌کند ظاهر می‌شود (شکل ۱ ب). جریان افزایش می‌یابد (همراه با میدان مغناطیسی) و در ربع دوره، بیشینهٔ مقدار خود را به‌دست می‌آورد. در این لحظه، آنتن کاملاً تخلیه شده است و هیچ میدان الکتریکی‌ای در فضای اطراف وجود ندارد (شکل ۱ پ). جریان با جاری شدن در همان جهت پایین در شکل، آنتن را دوباره باردار می‌کند : حالا بار مثبت در قسمت پایین و بار منفی در قسمت بالای آن جمع می‌شود (شکل ۱ ت). جریان دوباره به‌تدریج در آخر ربع دوم یک دوره ضعیف می‌شود و از بین می‌رود. در این لحظه، جریان (و میدان مغناطیسی) دوباره صفر است، در حالی‌که بارها (و میدان الکتریکی) مقادیر بیشینه با علامت‌های مختلف به‌دست می‌آورند. این به آن معناست که آنتن دوباره باردار شده است (شکل ۱ ث). در مدت نیم‌دورهٔ بعدی، فرایندی که در بالا شرح داده شد در جهت خلاف جریان تکرار می‌شود (شکل ۱ ث ـ ج). در نتیجه، در آخر دوره دوباره حالت اولیه برقرار می‌شود (مقایسه کنید با شکل ۱ الف).



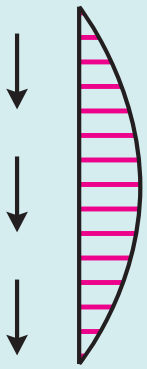
شکل ۱ــ نوسان‌های بار و جریان در نوسانگر (آنتن)

پس، نوسان‌های بار و جریان در آنتن به همان طریق نوسان‌های آنها در مدار نوسانی انجام می‌پذیرد. تنها اختلاف در این است که در مورد مدار نوسانی می‌توان، میدان الکتریکی (و در نتیجه انرژی الکتریکی) را در خازن و میدان مغناطیسی (و انرژی مغناطیسی) را در پیچه متمرکز فرض کرد، در حالی‌که برای آنتن میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در فضای اطراف آن توزیع شده‌اند. همین مطلب وقتی که از ارتعاش‌های نوسانگر ساده به ارتعاش‌های تار می‌رویم مشاهده می‌شود : انرژی پتانسیل نوسانگر ساده در فنر تغییر شکل یافته متمرکز است، در حالی که انرژی جنبشی در بار در حال ارتعاش تمرکز دارد. از طرف دیگر، هر دو نوع انرژی در تمام تار توزیع شده‌اند.

همان‌طور که دیدیم در حین نوسان‌های الکتریکی، بارها با چگالی بیشینه در دو سر نوسانگر جمع می‌شوند، درحالی‌که در وسط آن، چگالی بار همیشه صفر است (شکل ۲).



شکل ۲ــ چگالی بار روی آنتن با تمرکز علامت‌های «+» یا «−» و نیز با طول قطعه‌هایی که عمود بر نوسانگرند نشان داده شده است (علامت به‌علاوه در طرف راست و منها در طرف چپ)



شکل ۳ــ جریان داخل آنتن در وسط مقدار بیشینهٔ خود را به‌دست می‌آورد و در دو انتها از بین می‌رود.

جریان در قسمت‌های مختلف آنتن نیز متفاوت است. وقتی بارها از یک نیمِ آنتن به نیمِ دیگر آن جریان می‌یابد، به‌طور طبیعی در دو انتهای آنتن جمع می‌شوند به‌طوری‌که جریان در این دو انتها همیشه مساوی صفر است. در ناحیهٔ وسط آنتن، جریان بیشینه است (شکل ۳).

از دیدگاه نظریهٔ نوسان‌ها، تاب خوردن آونگ و نوسان‌های الکتریکی داخل مدار پدیده‌های مشابهی هستند. تفاوت تنها در این است که چه چیزی نوسان می‌کند (نوسانگر ساده در یکی و بارهای داخلی مدار نوسانی در دیگری)، ولی قانون حاکم بر نوسان‌ها، یعنی مُد نوسان‌ها در هر دو یکی است. از این‌نظر، نوسان‌های الکتریکی یک آنتن مشابه ارتعاش‌های تار یا ستون هوای داخل لوله‌اند.

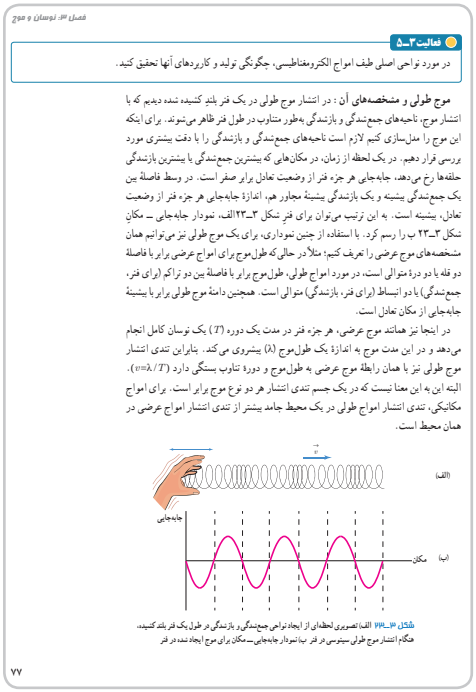
به این ترتیب، قوانین حاکم بر نوسان‌های الکتریکی در یک آنتن مشابه قوانین حاکم بر ارتعاش‌های کشسان تارند. به‌سهولت دیده می‌شود که توزیع جریان در آنتن (شکل ۳) دقیقاً همان توزیع دامنه در تاری است که در دو انتها ثابت شده باشد (شکل ۴ــ۳۷ فصل چهارم). توزیع بار در نوسانگر (شکل ۲) مشابه توزیع دامنهٔ ارتعاش ستون هوا در لوله‌ای است که در دو انتها باز باشد (شکل ۴ــ۳۸ فصل چهارم). از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که نوسان‌های داخل نوسانگر کاملاً امواج ایستاده از جریان و بارند. در مرکز نوسانگر، یک گره از نوسان‌های بار و یک شکم از نوسان‌های جریان وجود دارد، در حالی‌که در دو انتهای نوسانگر گره‌هایی از نوسان‌های جریان و شکم‌هایی از نوسان‌های بار وجود دارند. پس، در طول نوسانگر یک نصف موج جا می‌گیرد، و از این رو

$$l = \lambda/۲$$

ولی طول موج یک موج الکترومغناطیسی با فرمول $\lambda = c/f$ با بسامد نوسان ارتباط دارد، که در آن c تندی انتشار امواج الکترومغناطیسی است. با قراردادن این عبارت به جای λ در فرمول قبل، عبارت سادهٔ زیر را برای بسامد طبیعی نوسانگر به‌دست می‌آوریم :

$$f = c/۲l$$

این بسامد طبیعی اصلی (پایین‌ترین) است. نظیر تار، نوسان‌های با هماهنگی‌های بالاتر را نیز می‌توان مشاهده کرد. آنگاه دو، سه، چهار و ... نصف طول موج در طول آنتن جای می‌گیرد. بنابراین بسامدهای این هماهنگی‌های بالاتر دو، سه، چهار و ... برابر بالاتر از f است.


فصل ۳: نوسان و موج

فعالیت ۳ـ۵

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 بلند 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 مجاور هم، اندازهٔ جابه‌جایی هر جزء فنر از وضعیت تعادل، بیشینه است. به این ترتیب می‌توان برای فنرِ شکل ۳ـ۲۳الف، نمودار جابه‌جایی ــ مکان شکل ۳ـ۲۳ 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 طول موج برای امواج عرضی برابر با فاصلهٔ دو قله یا دو درهٔ متوالی است، در مورد امواج طولی، طول موج 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 با همان رابطهٔ موج عرضی به طول‌موج و دورهٔ تناوب بستگی دارد ($v=\lambda/T$). 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 ۳ـ۲۲ 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

۷۷

پاسخ فعالیت ۳ــ۵

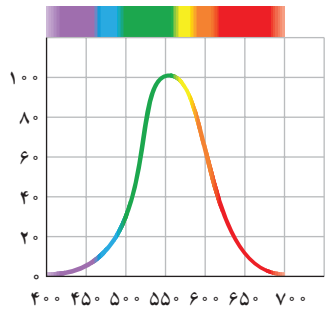
نواحی اصلی طیف امواج الکترومغناطیسی، به ترتیب از امواج کم‌بسامد تا امواج پُربسامد به قرار زیر هستند :

امواج رادیویی : این امواج برحسب افزایش بسامد، شامل رادیویی AM، رادیویی FM و کانال‌های تلویزیونی TV هستند. این امواج را از آن رو رادیویی می‌نامند که بسامد آنها در گستره‌ای است که عمدتاً برای گسیل سیگنال‌های رادیویی و تلویزیونی به کار برده می‌شوند. برای تولید این امواج از مدارهای الکترونیکی استفاده می‌شوند.

امواج میکروموج : از این امواج نیز در ارتباطات استفاده می‌شود، در تلفن‌های همراه، تلویزیون‌های ماهواره‌ای، و رادار از گسترهٔ این امواج استفاده می‌شود. اجاق‌های میکروموج (مایکروفر) نیز از این امواج برای پختن غذا استفاده می‌کنند. این امواج ممکن است موجب برخی از سرطان‌ها شوند و نیز با گرم کردن آب موجود در بافت‌های زنده به این بافت‌ها آسیب برسانند. چشمهٔ اصلی این امواج یک لامپ خلأ موسوم به مگنترون است.

امواج فروسرخ : به این امواج به این دلیل فروسرخ می‌گویند که بسامد آنها کمتر از بسامد نور مرئی قرمز است. همان‌طور که در کتاب فیزیک ۱ دیدید، تابش‌های گرمایی اجسام با دمای زیر حدود $500^\circ C$ عمدتاً به صورت تابش فروسرخ است و برخی از جانوران که توانایی آشکارسازی این امواج را دارند از این ویژگی برای دید در شب استفاده می‌کنند. اجسام با جذب تابش فروسرخ گرم می‌شوند. پوست بدن انسان تقریباً همهٔ امواج فروسرخی را که بر آن فرود می‌آید جذب می‌کند و وجود این امواج را از طریق گرمای ایجاد شده حس می‌کند. بنابراین دریافت تابش زیاد امواج فروسرخ می‌تواند سبب سوختن پوست شود. همچنین از این تابش برای دستگاه‌های کنترل از راه دور (ریموت کنترل) و دوربین‌های دید در شب استفاده می‌شود.

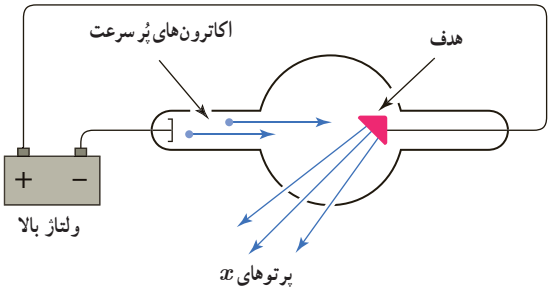
امواج نور مرئی : نور مرئی نوار باریکی از امواج الکترومغناطیسی را تشکیل می‌دهد که چشم عادی به آن واکنش می‌دهد. نور قرمز پایین‌ترین بسامد و بلندترین طول موج مرئی، و نور بنفش بیشترین بسامد و کوتاه‌ترین طول موج مرئی را دارد. در روشنایی، بیشترین حساسیت چشم مربوط به طول موج 555nm است که به رنگ زرد ــ سبز تعلق دارد و حساسیت چشم به سرعت در دو سوی این طول موج کاهش می‌یابد.



حساسیت یک جسم سالم به طول موج‌های مختلف طیف نور مرئی

امواج فرابنفش : به این امواج به این دلیل فرابنفش می‌گویند که بسامد آنها بیشتر از بسامد نورمرئی بنفش است. امواج فرابنفش بخشی از تابش گرمایی هستند که توسط اجسام بسیار داغ گسیل می‌شود. حدود ۷ درصد تابش حاصل از نور خورشید به صورت فرابنفش است. این بخش از تابش نور خورشید سبب تیرگی رنگ پوست و آفتاب‌سوختگی می‌شود. تابش فرابنفش برخلاف تابش فروسرخ باعث گرم شدن پوست نمی‌شود، بلکه موجب فرایندی شیمیایی در پوست می‌شود که به تغییر رنگ پوست می‌انجامد. خوشبختانه بیشتر تابش فرابنفش حاصل از خورشید توسط اتم‌ها در لایهٔ پوش‌سپهر (استراتوسفر) جو که در فاصلهٔ ۱۲ تا ۵۰ کیلومتری از سطح زمین قرار دارد، جذب می‌شود، در غیر این صورت، اثرات زیان‌بار خطرناکی به انسان وارد می‌شد. یکی از اجزای مهم لایهٔ پوش سپهر، اوزُن (O_3) است که از برهم‌کنش اکسیژن (O_2) با تابش فرابنفش حاصل می‌شود. این اوزُن حاصل، مانع از رسیدن تابش فرابنفش مرگبار به سطح زمین می‌گردد. برخی مواد تحت تابش فرابنفش، نور مرئی گسیل می‌کنند که به این، ***خاصیت فلوئورسانی*** می‌گویند و از این ویژگی در برخی مصارف از جمله لامپ‌های مهتابی و تلویزیون‌های پلاسما استفاده می‌شود. تابش فرابنفش کاربردهای فراوانی دارد که از آن جمله استرلیزه کردن محیط ابزارآلات پزشکی و آزمایشگاه‌های زیست‌شناسی است.

امواج پرتوهای x : چشمه‌های پرتوهای x، طبیعی یا مصنوعی هستند، چشمه‌های طبیعی پرتوهای x از اجسام نجومی‌ای نظیر خوشه‌های کهکشانی، اَختروَش‌ها (کوازارها)، سیاه‌چاله‌ها، اَبَرنواَخترها (سوپرنواها)، خورشید و . . . هستند. پرتوهای x را می‌توان به طور مصنوعی با تاباندن الکترون‌های پُرانرژی به یک هدف فلزی ایجاد کرد.



طرح ساده‌ای از چگونگی تولید پرتوی x در یک لامپ پرتوی x

این پرتوهای x به عنوان ابزاری تشخیصی در پزشکی و نیز در درمان برخی از انواع سرطان‌ها به کار می‌رود.

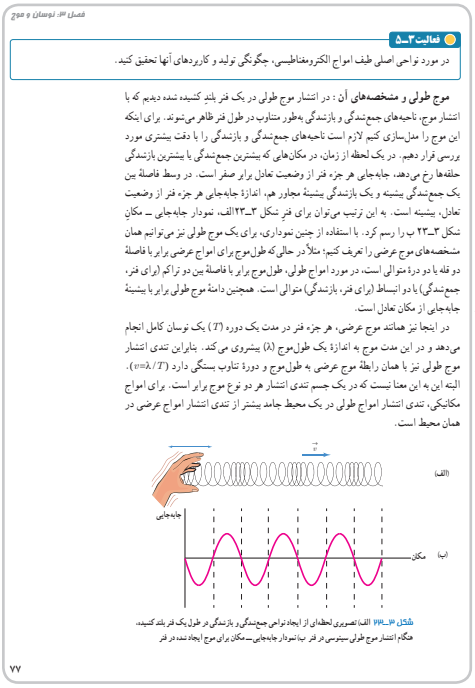
استخوان‌ها مملو از کلسیم‌اند که پرتوهای x را به مراتب بهتر از بافت‌های نرمی مانند ماهیچه یا چربی جذب می‌کنند. این تصویری از استخوان‌های دست است که با پرتوی x عکس‌برداری شده است.

چون پرتوهای x به‌سادگی در بافت‌های زنده و اندام‌ها نفوذ و در نتیجه آنها را تخریب می‌کنند، باید مراقبت‌های ویژه‌ای برای پرهیز از دریافت غیرضروری این پرتوها صورت بگیرد. سرب با عدد اتمی ۸۲ محافظ خوبی برای مسدود کردن راه ورود پرتوهای x است.

امواج پرتوهای گاما: پرانرژی‌ترین امواج الکترومغناطیسی پرتوهای گاما هستند. پرتوهای گاما در برخی از فرایندهای هسته‌ای نظیر واپاشی پرتوزا، شکافت و گداخت هسته‌ای، و نیز در برخی از اجرام سماوی نظیر تپ‌اخترها (پالسارها)، ستاره‌های نوترونی، سیاه‌چاله‌ها و... تولید می‌شوند. از این پرتوها نیز در تشخیص و درمان پزشکی استفاده می‌شود. مثلاً ایزوتوپ‌هایی نظیر تکنتیوم ۹۹ (^{۹۹}Tc)، ید ۱۲۵ (^{۱۲۵}I)، ید ۱۳۱ (^{۱۳۱}I)، کبالت (^{۵۷}Co) و سزیم ۱۳۷ (^{۱۳۷}Cs) وجود دارند که پرتوی گاما گسیل می‌کنند و از این پرتو برای تشخیص و درمان تعدادی از بیماری‌ها نظیر برخی از سرطان‌ها و تومورهای مغزی استفاده می‌شود.

این پرتوها قدرت نفوذ بسیار زیادی دارند و می‌توانند آسیب‌های جدی به بافت‌های زنده‌ای وارد کنند که این پرتوها را جذب می‌کنند. بنابراین کسانی که با این پرتوها سروکار دارند باید جامه‌هایی بپوشند که از مواد سنگین جاذبی نظیر لایه‌های سرب ساخته شده باشند.

تصویری از دستگاه جراحی مغز با پرتوی گاما


فصل ۳: نوسان و موج

فعالیت ۳ـ۵

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 بلند 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 مجاور هم، اندازهٔ جابه‌جایی هر جزء فنر از وضعیت تعادل، بیشینه است. به این ترتیب می‌توان برای فنرِ شکل ۳ـ۲۳الف، نمودار جابه‌جایی ــ مکانِ شکل ۳ـ۲۳ 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 با همان رابطهٔ موج عرضی به طول‌موج و دورهٔ تناوب بستگی دارد ($v=\lambda/T$). 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.

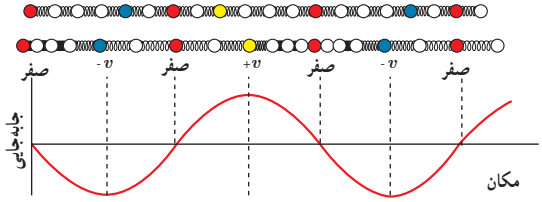
(الف)
جابه‌جایی
(ب)
مکان

شکل ۳ـ۲۳ 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

۷۷

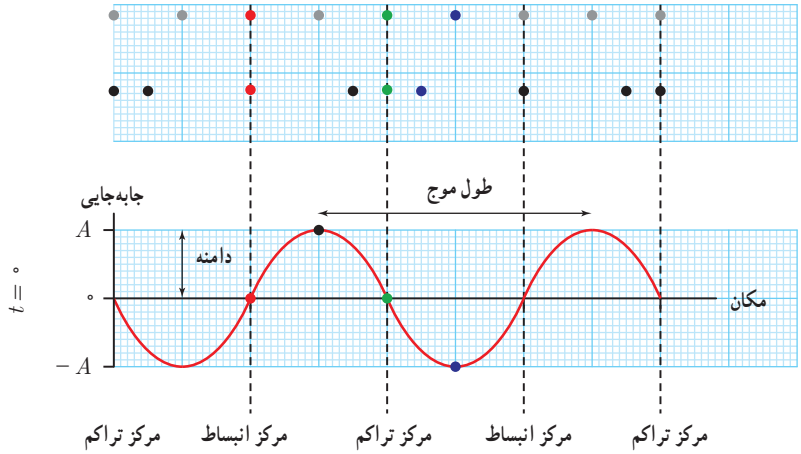
خوب است در اینجا دوباره با اسباب فعالیت پیشنهادی بخش ۳ـ۵ به تفهیم این مطالب بپردازیم. طرحی از گلوله و فنر این اسباب در شکل الف با رنگ‌آمیزی چند گوی نشان داده شده است، به‌طوری که در حالت تعادل (وقتی هنوز دستگاه به نوسان واداشته نشده است) فاصلهٔ گوی‌های قرمز متوالی برابر $\frac{\lambda}{2}$ است. وقتی گوی قرمز سمت چپ به‌طور هماهنگ ساده به نوسان درمی‌آید، موجی طولی در راستای فنرها ایجاد می‌شود، به‌طوری که در لحظهٔ نشان داده شده در شکل ب گوی‌های آبی‌رنگ به سمت چپ و گوی زردرنگ به سمت راست حرکت می‌کند، درحالی که گوی‌های قرمز تقریباً در سر جای خود باقی می‌مانند که این نشانه‌ای از جمع‌شدگی برخی فنرها و بازشدگی برخی فنرهای دیگر است. اگر در این لحظه، جابه‌جایی هر گوی از مکان اولیهٔ خود را برحسب این مکان رسم کنیم به نمودار سینوسی پایین شکل ب می‌رسیم که به آن اصطلاحاً نمودار جابه‌جایی ــ مکان برای موج طولی می‌گویند. شکل پ نیز ترسیم مشابهی را برای هر موجی طولی نشان می‌دهد.

شکل الف) طرحی از گلوله‌های رنگی که در امتداد یک خط با فنرهایی به هم متصل شده‌اند.



شکل ب) بالا : عکس لحظه‌ای از شکل الف، وقتی موجی طولی در راستای فنرها ایجاد شود.

پایین : منحنی جابه‌جایی ــ مکان برای همهٔ نقاط موج



شکل پ) منحنی جابه‌جایی ــ مکان برای همهٔ نقاط

در اینجا همچنین خوب است تمرین پیشنهادی ۵ نیز در کلاس مطرح شود.

توجه کنید برای هر دو موج طولی و عرضی رابطهٔ ۳ــ۹ ($v=\lambda/f$) برقرار است و بنابراین طول‌موجِ موج طولی از طول‌موجِ موج عرضی در یک محیط بیشتر است. همان‌طور که در متن درس اشاره شده است منظور از یک محیط، محیط جامد است، زیرا موج عرضی صرفاً در جامدات می‌تواند منتشر شود و بنابراین این مقایسه فقط در جامدها می‌تواند صورت گیرد. ولی چرا چنین است؟ در مورد موج عرضی، امواج اصطلاحاً *برشی* (shear) هستند و در محیط انتشار، لایه‌های عمود بر راستای انتشار در هنگام ارتعاش به موازات یکدیگر فقط جابه‌جا می‌شوند، بی آنکه به یکدیگر نزدیک یا دور شوند. درحالی‌که در مایعات و گازها، لایه‌های مجاور، بی‌آنکه نیروهای کشسان مخالف ظاهر شوند، روی یکدیگر به راحتی می‌لغزند و چون نیروهای کشسان وجود ندارند، پس امواج کشسان نیز نمی‌توانند تشکیل شوند. اما در مورد موج طولی که اصطلاحاً به آنها امواج تراکمی نیز می‌گویند، در نواحی مختلف محیط، تراکم‌ها و انبساط‌هایی ظاهر می‌شود و در این تغییر شکل لایه‌ها نیروهای کشسانی ظاهر می‌شوند و به همین علت امواج طولی در هر سه حالت دیده می‌شوند.

فصل ۳: نوسان و موج

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 بلند 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 مجاور هم، اندازهٔ جابه‌جایی هر جزء فنر از وضعیت تعادل، بیشینه است. به این ترتیب می‌توان برای فنر 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 حالی‌که 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 با همان رابطهٔ موج عرضی به طول‌موج و دورهٔ تناوب بستگی دارد ($v=\lambda/T$). 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

۷۷

فیلم

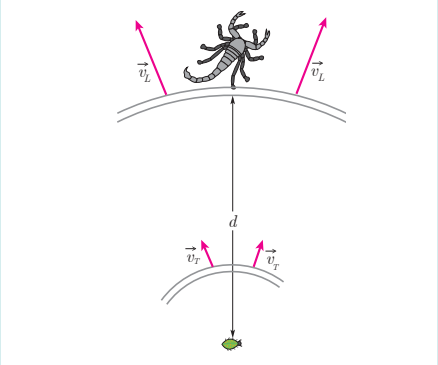
در این فیلم طرحی از انتشار موج طولی را می‌بینید.

دانستنی

موج‌های طولی و عرضی و شکار طعمه توسط عقرب ماسه‌ای

وقتی یک سوسک در ماسه با فاصله‌ای حدود چند ده سانتی‌متر از یک عقرب ماسه‌ای حرکت می‌کند، عقرب سریعاً به سمت سوسک برمی‌گردد و آن را شکار می‌کند. عقرب ماسه‌ای (شکل الف) جهت و فاصلهٔ طعمه را با استفاده از امواجی تعیین می‌کند که با حرکت طعمه در سطح ماسه گسیل می‌شوند ــ موج‌های عرضی که ماسه را عمود بر راستای حرکت موج به نوسان در می‌آورد، و موج‌های طولی که ماسه را در راستای حرکت موج به نوسان در می‌آورد، امواج طولی سه برابر سریع‌تر از امواج عرضی حرکت می‌کنند. (شکل ب). عقرب که با ۸ پای خودروی دایره‌ای به قطر حدود ۵cm قرار دارد امواج طولیِ سریع‌تر را دریافت می‌کند و جهت سوسک را تشخیص می‌دهد. سوسک در جهتِ آن پای عقرب است که زودتر از بقیه توسط موج تحریک می‌شود. آنگاه عقرب بازهٔ زمانی بین نخستین دریافت و دریافت موج عرضی آرام‌تر را حس می‌کند و از آن برای تعیین فاصلهٔ خود تا سوسک استفاده می‌کند. مثلاً یک بازهٔ زمانی ۰/۰۰۴ ثانیه‌ای بین رسیدن دو موج به معنی آن است که موج در فاصلهٔ ۳۰ سانتی‌متری عقرب تولید شده است. به این ترتیب عقرب بی‌درنگ جهت و فاصلهٔ خود تا طعمه را تعیین می‌کند.

(الف) عقرب ماسه‌ای



(ب) امواج طولی، سریع‌تر از امواج عرضی به عقرب می‌رسند.

در مورد چین‌های صوتی و چگونگی تولید صدا از مجرای صوتی انسان، خوب است به دانش‌آموزان گوشزد کنید که اساس این تولید صدا مبتنی بر دانشی است که آنها در فصل بعد خواهند آموخت. چراکه در واقع مجرای صوتی لوله‌ای است که یک انتهای آن (در حنجره) بسته و انتهای دیگر آن (در دهان و سوراخ‌های بینی) باز است و عملاً با لوله‌ای صوتی با یک انتهای باز سروکار داریم. در این مورد دانستنی‌ای نیز در فصل ۴ ارائه خواهد شد.

فیزیک ۳

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 ۸/۰km/s و تندی موج‌های S در حدود ۴/۵ km/s است. یک دستگاه لرزه‌نگار[4] موج‌های P و S حاصل از یک زمین‌لرزه را ثبت می‌کند. فرض کنید نخستین امواج P، ۳/۰ 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

$$\Delta x = \frac{v_s v_P}{v_P - v_s}\Delta t = \frac{(۴/۵\,km/s)(۸/۰\,km/s)}{(۸/۰\,km/s) - (۴/۵\,km/s)}(۳/۰ \times ۶۰\,s) = ۱/۹ \times ۱۰^{۳}\,km$$

موج صوتی : صوت یک موج طولی است که توسط جسمی مرتعش از قبیل سیم گیتار، تارهای صوتی حنجره انسان، دیافراگم، 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 بازتندگی‌ها 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 فنر 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 نسبیه به جمع‌شدگی و بازتندگی در یک فنر بلند است.

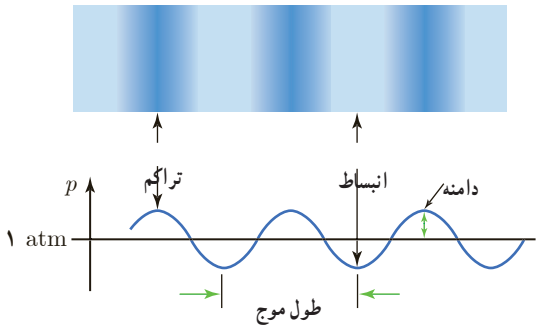
۱ــ Seismic Waves
۲ــ Primary Waves
۳ــ Secondary Waves
۴ــ Seismograph

۷۸

فیلم

در این فیلم آموزشی زیبا چگونگی ایجاد صوت، انتقال آن و . . . را می‌بینید.

در اینجا خوب است نمودار فشار هوا برحسب فاصله از بلندگو را نیز رسم کنید و به تفاوت آن با منحنی جابه‌جایی ــ مکان بپردازید.



فشار هوا در یک موج صوتی برحسب فاصله از چشمهٔ صوت به‌طور سینوسی تغییر کرده است.

با یک اسیلوسکوپ هم می‌توان به‌طور تجربی این رفتار را مشاهده کرد.

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 بازنمدگی در یک فنر کشیده است که در آن موجی طولی روانه شده است (شکل ۳ــ۲۴ب). 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).

ارتعاش یک مولکول هوا

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 استثناهای 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	۶۴۲۰

* فشار همهٔ گازها ۱atm است.

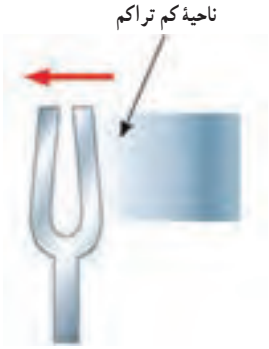
فعالیت ۳ــ۶

اندازه‌گیری تندی صوت: یک روش ساده برای اندازه‌گیری تندی صوت به این ترتیب است: دو میکروفون را مطابق شکل به یک زمان‌سنج حساس[1] 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.

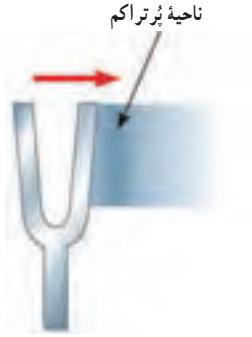
۱ــ Fast timer

پاسخ پرسش ۳ــ۶

الف) در دیاپازون، وقتی شاخه‌ها با ضربه‌ای به دیاپازون به ارتعاش درمی‌آیند، دو شاخهٔ آن در خلاف جهت یکدیگر به ارتعاش درمی‌آیند. اگر شاخه‌ها از هم دور شوند، هر شاخه لایهٔ هوای مجاور خود را متراکم می‌کند (شکل الف) و اگر شاخه‌ها به هم نزدیک شوند، هر شاخه لایهٔ هوای مجاور خود را منبسط می‌کند (شکل ب). در لایه‌های متراکم، چگالی و در نتیجه فشار هوا نسبت به قبل از ارتعاش دیاپازون اندکی زیاد می‌شود، در حالی که در لایه‌های منبسط، چگالی و در نتیجه فشار هوا نسبت به قبل از ارتعاش دیاپازون اندکی کم می‌شود. این تراکم‌ها و انبساط‌ها متناوباً تولید شده و در هوا حرکت می‌کنند و بدین ترتیب مانند آنچه در متن درس آمده است یک موج صوتی راه می‌افتد.



ب) وقتی شاخه‌های دیاپازون به هم نزدیک می‌شوند، لایهٔ هوای مجاور شاخه منبسط می‌شود.



الف) وقتی شاخه‌های دیاپازون از هم دور می‌شوند، لایهٔ هوای مجاور شاخه متراکم می‌شود.

ب) حشرات هنگام پرواز بال‌هایشان را در هر ثانیه صدها بار تکان می‌دهند. بال حشرات مانند صفحهٔ مرتعشی است و نشان داده شده هر صفحه با ارتعاش به حد کافی زیاد (بیش از ۱۶ بار در ثانیه) صوتی با ارتفاع معینی را ایجاد می‌کند. سازوکار ایجاد این صوت مانند همان است که در ارتعاش دیافراگم بلندگو و نیز در توضیح ایجاد صوت در دیاپازون گفتیم. محض اطلاعات عمومی خوب است بدانید مگس در هنگام پرواز در هر ثانیه ۳۵۲ بار، زنبور میوه در هر ثانیه ۲۲۰ بار، زنبور عسل در هر ثانیه ۴۴۰ بار، و پشه در هر ثانیه ۵۰۰ تا ۶۰۰ بار بال می‌زند.

فیلم

در این فیلم چگونگی ایجاد صوت توسط یک دیاپازون مرتعش را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم آزمایش جالبی با یک دیاپازون مرتعش چرخان را می‌بینید.

در اینجا خوب است به دانش پیشین دانش‌آموزان نیز ارجاع داده شود. بچه‌ها پیش‌تر دیدند که هرچه سختی جسم بیشتر و چگالی آن کمتر بود، تندی انتشار موج در آن بیشتر می‌شد. مثلاً در یک ریسمان کشیده، هرچه کشش آن بیشتر و جرم واحد طول آن کمتر بود، تندی انتشار موج در آن بیشتر می‌شد. صوت نیز یک موج است و بنابراین تندی انتشار آن به ویژگی‌های محیط بستگی دارد. هرچه محیط تراکم‌ناپذیرتر و چگالی آن کمتر باشد، تندی صوت در آن بیشتر است.

برای اطلاعات عمومی خوب است به رابطهٔ تندی صوت با دما نیز اشاره شود که در آن T دمای محیط برحسب کلوین است :

$$v = (۳۳۱\,\mathrm{m/s})\sqrt{\frac{T}{۲۷۳\,\mathrm{K}}}$$

فصل ۳: نوسان و موج

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 ۳ـ۲۴ب). 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 ۳ـ۲۵).

ارتعاش یک مولکول هوا

شکل ۳ـ۲۵ در حالی که موج از بلندگو به سمت شنونده حرکت می‌کند، مولکول‌های هوا در جای خود نوسان می‌کنند.

پرسش ۳ـ۶

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 ۳ـ۱ 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 ۳ـ۱ 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	۶۴۲۰

* فشار همهٔ گازها ۱atm است.

فعالیت ۳ـ۶

اندازه‌گیری تندی صوت : یک روش ساده برای اندازه‌گیری تندی صوت به این ترتیب است : دو میکروفون را مطابق شکل به یک زمان‌سنج حساس[1] 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.

زمان‌سنج حساس
میکروفون دوم
میکروفون اول
چکش
صفحه
خط‌کش

۱ـ Fast timer

۷۹

پاسخ فعالیت ۳ـ۶

برای اینکه صحت زمان‌سنج خود را دریابید خوب است بدانید برای یک فاصلهٔ ۱ متری بین میکروفون‌ها، در صورتی که محل برخورد چکش در امتداد خط واصل میکروفون‌ها باشد، زمان‌سنج باید تأخیر زمانی حدود ۳/۰ms را نشان دهد. در این صورت تندی صوت حدوداً می‌شود :

$$v = \frac{l}{t} = \frac{۱/۰\,\mathrm{m}}{۳/۰\times ۱۰^{-۳}\,\mathrm{s}} = ۳۳۳\,\mathrm{m/s}$$

همچنین توجه کنید که آزمایش را باید چندین بار تکرار کنید و سپس متوسط این تعدادها را به عنوان تندی صوت بیان کنید.

روش دیگر برای اندازه‌گیری تندی صوت استفاده از یک اسیلوسکوپ دو باریکه‌ای (double beam oscilloscope) است. اگر این وسیله را در آزمایشگاه در اختیار دارید، دو میکروفون را مطابق شکل به ورودی‌های این اسیلوسکوپ وصل کنید. همچنین یک مولّد سیگنال را به یک بلندگو وصل کنید، به طوری که بسامد آن بین ۵۰۰Hz تا ۲/۰kHz باشد. یکی از میکروفون‌ها باید نزدیک بلندگو باشد و میکروفون دیگر باید به فاصلهٔ ۱ متر یا بیشتر از آن قرار گیرد. روی اسیلوسکوپ دو ردّ موج را مقایسه کنید.

فصل ۳: نوسان و موج

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 ۳ـ۲۴ب). 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 ۳ـ۲۵).

ارتعاش یک مولکول هوا

شکل ۳ـ۲۵ در حالی که موج از بلندگو به سمت شنونده حرکت می‌کند، مولکول‌های هوا در جای خود نوسان می‌کنند.

پرسش ۳ـ۶

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 ۳ـ۱ 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 ۳ـ۱ 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	۶۴۲۰

* فشار همهٔ گازها ۱atm است.

فعالیت ۳ـ۶

اندازه‌گیری تندی صوت : یک روش ساده برای اندازه‌گیری تندی صوت به این ترتیب است : دو میکروفون را مطابق شکل به یک زمان‌سنج حساس[1] 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.

زمان‌سنج حساس
میکروفون دوم
میکروفون اول
چکش
صفحه
خط‌کش

۱ـ Fast timer

۷۹

میکروفون دوم را روی خط واصل میکروفون اول و بلندگو آنقدر جابه‌جا کنید تا ردّ موج‌ها نخست کاملاً ناهم‌فاز و دوباره هم‌فاز شوند (و یا بالعکس). آنگاه اختلاف فاصلهٔ بین میکروفون‌ها در این دو حالت را با یک خط‌کش اندازه بگیرید. اختلاف فاصلهٔ بین میکروفون‌ها در این دو حالت کاملاً ناهم‌فاز و هم‌فاز، برابر نصف طول موج است. اکنون تندی صوت را با ضرب بسامدی که مولّد سیگنال نشان می‌دهد در طول موج محاسبه کنید.

دانستنی

امواج لرزه‌ای ناشی از انفجار

امواج لرزه‌ای می‌توانند از درون زمین یا در سطح زمین حرکت کنند. گرچه ایستگاه‌های لرزه‌نگاری عمدتاً برای ثبت امواج لرزه‌ای حاصل از زمین‌لرزه ایجاد شده‌اند، ولی آنها امواج لرزه‌ای حاصل از هر انرژی بزرگ آزاد شده در نزدیکی سطح زمین (مثل یک انفجار) را نیز ثبت می‌کنند. مثلاً آنها در سال ۱۹۸۹ امواج لرزه‌ای را ثبت کردند که حاصل از انفجار شاتل فضایی *کلمبیا* بر فراز لس‌آنجلس، در هنگام برگشت به پایگاه فضایی *ادواردز* بود و یا در ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱، ایستگاه‌های لرزه‌نگاری برخورد هواپیماها به برج‌های دوقلوی مرکز تجارت جهانی را ثبت کردند. مثال مشهور دیگر مربوط به انفجار زیردریایی هسته‌ای *کورسک*[1] در دریای *بارنتز* در شمال روسیه است. در آگوست سال ۲۰۰۰، یک ایستگاه لرزه‌نگاری رشته‌ای از نوسان‌های کم دامنه را ثبت کرد. حدود دو دقیقه بعد، نوسان‌های با دامنهٔ بزرگ‌تر ثبت شدند. تحلیل‌گران بعداً دریافتند که نخستین امواج لرزه‌ای احتمالاً ناشی از اژدری بود که نتوانسته بود هنگام شلیک از زیردریایی خارج شود و در نتیجه بدنهٔ زیردریایی را سوراخ کرده و موجب غرق شدن آن شده بود. مدتی پس از غرق شدن زیردریایی، امواج لرزه‌ای بسیار قوی‌تری تولید شدند که ناشی از انفجار چند موشک قوی درون زیردریایی، به دلیل آتش گرفتن زیردریایی بود. این امواج قوی‌تر، حدوداً هر ۰/۱۱s به طور متوالی، به ایستگاه لرزه نگاری می رسیدند. تحلیل گران با استفاده از این بازهٔ زمانی توانستند عمق زیردریایی غرق شده را نیز محاسبه کنند. انفجار قوی‌تر وقتی رخ داد که زیردریایی روی کف اقیانوس قرار داشت. تپ حاصل از انفجار چند مرتبه بین سطح آب و کف اقیانوس وا جهیده شد. هر بار که تپ به کف اقیانوس می‌خورد، تپ دیگری را در زمین ایجاد می‌کرد و ایستگاه‌های لرزه‌نگاری

۱ـ kursk Submgrine

این تپ‌های زمینی را که یکی پس از دیگری می‌رسیدند، ثبت می‌کردند. بنابراین زمان ۰/۱۱s بین هر دو تپ متوالی برابر با زمانی رفت و برگشت تپ تا رسیدن به سطح آب و برگشتن به کف دریا بود. با توجه به اینکه تندی صوت در آب دریا حدود ۱۵۰۰m/s است، تحلیل‌گران عمق زیردریایی را حدود ۸۰m تخمین زدند که بعداً کشف شد که این عمق حدود ۱۱۵m بوده است که بسیار به این عمق محاسبه شده نزدیک بود.

فیزیک ۳

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؟

تندت و تراز شدت صوت: انتشار صوت از هر چشمهٔ صوتی همراه با انتقال بی‌دری 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. تندت 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).

$$I = \frac{\overline{P}}{A} \qquad \text{(تندت صوت)} \qquad (۳ـ۱۱)$$

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

تندت صوت را می‌توان با یک آشکارساز اندازه گرفت. با اندازه‌گیری تندت صوت‌های مختلف درمی‌یابیم نسبت تندت‌های صوت در گسترهٔ شنوایی انسان می‌تواند در حدود 10^{12} باشد (جدول ۳ـ۲). برای بررسی چنین گسترهٔ وسیعی از تندت‌ها راحت‌تر آن است که از لگاریتم (در پایهٔ ۱۰) استفاده کنیم. یعنی به‌جای تندت I یک موج صوتی، ساده‌تر این است که از **تراز تندت صوت (تراز صوتی)** که به‌صورت زیر تعریف می‌شود استفاده کنیم:

$$\beta = (10\,dB)\log\left(\frac{I}{I_0}\right) \qquad \text{(تراز تندت صوت)} \qquad (۳ـ۱۲)$$

که در آن dB مخفف دسی‌بل، یکای تراز تندت صوت است که به افتخار الکساندر گراهام بل (۱۹۲۲ـ۱۸۴۷ م.) انتخاب شده است. همچنین I_0 تندت مرجع ($1.00\times10^{-12}W/m^2$) به این دلیل انتخاب شده است که نزدیک به حد پایین گسترهٔ شنیداری انسان است. یک موج صوتی با تندت $I=I_0$ تراز تندت صوتی برابر $0\,dB$ دارد. جدول ۳ـ۳، تندت‌ها و ترازهای تندت صوت را برای چند صدای متفاوت داده 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.

جدول ۳ـ۳ تندت و تراز تندت صوت برای چند صدای متفاوت

صوت	تندت صوت (W/m^2)	تراز تندت صوت (dB)
نفس کشیدن در فاصلهٔ 3m	10^{-11}	۱۰
پچ‌پچ در فاصلهٔ 1m	10^{-10}	۲۰
کتابخانه	10^{-9}	۳۰
خیابان بی‌سروصدا	10^{-8}	۴۰
رستوران ساکت	10^{-7}	۵۰
صحبت معمولی در فاصلهٔ 1m	10^{-6}	۶۰
خیابان پر سروصدا	10^{-5}	۷۰
در نزدیکی جارویرقی	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
مثلهٔ سنگ‌شکن	10^{0}	۱۲۰
موتور جت در فاصلهٔ 30m	10^{1}	۱۳۰

۸۰

پاسخ تمرین ۳ـ۶

با استفاده از رابطهٔ $\Delta x = v\Delta t$، زمان پیمودن صوت در هوا و در میله را می‌یابیم. اگر تندی صوت در هوا با v_a و تندی صوت در میله را v_b نشان دهیم، آنگاه اختلاف زمان رسیدن این دو موج چنین می‌شود:

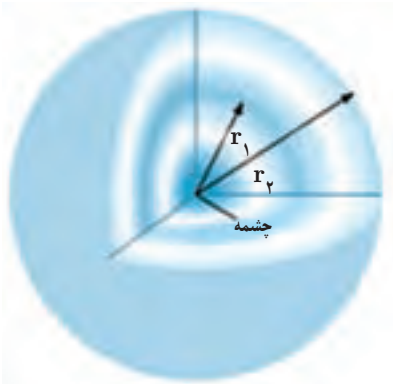
$$\Delta T = \frac{\Delta x}{v_a} - \frac{\Delta x}{v_b} = \frac{(v_b - v_a)\Delta x}{v_a v_b}$$

در نتیجه

$$\Delta x = \frac{v_a v_b}{v_b - v_a}\Delta t = \frac{v_a(15v_a)}{15v_a - v_a}\Delta t = \frac{15v_a}{14}\Delta t$$

$$= \frac{15(340\,m/s)}{14}(0/12s) = 43/71m \approx 44m$$

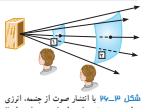
خوب است اشاره شود چشمه‌های صوتی واقعی (مانند بلندگوها) ممکن است صدا را فقط در جهت‌های خاصی ارسال کنند ولی در بعضی وضعیت‌ها می‌توان فرض کرد چشمهٔ صوتی خیلی کوچک است و انرژی را در تمام راستاها به‌طور یکنواخت گسیل می‌کند. به این چشمه‌ها، ***چشمهٔ نقطه‌ای*** می‌گویند و موجی که از آن دور می‌شود ***کروی*** خواهد بود. در این حالت انرژی گسیل‌شده توسط چشمه روی سطح کروی موج به‌طور یکنواخت توزیع می‌شود. یعنی هرقدر شعاع کره بزرگ‌تر باشد انرژی رسیده به واحد سطح کره کوچک‌تر می‌شود. اگر انرژی مکانیکی موج صوتی پایسته بماند (محیط بدون اتلاف باشد) همهٔ انرژی گسیل شده توسط چشمه باید از هریک از این سطوح کروی فرضی بگذرد. بنابراین آهنگ انتقال انرژی توسط موج‌های صوتی از هر سطح باید برابر با آهنگ گسیل انرژی از چشمهٔ صوت (با توان P_s) باشد و بنابراین شدت I در فاصلهٔ r از این چشمه برابر با $P_s/4\pi r^2$ می‌شود.



فیزیک ۳

تمرین ۳ـ۶

شخصی با چکش 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؟



شکل ۳ـ۲۷ با انتشار صوت از چشمه، انرژی به‌طور عمود، نخست از سطح ۱ و سپس از سطح ۲ که مساحت بیشتری دارد، می‌گذرد.

تندی و تراز تندی صوت : انتشار صوت از هر چشمهٔ صوتی همراه با انتقال بی‌دریی 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. تندی 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).

$$I=\frac{\overline{P}}{A} \qquad \text{(تندی صوت)} \qquad (۳ـ۱۱)$$

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

تندی صوت را می‌توان با یک آشکارساز اندازه گرفت. با اندازه‌گیری تندی صوت‌های مختلف درمی‌یابیم نسبت تندی‌های صوت در گسترهٔ شنوایی انسان می‌تواند در حدود 10^{13} باشد (جدول ۳ـ۴). برای بررسی چنین گسترهٔ وسیعی از تندی‌ها راحت‌تر آن است که از لگاریتم (در پایهٔ ۱۰) استفاده کنیم. یعنی به‌جای تندی I یک موج صوتی، سادتر این است که از تراز تندی صوت (تراز صوتی) که به‌صورت زیر تعریف می‌شود استفاده کنیم :

$$\beta=(10\,\text{dB})\log\left(\frac{I}{I_0}\right) \qquad \text{(تراز تندی صوت)} \qquad (۳ـ۱۲)$$

که در آن dB مخفف دسی‌بل، یکای تراز تندی صوت است که به افتخار الکساندر گراهام بل (۱۹۲۲ـ۱۸۴۷ م.) انتخاب شده است. همچنین I_0 تندی مرجع ($1/00\times10^{-12}W/m^2$) به این دلیل انتخاب شده است که نزدیک به حد پایین گسترهٔ شنیداری انسان است. یک موج صوتی با تندی $I=I_0$ تراز تندی صوتی برابر $0\,dB$ دارد. جدول ۳ـ۲، تندی‌ها و ترازهای تندی صوت را برای چند صدای متفاوت داده است.

جدول ۳ـ۴ تندی و تراز تندی صوت برای چند صدای متفاوت

صوت	تندی صوت (W/m^2)	تراز تندی صوت (dB)
نفس کشیدن در فاصلهٔ 3m	10^{-11}	10
پچ‌پچ در فاصلهٔ 1m	10^{-10}	20
کتابخانه	10^{-9}	30
خیابان بی‌سروصدا	10^{-8}	40
رستوران ساکت	10^{-7}	50
صحبت معمولی در فاصلهٔ 1m	10^{-6}	60
خیابان پر سروصدا	10^{-5}	70
در نزدیکی جارو برقی	10^{-4}	80
قطار در عبور از یک تقاطع	10^{-3}	90
کارگاه ماشین‌آلات پر سروصدا	10^{-2}	100
دستگاه پخش صوت در بیشترین صدای خود	10^{-1}	110
مهٔ سنگ‌شکن	10^{0}	120
موتور جت در فاصلهٔ 30m	10^{1}	130

۸۰

خوب است اشاره شود تراز شدت صوت را با یک سنجهٔ اندازه‌گیری تراز صوتی (sound level meter) اندازه می‌گیرند. شکل زیر طرحی از چنین وسیله‌ای را نشان می‌دهد.

فیلم

این فیلم، یک دسی‌بل‌سنج را نشان می‌دهد.

در اینجا خوب است تمرین پیشنهادی ۷ را در کلاس مطرح کنید و نشان دهید که مثلاً دو برابر شدن شدت صوت، فقط معادل یک افزایش ۳dB در تراز شدت صوت می‌شود.

در اینجا خوب است به مسئله ۲۸ نیز اشاره شود و توجه داده شود که در مورد آسیب شنوایی و تغییر آستانهٔ شنوایی مدت زمانی که در معرض صدای بلندی هستید نقش اساسی بازی می‌کند. در آن مسئله خواهید دید اگر بر فرض ۱۰ سال در معرض صدایی با تراز ۹۲dB باشید، آستانهٔ شنوایی برای همیشه به ۲۸dB افزایش می‌یابد، درحالی‌که اگر ۱۰ دقیقه در معرض صدای بلندتری با تراز شدت ۱۲۰dB قرار گیرید، آستانهٔ شنوایی فقط به‌طور موقت به ۲۸dB افزایش می‌یابد.

فیزیک ۳

تمرین ۳ـ۶

شخصی با چکش 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؟

شدت و تراز شدت صوت : انتشار صوت از هر چشمهٔ صوتی همراه با انتقال بی‌دریی 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).

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

که در آن $\overline{P}$ 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.

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^{13} باشد (جدول ۳ـ۳). 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، سادتر این است که از تراز شدت صوت (تراز صوتی) که به‌صورت زیر تعریف می‌شود استفاده کنیم :

$$\beta = (10\,\text{dB})\log\left(\frac{I}{I_0}\right) \qquad (۳ـ۱۲) \qquad \text{(تراز شدت صوت)}$$

که در آن dB مخفف دسی‌بل، یکای تراز شدت صوت است که به افتخار الکساندر گراهام‌بل (۱۹۲۲ـ۱۸۴۷ م.) انتخاب شده است. همچنین I_0 شدت مرجع ($1/00\times10^{-12}\,W/m^2$) 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 $0\,dB$ دارد. جدول ۳ـ۳، شدت‌ها و ترازهای شدت صوت را برای چند صدای متفاوت داده 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.

جدول ۳ـ۳ شدت و تراز شدت صوت برای چند صدای متفاوت

صوت	شدت صوت (W/m^2)	تراز شدت صوت (dB)
نفس کشیدن در فاصلهٔ 3m	10^{-11}	۱۰
چیچ در فاصلهٔ 1m	10^{-10}	۲۰
کتابخانه	10^{-9}	۳۰
خیابان بی‌سروصدا	10^{-8}	۴۰
رستوران ساکت	10^{-7}	۵۰
صحبت معمولی در فاصلهٔ 1m	10^{-6}	۶۰
خیابان پر سروصدا	10^{-5}	۷۰
در نزدیکی جارویرقی	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
مهٔ سنگین‌کن	10^{0}	۱۲۰
موتور جت در فاصلهٔ 30m	10^{1}	۱۳۰

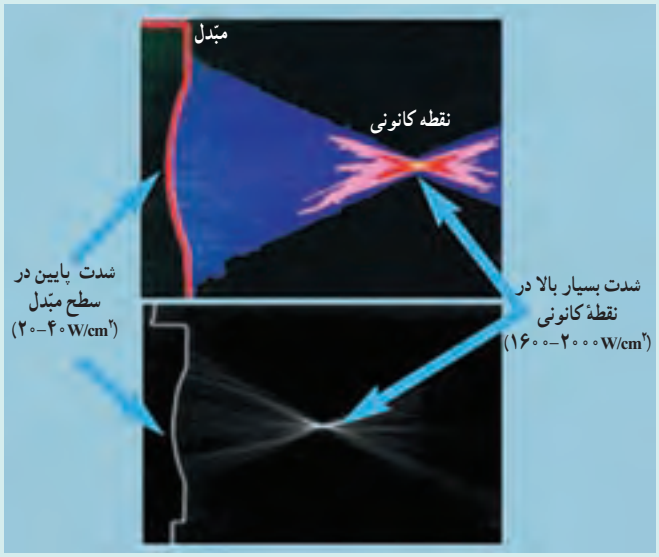
۸۰

دانستنی

هایفو[1]

این فناوری از امواج فراصوتی همگرا با شدت زیاد برای تولید گرما استفاده می‌کند. این امواج توسط مبدل‌های صوتی پرقدرت تولید می‌شوند. دستگاه HIFU دارای یک مبدل مقعر فراصوتی است که امواج فراصوتی را تولید و متمرکز می‌سازد. امواج متمرکز شده در ناحیه کانونی از انرژی بسیار بالایی برخوردار هستند و توسط یک کاوند، بافت موردنظر را احاطه می‌کنند و دما را در مدت بسیار کوتاه بالا می‌برند، به‌گونه‌ای که موجب بافت‌مردگی یا بسته شدن مجاری عروق در حال خونریزی می‌شوند. از این روش می‌توان در متوقف کردن خونریزی‌های داخلی مانند خونریزی کبد یا از بین بردن تومورهای خوش‌خیم و بدخیم استفاده کرد. با بافت مردگی توسط HIFU می‌توان بافت سرطانی موردنظر در پروستات کبد، مثانه، کلیه، رحم و طحال را بدون عوارض ناشی از جراحی مثل خونریزی، عفونت یا چسبندگی محل عمل و عوارض ناشی از بیهوشی از بین برد.

۱ـ High Intensity Focused Vltrasound



فصل ۳: نوسان و موج

مثال ۳ــ۱

تراز شدت صوت یک مخلوط کن ۸۰ dB 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 نُتِ موسیقی یا به‌اختصار نُت[1] گفته می‌شود. با شنیدن هر نُت، دو ویژگی را می‌توان از هم متمایز ساخت : ارتفاع[2] و بلندی[3] 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 ۲۰۰۰ Hz تا ۵۰۰۰ Hz است، در حالی که گوش انسان قادر به شنیدن نُت‌های صدای ۲۰ Hz تا ۲۰،۰۰۰ Hz است.

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 راننده 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

۱ــ Tone ۲ــ Pitch ۳ــ Loudness

۸۱

پاسخ تمرین ۳ــ۷

تفاوت ترازهای شدت صوت را محاسبه می‌کنیم :

$$\beta_2 - \beta_1 = (10\,\text{dB})\log\frac{I_2}{I_0} - (10\,\text{dB})\log\frac{I_1}{I_0}$$

$$= (10\,\text{dB})\log\frac{I_2}{I_1}$$

نسبت I_2/I_1 برابر ۱۰۰ داده شده است. بنابراین داریم :

$$\beta_2 - \beta_1 = (10\,\text{dB})\log 10^2 = (20\,\text{dB})\log 10$$

$$= 20\,\text{dB}$$

خوب است تأکید شود بلندی علاوه بر شدت به بسامد صوت نیز بستگی دارد؛ به این معنی که دو صوت با شدت یکسان و بسامدهای متفاوت، با بلندی‌های متفاوتی حس می‌شود. در اینجا همچنین خوب است نموداری از منحنی‌های هم‌بلندی را برای گسترهٔ شنوایی انسان به دانش‌آموزان نشان دهیم. این منحنی‌ها که مبتنی بر آزمایش هستند نتیجه‌ای مانند شکل زیر را به‌دست می‌دهند.

هر منحنی هم‌بلندی را با تراز صوتی آن برحسب دسی‌بل در بسامد ۱۰۰۰Hz مشخص می‌کنند و آن را با فون (Phone) نمایش می‌دهند. مثلاً منحنی ۶۰Phone به معنی صداهای هم‌بلندی‌ای با صدای ۱۰۰۰Hz با تراز صوتی ۶۰dB است. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که صداهایی با شدت یکسان را می‌توان در بسامدهای متفاوت با بلندی مختلف شنید. منحنی ۰Phone مربوط به آستانهٔ شنوایی است، یعنی پایین‌تر از ۰Phone صدایی شنیده نمی‌شود. همچنین منحنی ۱۲۰Phone مربوط به آستانهٔ دردناکی است، یعنی صداهای بالاتر از ۱۲۰Phone موجب به درد آمدن گوش می‌شود. همچنین به رفتار این منحنی‌ها با بسامد توجه کنید. به جز منحنی آستانهٔ دردناکی، بقیهٔ منحنی‌ها، وابستگی زیادی به بسامد دارند. به‌خصوص به منحنی آستانهٔ شنوایی توجه کنید که چه وابستگی زیادی به بسامد دارد.

فصل ۳: نوسان و موج

مثال ۳ـ۹

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

پاسخ: با استفاده از رابطهٔ ۳ـ۱۲ داریم:

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

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

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

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

تمرین ۳ـ۷

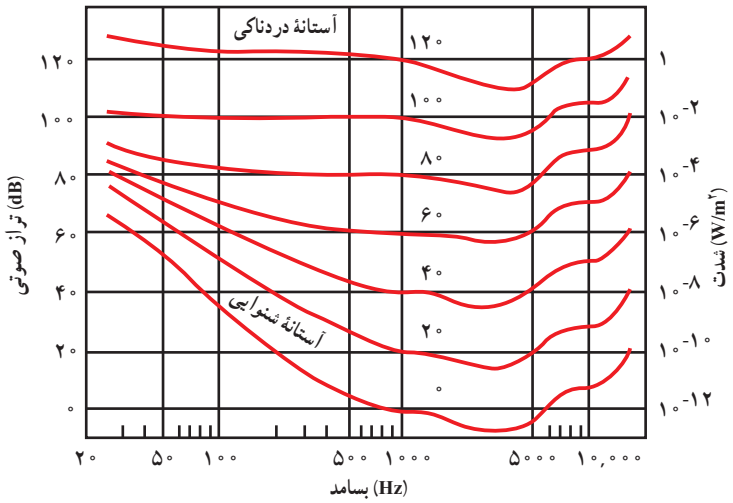
با زیاد کردن صدای تلویزیونی، شدت صوتی که به گوش ما می‌رسد ۱۰۰ برابر می‌شود. تراز شدت صوتی که می‌شنویم چند دسی‌بل افزایش یافته است؟

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 نُتِ موسیقی یا به‌اختصار نُت[1] گفته می‌شود. با شنیدن هر نُت، دو ویژگی را می‌توان از هم متمایز ساخت: ارتفاع[2] و بلندی[3] 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 بسامدهای در گسترهٔ ۲۰۰۰Hz تا ۵۰۰۰Hz است، در حالی که گوش انسان قادر به شنیدن نُت‌های صدای ۲۰Hz تا ۲۰،۰۰۰Hz است.

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 راننده 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

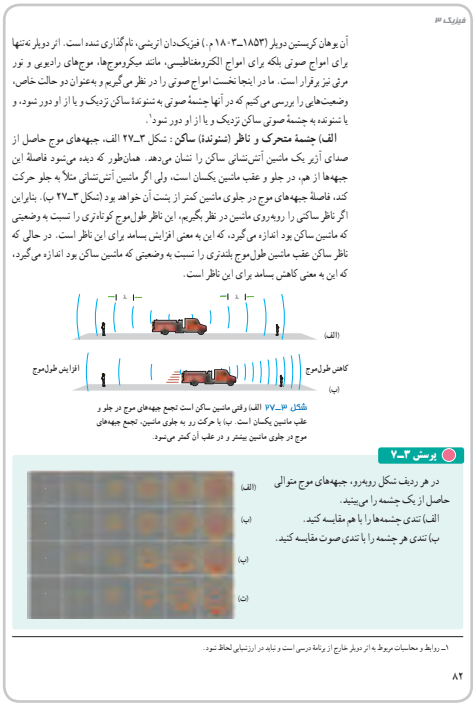
۱ـ Tone ۲ـ Pitch ۳ـ Loudness

۸۱



طرحی از منحنی‌های هم‌بلندی، و منحنی‌های آستانهٔ شنوایی و آستانهٔ دردناکی

خوب است از جنبهٔ اطلاعات عمومی بدانید که شیمی‌دان هلندی بویز *بالوت* (۱۸۹۰ــ ۱۸۱۷م.) نخستین کسی بود که اثر دوپلر را در سال ۱۸۴۵، با استفاده از یک که ماشینی روباز حامل چند ترومپ‌نواز را می‌کشید، به‌طور تجربی آزمود.



فیزیک ۳

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[1].

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.

(الف)
کاهش طول‌موج
افزایش طول‌موج
(ب)

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.

(الف)
(ب)
(پ)
(ت)

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

۸۲

فیلم

در این فیلم توضیحی تحلیلی از اثر دوپلر را مشاهده می‌کنید.

فیلم

در این فیلم اثر دوپلر را با استفاده از یک دیاپازون درمی‌یابید.

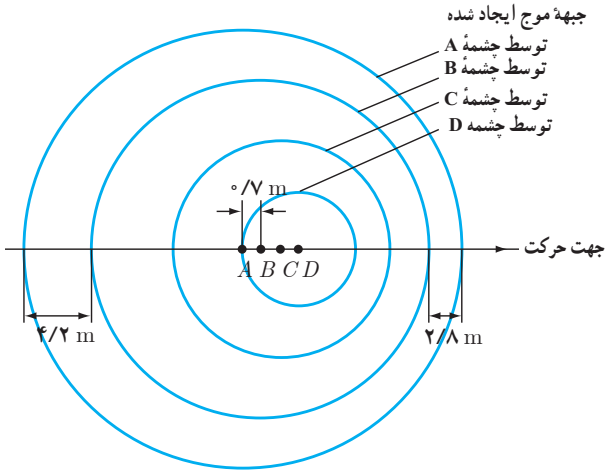
فیلم

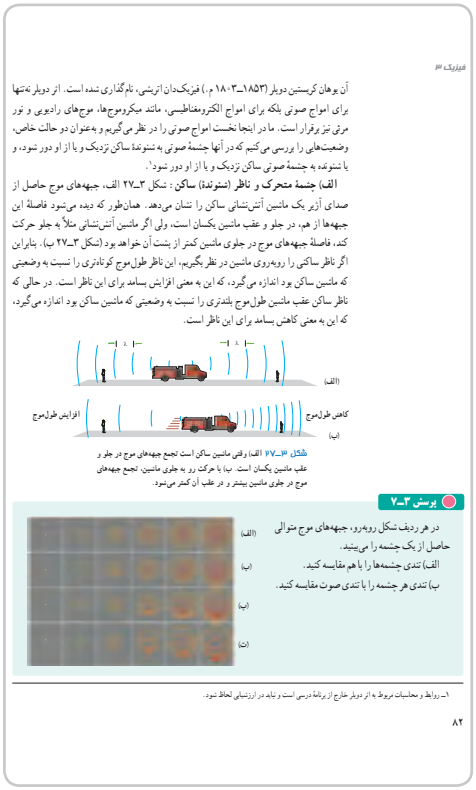
در این فیلم اثر دوپلر را با یک میلهٔ سوت‌زنهٔ چرخان می‌بینید.

توجه کنید که اثر دوپلر یک تک‌بسامد را برای بسامدی که ناظر (آشکارساز) اندازه می‌گیرد به‌دست می‌دهد ولی با این حال شما در کمال تعجب درمی‌یابید که در واقع چنین نیست. مثلاً اگر در کنار خط آهنی ایستاده باشید و قطاری سوت‌زنان از کنارتان بگذرد متوجه تغییر بسامد آن می‌شوید. وقتی قطار به طرف شما حرکت می‌کند افزایش مدامی را در بسامد حس می‌کنید (یعنی صدا را مدام زیر و زیرتر می‌شنوید) و وقتی قطار از شما دور می‌شود کاهش مداومی را در بسامد حس می‌کنید (یعنی صدا را مدام بم و بم‌تر می‌شنوید). به این پدیده *توهم اثر دوپلر*[1] می‌گویند. همان‌طور که پیش‌تر گفته بودیم آنچه گوش ما از بسامد حس می‌کند، ارتفاع صوت است. ارتفاعی که حس می‌شود علاوه بر بسامد به شدت صوت نیز بستگی دارد. با نزدیک شدن قطار، شدت صدای سوتِ آن مدام زیاد می‌شود و شما به غلط فکر می‌کنید که بسامد زیاد می‌شود و چون با دور شدن قطار شدت صدای سوتِ آن مدام کمتر می‌شود، به غلط فکر می‌کنید که بسامد آن دائماً کاهش می‌یابد.

۱ــ The Doppler illusion

در تفهیم شکل ۳ــ۲۷ (ب) نمایش نمودارهای واقعی‌تر مانند شکل زیر که مبتنی بر روابط دقیق ریاضی است، سودمند است. این تصویر به چشمهٔ صوتی با بسامد ۱۰۰Hz مربوط است که با تندی ۷۰m/s به سمت شما (ناظر) می‌آید. همان‌طور که دیده می‌شود وقتی چشمه به سمت ناظر می‌رود، طول موج‌ها در جهت حرکت کاهش می‌یابد.





فیزیک ۳

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[1].

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.

(الف)
کاهش طول‌موج
افزایش طول‌موج
(ب)

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.

(الف)
(ب)
(پ)
(ت)

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

۸۲

پاسخ پرسش ۳ــ۷

در شکل (الف)، یک چشمهٔ صوت *ساکن* امواج کروی گسیل می‌کند. توجه کنید که فاصلهٔ شعاعی بین جبهه‌های موج یکسان است. در شکل‌های (ب) و (پ) چشمهٔ صوت به سمت راست حرکت کرده است. تنها تفاوت شکل‌های (ب) و (پ) در این است که تندی چشمهٔ صوت در (پ) بیشتر از این تندی در (ب) است و بدین ترتیب ازدحام جبهه‌های موج در جلوی چشمهٔ گسیلندهٔ شکل (پ) بیشتر از شکل (ب) است. ناظری که در سمت راست چشمه‌ها قرار گرفته است در واحد زمان جبهه‌های موج بیشتری را از (پ) نسبت به (ب) دریافت می‌کند و بنابراین بسامدی که می‌شنود نیز بالاتر است. با این حال در هر دوی این شکل‌ها تندی چشمهٔ صوت کمتر از تندی صوت است. اما در شکل (ت) چشمهٔ صوت با تندی‌ای بزرگ‌تر از تندی صوت به سمت راست حرکت می‌کند، زیرا سریع‌تر از جبهه‌های موج در حرکت است. در این شکل‌ها به رنگ‌های به کار گرفته شدهٔ زرد و قرمز توجه کنید. در شکل (ت) که چشمهٔ صوت با تندی بزرگ‌تر از جبهه‌های موج ایجاد شده حرکت می‌کند، منحنی‌های قرمز از زرد بیرون زده‌اند و مخروطی ایجاد شده است که به آن *مخروط ماخ* می‌گویند. در چنین وضعیت‌هایی دیگر معادله‌هایی که برای اثر دوپلر ارائه می‌شوند به کار نمی‌آیند. در هر حال، پاسخ پرسش ۳ــ۷ به این ترتیب می‌شود که تندی چشمه‌ها به ترتیب از شکل (الف) تا شکل (ت) افزایش می‌یابند و همچنین در شکل‌های (الف) تا (پ) تندی چشمه‌ها کوچک‌تر از تندی صوت است، ولی در شکل (ت) این تندی بیشتر از تندی صوت می‌شود.

خوب است در پایان پرسش ۳ـ۷ دانش‌آموزان علاقه‌مند را به مطالعهٔ دانستنی مربوط به تندی‌های اَبَرصوتی و موج‌های شوکی ارجاع دهید.

فیلم

در این فیلم جبهه‌های موج حاصل از چشمه‌هایی با تندی‌های مختلف را می‌بینید.

فیزیک ۳

آن یوهان کریستین دوپلر (۱۸۵۳ـ۱۸۰۳ 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[1].

الف) چشمهٔ متحرک و ناظر (شنوندهٔ) ساکن : شکل ۳ـ۲۷ 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 ۳ـ۲۷ 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.

افزایش طول‌موج — کاهش طول‌موج — (الف) — (ب)

شکل ۳ـ۲۷ 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 ۳ـ۷

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.

(الف) (ب) (پ) (ت)

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

۸۲

خوب است به دانش‌آموزان پیشنهاد شود که با خواندن اثبات ریاضی این مباحث و با مشاهدهٔ روابط اثر دوپلر، سوای درکی شهودی به درکی عمیق‌تر نیز دست پیدا کنند. مثلاً توجه آنها به اهمیت تندی نسبی در وضعیت ب بررسی شده می‌تواند راهگشا باشد.

فیلم

در این فیلم‌ها اثر دوپلر را برای حالت‌های مختلف مشاهده می‌کنید.

فصل ۳: نوسان و موج

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 ۳ـ۲۸).

شکل ۳ـ۲۸ 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.

اثر دوپلر برای امواج الکترومغناطیسی : همان‌طور که گفتیم برای موج‌های الکترومغناطیسی همانند نور یا امواج رادیویی نیز اثر دوپلر برقرار است، ولی بررسی آن با اثر دوپلر در صوت متفاوت است. هر گاه چشمهٔ موج الکترومغناطیسی نسبت به ناظر (آشکارساز) در حرکت باشد، بسامد و طول‌موج دریافتی از این چشمه تغییر می‌کند. اندازه‌گیری این تغییرات (جابه‌جایی دوپلری) نقش مهمی در اخترشناسی دارد. در رصدهای نجومی ستارگان، کهکشان‌ها و سایر چشمه‌های نوری سماوی، چه هنگامی که از ما دور می‌شوند و چه هنگامی که به ما نزدیک می‌شوند، با اندازه‌گیری جابه‌جایی دوپلری نور آنها می‌توان اطلاعاتی در مورد تندی و چگونگی حرکت آنها به‌دست آورد. این جابه‌جایی دوپلری صرفاً ناشی از حرکت آن اجرام سماوی نسبت به ناظر (آشکارساز) است. وقتی چشمهٔ نور از ناظر (آشکارساز) دور می‌شود، طول‌موج افزایش می‌یابد که به آن اصطلاحاً *انتقال به سرخ*[1] می‌گویند و وقتی چشمهٔ نور به ناظر نزدیک می‌شود، طول‌موج کاهش پیدا می‌کند که به آن اصطلاحاً *انتقال به آبی*[2] می‌گویند (شکل ۳ـ۲۹).

شکل ۳ـ۲۹ اگر کهکشانی به ما نزدیک یا از ما دور شود، بسامد و طول‌موج دریافتی از آن تغییر می‌کند.

۱ـ Red Shift ۲ـ Blue Shift

۸۳

دانستنی

فرمول‌بندی اثر دوپلر

الف) چشمهٔ متحرک و ناظر (آشکارساز) ساکن : دیدیم که در وضعیتی که چشمه به طرف ناظر حرکت کند، ناظر بسامد بیشتری را ادراک می‌کند. اکنون می‌خواهیم رابطه‌ای برای این افزایش بسامد به‌دست آوریم. توجه کنید اگر ماشین ساکن می‌بود در آن صورت مسافتی که موج در یک دورهٔ تناوب T طی می‌کرد برابر vT می‌شد که در آن v تندی صوت است. ولی در این‌جا ماشین حرکتی به سمت جلو داشته است و بنابراین در همان بازهٔ زمانی T، ماشین به اندازهٔ $v_S T$ به‌جلو حرکت کرده است که در آن v_S تندی چشمه (ماشین) است. بنابراین طول موج در جلوی چشمه تفاضل این دو مسافت می‌شود :

$$\lambda' = vT - v_S T$$

فرض کنید ناظر ساکن در جلوی چشمه بسامد ظاهری f_D را برای صوت اندازه بگیرد. با توجه به اینکه طول موج در جلوی چشمه برابر با λ' است، بسامد f_D چنین می‌شود.

$$f_D = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{vT - v_S T} = \frac{v}{(v - v_S)T}$$

که در آن T دورهٔ تناوب صوت حاصل از چشمه است که طبق رابطهٔ $f_s = \frac{1}{T}$ به بسامد f_S چشمه مربوط می‌شود. بنابراین

$$f_D = f_S \frac{v}{v - v_S}$$

بدیهی است که برای ناظر ساکنی که چشمه از آن دور می‌شود به رابطهٔ زیر می‌رسیم

$$f_D = f_S \frac{v}{v + v_S}$$

این دو رابطه را می‌توان در یک رابطه خلاصه کرد :

$$f_D = f_S \frac{v}{v \pm v_S}$$

که علامت + مربوط به دور شدن چشمه از ناظر ساکن و علامت − مربوط به نزدیک‌شدن چشمه به ناظر ساکن است.

ب) چشمهٔ ساکن و ناظر (آشکارساز) متحرک : در این حالت بسته به اینکه ناظر به چشمه نزدیک یا از آن دور شود تندی صوت نسبت به او تغییر خواهد کرد در حالی‌که تجمع جبهه‌های موج در دو سویِ چشمه یکسان است. با این حال بسامدی که ناظر اندازه می‌گیرد نسبت به وضعیتی که هر دو ساکن بودند متفاوت خواهد بود. زیرا اگر ناظر به طرف چشمه حرکت کند با جبهه‌های موج بیشتری مواجه می‌شود که این به معنی افزایش بسامد است. تندی صوت نسبت به ناظری که با تندی v_D به چشمهٔ ساکن نزدیک می‌شود برابر با $v + v_D$ است که v تندی صوت در هوا است. بنابراین، این ناظر صوت را با بسامد ظاهری f_D اندازه می‌گیرد که از تقسیم تندی صوت نسبت به این ناظر به طول موج صوت به‌دست می‌آید

$$f_D = \frac{v + v_D}{\lambda}$$

که در آن λ طول موج صوت برای چشمهٔ ساکن و برابر با v/f_S است. بنابراین

$$f_D = f_S \frac{v + v_D}{v}$$

بدیهی است برای ناظری که با تندی v_D از چشمه دور می‌شود به رابطهٔ زیر می‌رسیم

$$f_D = f_S \frac{v - v_D}{v}$$

این دو رابطه را می‌توان در یک رابطه خلاصه کرد :

$$f_D = f_S \frac{v \pm v_D}{v}$$

که علامت + مربوط به نزدیک شدن ناظر به چشمهٔ ساکن و علامت − مربوط به دور شدن ناظر از چشمهٔ ساکن است.

معادلهٔ کلی اثردوپلر. اگر آشکارساز یا چشمه یا هر دو در حرکت باشند، نشان داده می‌شود که بسامد صوت گسیل شده از چشمه (f_S) و بسامد آشکار شده توسط آشکارساز (f_D) با رابطهٔ کلی زیر به هم مربوط می‌شوند

$$f_D = f_S \frac{v \pm v_D}{v \pm v_S}$$

در این رابطه فرض شده است که جهت مثبت محور x از چشمهٔ صوت به سمت ناظر (آشکارساز) است. در استفاده از رابطهٔ بالا باید از قواعد زیر برای علامت‌های پشت v_D و v_S بهر بگیریم :

الف) اگر چشمهٔ صوت در جهت مثبت محور x حرکت کند، علامت پشت v_S منفی می‌شود و در صورتی که درخلاف جهت مثبت محور x حرکت کند، علامت پشت v_S مثبت می‌شود.

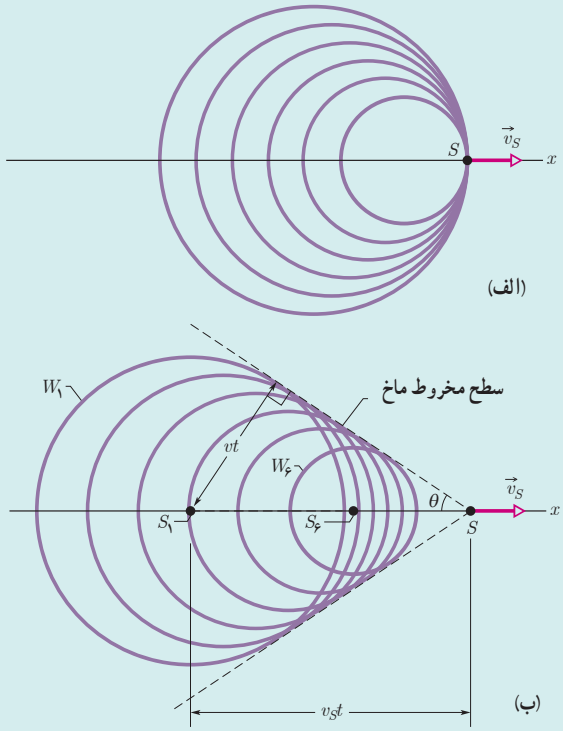
ب) اگر ناظر (آشکارساز) در جهت مثبت محور x حرکت کند، علامت پشت v_D منفی می‌شود و در صورتی که در خلاف جهت مثبت محور x حرکت کند، علامت پشت v_D مثبت می‌شود.

دانستنی

تندی‌های اَبَرصوتی، موج‌های شوکی

اگر چشمه‌ای با تندی v_S برابر با تندی صوت v به یک آشکارساز ساکن نزدیک شود، معادله‌های اثر دوپلر پیش‌بینی می‌کنند که بسامد آشکارشده f_D بی‌نهایت بزرگ خواهد شد. این بدین معنی است که چشمه چنان سریع در حرکت است که مانند شکل ۱ الف، با جبهه‌های موج کروی خود هم‌گام می‌شود. هرگاه $v_S > v$ باشد، چه اتفاقی رخ می‌دهد؟ برای چنین تندی‌های *اَبرصوتی*[1]، دیگر معادله‌های اثر دوپلر به‌کار نمی‌آیند. شکل ۱ ب جبهه‌های موج کروی را نشان می‌دهد که از مکان‌های مختلفی از چشمه نشأت گرفته‌اند. شعاع هر جبههٔ موج در این شکل vt است، که در آن t زمانی است که از گسیل آن جبههٔ موج توسط چشمه گذشته است.

۱ـ Supersonic



شکل ۱ (الف) چشمهٔ صوتی S با تندی v_S برابر با تندی صوت و در نتیجه با همان سرعتی که جبهه‌های موج ایجاد می‌شوند، حرکت می‌کند. (ب) چشمهٔ صوتی S با تندی v_S بزرگ‌تر از تندی صوت و در نتیجه سریع‌تر از جبهه‌های موج حرکت می‌کند. وقتی چشمه در مکان S_1 قرار دارد، جبههٔ موج W_1 و وقتی در مکان S_2 قرار دارد، جبههٔ موج W_2 را ایجاد می‌کند. همهٔ جبهه‌های موج کروی با تندی صوت v گسترش می‌یابند و درون یک سطح مخروطی موسوم به مخروط ماخ دسته می‌شوند، و بدین ترتیب موجی شوکی را تشکیل می‌دهند. زاویهٔ سطح مخروط برابر نیم ـ زاویهٔ θ است که بر تمام جبهه‌های موج مماس است.

توجه کنید که تمام جبهه‌های موج در یک پوش V– شکل در این شکل دوبُعدی دسته شده‌اند. البته جبهه‌های موج در واقع در سه بُعد گسترش می‌یابند، و دسته شدن آنها عملاً مخروطی موسوم به *مخروط ماخ* را تشکیل می‌دهد. گفته می‌شود که یک موج شوکی بر سطح این مخروط وجود دارد، زیرا وقتی این سطح از هر نقطه می‌گذرد جبهه‌های موج موجب بالا و پایین رفتن ناگهانی فشار هوا می‌شوند. از شکل ۱ ب می‌توان دید که نیم زاویهٔ θ ی مخروط، موسوم به زاویهٔ مخروط ماخ چنین داده می‌شود

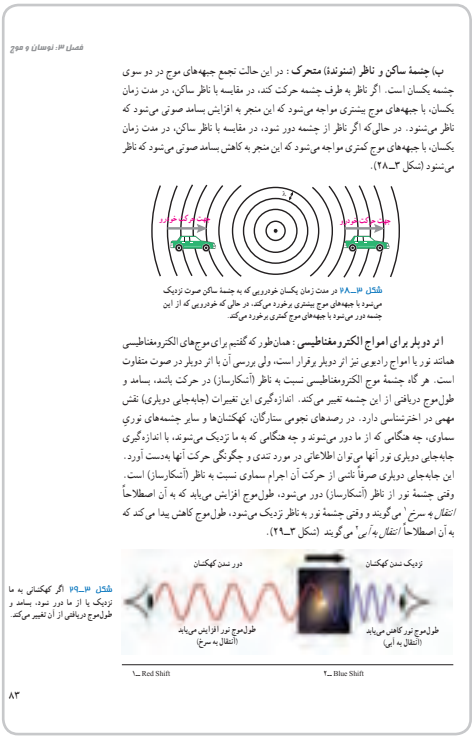
$$\sin\theta = \frac{vt}{v_S t} = \frac{v}{v_S} \quad \text{(زاویهٔ مخروط ماخ)}$$

نسبت v_S/v را ***عدد ماخ*** می‌نامند. وقتی گفته می‌شود یک هواپیما با ۲/۳ ماخ پرواز می‌کند، به این معناست که تندی آن ۲/۳ برابر تندی صوت در هوایی است که هواپیما در آن پرواز می‌کند. موج‌های شوکی‌ای که توسط هواپیماهای اَبَرصوتی (شکل‌های ۲ الف و ب) یا موشک‌ها ایجاد می‌شوند، انفجاری از صدا موسوم به غرّش صوتی را ایجاد می‌کنند که در آن فشار هوا ابتدا ناگهان افزایش می‌یابد و سپس پیش از برگشتن به حالت عادی، ناگهان به زیر حالت عادی کاهش پیدا می‌کند. بخشی از صدایی که هنگام شلیک گلوله به گوش می‌رسد، غرّش صوتی است که توسط گلوله ایجاد شده است.

شکل ۲ (الف) موج‌های شوکی که توسط بال‌های یک هواپیمای جت ایجاد شده است. موج‌های شوکی از آن‌رو قابل مشاهده‌اند که کاهش ناگهانی در فشار هوای آنها باعث چگالش مولکول‌های آب در هوا و تشکیل مه می‌شود.

شکل ۲ (ب). طرحی از چگونگی ایجاد موج شوکی شکل ۲ الف.

همچنین وقتی شلاق چرمی بلندی را به‌سرعت تکان می‌دهید، نوک آن سریع‌تر از صوت حرکت می‌کند و موجب یک غرّش صوتی[1] کوچک می‌شود که همان صدای شکستن شلاق است.



فصل ۳: نوسان و موج

ب) **جسمهٔ ساکن و ناظر (متوندهٔ) متحرک**: در این حالت تجمع جبهه‌های موج در دو سوی جسمه یکسان است. اگر ناظر به طرف جسمه 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 جسمه 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 ۳ـ۲۸).

شکل ۳ـ۲۸ در مدت زمان یکسان خودرویی که به جسمهٔ ساکن صوت نزدیک می‌شود با جبهه‌های موج بیشتری برخورد می‌کند. در حالی که خودرویی که از این جسمه دور می‌شود با جبهه‌های موج کمتری برخورد می‌کند.

اثر دوپلر برای امواج الکترومغناطیسی: همان‌طور که گفتیم برای موج‌های الکترومغناطیسی همانند نور یا امواج رادیویی نیز اثر دوپلر برقرار است، ولی بررسی آن با اثر دوپلر در صوت متفاوت است. هر گاه جسمهٔ موج الکترومغناطیسی نسبت به ناظر (آشکارساز) در حرکت باشد، بسامد و طول‌موج دریافتی از این جسمه تغییر می‌کند. اندازه‌گیری این تغییرات (جابه‌جایی دوپلری) نقش مهمی در اخترشناسی دارد. در رصدهای نجومی ستارگان، کهکشان‌ها و سایر جسمه‌های نوری سماوی، چه هنگامی که از ما دور می‌شوند و چه هنگامی که به ما نزدیک می‌شوند، با اندازه‌گیری جابه‌جایی دوپلری نور آنها می‌توان اطلاعاتی در مورد تندی و چگونگی حرکت آنها به‌دست آورد. این جابه‌جایی دوپلری صرفاً ناشی از حرکت آن اجرام سماوی نسبت به ناظر (آشکارساز) است. وقتی جسمهٔ نور از ناظر (آشکارساز) دور می‌شود، طول‌موج افزایش می‌یابد که به آن اصطلاحاً *انتقال به سرخ*[1] می‌گویند و وقتی جسمهٔ نور به ناظر نزدیک می‌شود، طول‌موج کاهش پیدا می‌کند که به آن اصطلاحاً *انتقال به آبی*[2] می‌گویند (شکل ۳ـ۲۹).

شکل ۳ـ۲۹ اگر کهکشانی به ما نزدیک یا از ما دور شود، بسامد و طول‌موج دریافتی از آن تغییر می‌کند.

۱ـ Red Shift
۲ـ Blue Shift

۸۳

محض اطلاعات عمومی خوب است به اثر دوپلر برای نور اشاره شود، اثر دوپلر برای موج‌های نوری فقط به سرعت نسبی $\vec{v}$ بین چشمه و آشکارساز (وقتی در یک چارچوب مرجع اندازه‌گیری شوند) بستگی دارد. اگر f_0 را بسامدی بگیریم که توسط ناظر در چارچوب ساکن چشمه اندازه‌گیری می‌شود و f بسامد آشکار شده توسط ناظری باشد که با سرعت $\vec{v}$ نسبت به چارچوب ساکن حرکت می‌کند، آنگاه اگر ناظر در جهت دور شدن از چشمه باشد برای بسامد f داریم:

$$f = f_0\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}$$

(که در آن $\beta = v/c$ و c تندی نور است) و اگر v در جهت نزدیک شدن باشد علامت‌های پشت β عوض می‌شوند. به همین ترتیب برای طول موج λ داریم:

$$\lambda = \lambda_0\sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$$

که برای وضعیت نزدیک شدن، علامت‌های β عوض می‌شود.

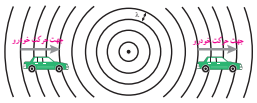
۱ـ Sonic boom

در مورد واژه‌های انتقال به سرخ و انتقال به آبی توجه کنید که منظور از واژه‌های سرخ و آبی این نیست که نور آشکار شده سرخ یا آبی است، بلکه این واژه‌ها صرفاً تمهیدی برای به خاطر سپردن این است که طول موج دریافتی به سمت طول موج‌های بلند یا کوتاه انتقال یافته است.

فیلم

در این فیلم توضیح مصوّری از انتقال به سرخ کیهانی را می‌بینید.

ب) چشمهٔ ساکن و ناظر (شنونده) 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.

اثر دوپلر برای امواج الکترومغناطیسی: همان‌طور که گفتیم برای موج‌های الکترومغناطیسی همانند نور یا امواج رادیویی نیز اثر دوپلر برقرار است، ولی بررسی آن با اثر دوپلر در صوت متفاوت است. هر گاه چشمهٔ موج الکترومغناطیسی نسبت به ناظر (آشکارساز) در حرکت باشد، بسامد و طول‌موج دریافتی از این چشمه تغییر می‌کند. اندازه‌گیری این تغییرات (جابه‌جایی دوپلری) نقش مهمی در اخترشناسی دارد. در رصدهای نجومی ستارگان، کهکشان‌ها و سایر چشمه‌های نوری سماوی، چه هنگامی که از ما دور می‌شوند و چه هنگامی که به ما نزدیک می‌شوند، با اندازه‌گیری جابه‌جایی دوپلری نور آنها می‌توان اطلاعاتی در مورد تندی و چگونگی حرکت آنها به‌دست آورد. این جابه‌جایی دوپلری صرفاً ناشی از حرکت آن اجرام سماوی نسبت به ناظر (آشکارساز) است. وقتی چشمهٔ نور از ناظر (آشکارساز) دور می‌شود، طول‌موج افزایش می‌یابد که به آن اصطلاحاً *انتقال به سرخ*[1] می‌گویند و وقتی چشمهٔ نور به ناظر نزدیک می‌شود، طول‌موج کاهش پیدا می‌کند که به آن اصطلاحاً *انتقال به آبی*[2] می‌گویند (شکل ۳ــ۲۹).

شکل ۳ــ۲۹ اگر کهکشانی به ما نزدیک یا از ما دور شود، بسامد و طول‌موج دریافتی از آن تغییر می‌کند.

۱ــ Red Shift ۲ــ Blue Shift

پاسخ پرسش ۳ــ۸

همان‌طور که در شکل ۳ــ۲۹ کتاب نشان داده شده است در مورد امواج الکترومغناطیسی با دور شدن چشمهٔ نور، طول موج دریافتی افزایش می‌یابد و اصطلاحاً انتقال به سرخ داریم. بنابراین با افزایش طول موج، بسامد کمتر می‌شود و در نتیجه آشکارساز نوری با بسامد کمتر را دریافت می‌کند و $f < f_0$ می‌شود.

پرسش ۳ــ۸

شکل زیر چشمهٔ نوری را نشان می‌دهد که در حال حرکت به‌طرف راست است. چشمه، نوری با بسامد f_0 را گسیل می‌کند. بسامد نوری که آشکارساز ساکن دریافت می‌کند بیشتر از f_0 است یا کمتر؟

همچنین همان‌طور که در فصل بعد خواهید دید، می‌توان با ارسال یک موج رادیویی به سوی خودرویی در حال حرکت و دریافت بازتاب این موج و در نظر گرفتن اثر دوپلر، تندی خودرو را به‌دست آورد؛ روشی که پلیس در کنترل تندی خودروها در جاده‌ها به‌کار می‌برد (شکل ۳ــ۳۰).

شکل ۳ــ۳۰ تعیین تندی خودروها به کمک اثر دوپلر

پرسش‌های پیشنهادی

۱ چرا با تلفن اسباب بازی که از دو غشا که با ریسمان یا سیم کشیده و متصل به هم تشکیل شده است، می‌توان حتی صدای یک نجوا را از فاصلهٔ دور شنید؟

پاسخ : موج صوتی، موجی طولی است که در امتداد سیم منتشر می‌شود و همچنین جذب این موج در ماده بسیار کم است.

۲ آپارتمانی به فاصلهٔ ۳/۷۵ km از یک استادیوم فوتبال قرار دارد. شخصی یک بازی فوتبال را از تلویزیون می‌بیند. او صدای هلهلهٔ تماشاگران را ۱۱/۲ s پس از اینکه از تلویزیون شنید از بیرون می‌شنود. آیا او می‌تواند حدس بزند دمای محل استادیوم بیش یا کمتر از ۲۰°C است؟ (راهنمایی : تندی صوت در دمای ۲۰°C حدوداً برابر ۳۴۳ m/s است.)

پاسخ : سیگنال‌های تلویزیون با تندی نور حرکت می‌کنند و همزمان با رخداد در استادیوم به شخص می‌رسند. بنابراین صدای هلهله مربوط به تندی صوت است. تندی صوت در هوا برابر است با

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{۳/۷۵\times۱۰^{۳}\,\mathrm{m}}{۱۱/۲\,\mathrm{s}} = ۳۳۴/۸\,\mathrm{m/s} \approx ۳۳۵\,\mathrm{m/s}$$

این عدد از ۳۴۳m/s کمتر است. بنابراین دمای استادیوم کمتر از ۲۰°C است. محاسبه نشان می‌دهد مقدار آن برابر ۶/۴°C است.

۳ هرگاه خط‌کشی را روی یک میز قرار دهیم، طوری که بخشی از آن بیرون میز قرار گیرد و سپس به انتهای آن بخش ضربه بزنیم، آن بخش شروع به ارتعاش می‌کند. هرچه بخش بیشتری از خط‌کش بیرون میز قرار گیرد صدای بم‌تری می‌شنویم. چرا؟

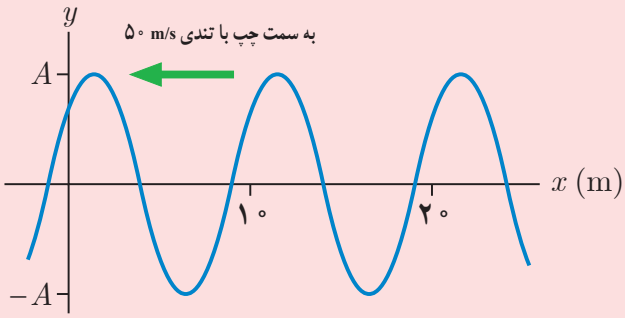
پاسخ : تختهٔ کوتاه‌تر با سرعت بیشتری ارتعاش می‌کند و صوت‌هایی با ارتفاع زیاد ایجاد می‌کند و بنابراین صدایی زیرتر تولید می‌کند. درحالی که تختهٔ بلندتر به آرامی ارتعاش می‌کند و صدایی که ایجاد بسامد کمتری داد و صدا بم‌تر به‌گوش می‌رسد. برای همین است که بال حشرات کوچک صدایی زیرتر از بال حشرات بزرگ ایجاد می‌کند.

۴ چرا وقتی شمعی را مقابل بلندگویی قرار می‌دهیم، شعلهٔ آن به جلو و عقب کشیده می‌شود؟

پاسخ : همان‌طور که دیدیم با ارتعاش دیافراگم بلندگو، هوای پیرامون آن در حرکت به طرف جلو متراکم و در حرکت به طرف عقب منبسط می‌شود و همین آشفتگی نیز باعث نوسان شعلهٔ شمع می‌شود.

تمرین‌های پیشنهادی

۱ بسامد موج پیشروندهٔ شکل زیر چقدر است؟



پاسخ : از روی شکل و با استفاده از رابطهٔ ۳ـ۹ داریم :

$$f=\frac{v}{\lambda}=\frac{۵۰\,m/s}{۱۰\,m}=۵/۰\,s^{-۱}=۵/۰\,Hz$$

۲ یک سر یک طناب نایلونی به تکیه‌گاهی در بالای یک چاه قائم به ارتفاع ۸۰ m بسته شده است. طناب توسط جعبه‌ای سنگین به جرم ۲۰/۰ kg در انتهای چاه، محکم کشیده شده است. جرم طناب ۲/۰۰ kg است. شخصی در ته چاه، با تکان دادن طناب، علامتی به همکارش در بالای چاه می‌فرستد. الف) تندی موج عرضی روی طناب چقدر است؟ ب) اگر نقطه‌ای از طناب با بسامد ۲۰ Hz به‌طور هماهنگ با بسامد ۲۰ Hz به نوسان درآید، طول موجِ موج چقدر می‌شود؟ (چون جرم طناب در مقایسه با جرم جعبه کوچک است فرض کنید کشش طناب در سرتاسر طناب یکسان است).

پاسخ : توجه کنید که اگر جرم طناب را لحاظ کنیم، کشش در بالای طناب بزرگتر از پایین آن می‌شود. بنابراین همان‌طور که در صورت مسئله آمده است مسئله را با فرض ثابت بودن کشش طناب حل می‌کنیم.

الف) از رابطهٔ $v=\sqrt{F/\mu}$ استفاده می‌کنیم که در آن

$$F=mg=(۲۰/۰\,kg)\,(۹/۸۰\,N/kg)=۱۹۶\,N$$

و

$$\mu=\frac{m}{L}=\frac{۲/۰۰\,kg}{۸۰/۰\,m}=۰/۲۵۰\,kg/m$$

در نتیجه

$$v=\sqrt{\frac{۱۹۶\,N}{۰/۲۵۰\,kg/m}}=۸۸/۵\,m/s$$

ب) از رابطهٔ $v=\lambda/f$ استفاده می‌کنیم :

$$\lambda=\frac{v}{f}=\frac{۸۸/۵\,m/s}{۲۰/۰\,s^{-۱}}=۴/۴۳\,m$$

۳ گسترهٔ طول موج‌های رادیویی (الف) باند AM در گسترهٔ بسامدی ۵۴۰ تا ۱۶۰۰ کیلوهرتز، و (ب) باند FM در گسترهٔ بسامدی ۸۸/۰ تا ۱۰۸ مگاهرتز را به‌دست آورید.

پاسخ : الف) به ترتیب برای حدّ بالا و حدّ پایین داریم :

$$\lambda_{\text{بالا}} = \frac{c}{f_۱} = \frac{۳/۰۰\times۱۰^۸\,m/s}{۵۴۰\times۱۰^۳\,s^{-۱}} = ۵/۵۵\times۱۰^۲\,m$$

$$\lambda_{\text{پایین}} = \frac{c}{f_۲} = \frac{۳/۰۰\times۱۰^۸\,m/s}{۱۶۰۰\times۱۰^۳\,s^{-۱}} = ۱/۸۷\times۱۰^۲\,m$$

پس : $۱/۸۷\times۱۰^۲\,m < \lambda_{AM} < ۵/۵۵\times۱۰^۲\,m$

ب) به ترتیب برای حدّ بالا و حدّ پایین داریم :

$$\lambda_{\text{بالا}} = \frac{c}{f_۱} = \frac{۳/۰۰\times۱۰^۸\,m/s}{۸۸/۰\times۱۰^۶\,s^{-۱}} = ۳/۴۱\,m$$

$$\lambda_{\text{پایین}} = \frac{c}{f_۲} = \frac{۳/۰۰\times۱۰^۸\,m/s}{۱۰۸\times۱۰^۶\,s^{-۱}} = ۲/۷۸\,m$$

پس : $۲/۷۸\,m < \lambda_{FM} < ۳/۴۱\,m$

۴ یک موج طولی در یک فنر بلند با دورهٔ ۰/۲۵s و طول موج ۳۰/۰cm در حرکت است. تندی این موج چقدر است؟

پاسخ : از رابطهٔ $v=f\lambda$ استفاده می‌کنیم که در آن $f=۱/T$ است :

$$f = \frac{\lambda}{T} = \frac{۳۰/۰\,cm}{۰/۲۵\,s} = ۱۲۰\,cm/s$$

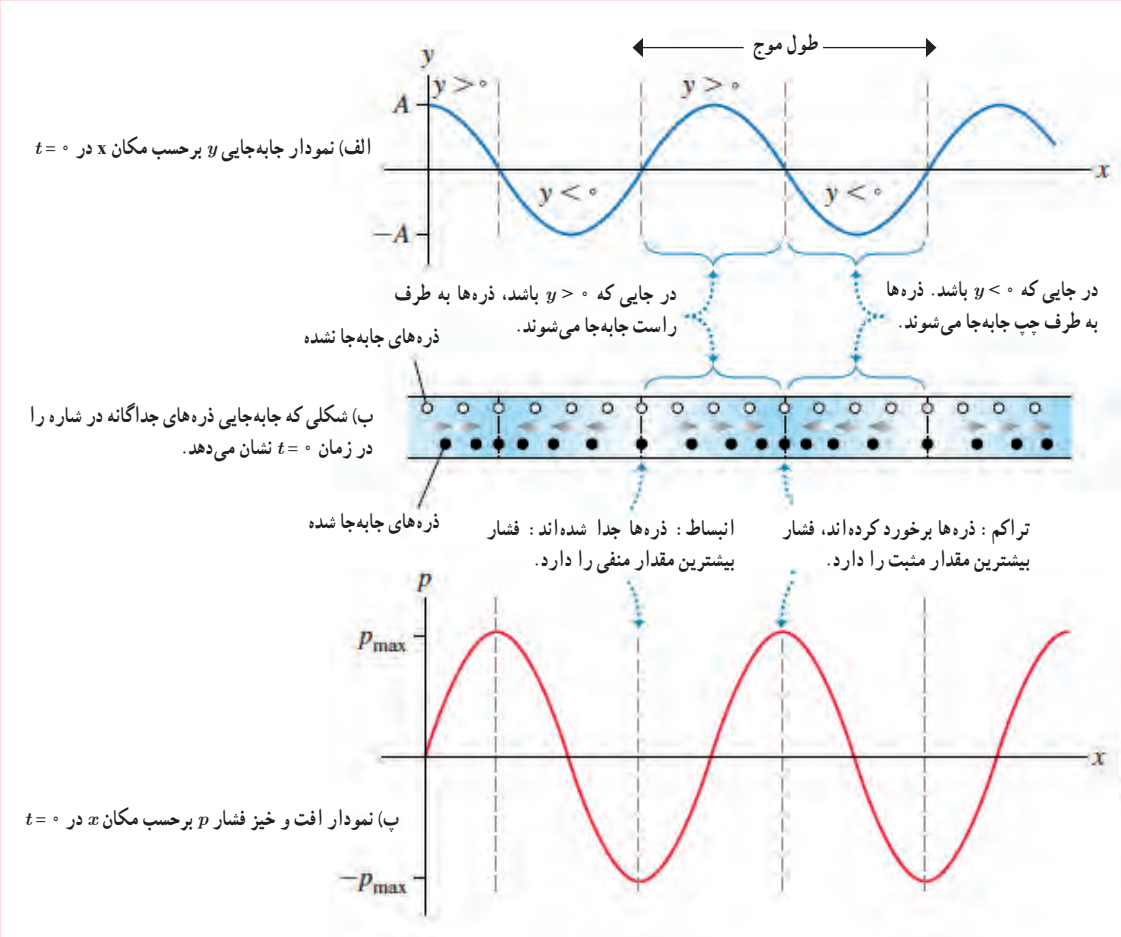
۵ یک موج صوتی را درنظر بگیرید که در لوله‌ای در حال انتشار است. جهت انتشار را محور xها فرض کنید. در یک لحظهٔ مشخص نمودارهای زیر را رسم کنید.

الف) نمودار جابه‌جایی y برحسب مکان x در $t=۰s$

ب) شکلی که جابه‌جایی ذره‌های جداگانه در شاره را در زمان $t=۰s$ نشان می‌دهد.

پ) نمودار افت و خیز فشار p برحسب مکان x در $t=۰s$

پاسخ :



۶ یک چشمهٔ نقطه‌ای ۱/۰ W، امواج صوتی را به‌طور یکنواخت در تمام جهات فضا گسیل می‌کند، با فرض آنکه انرژی موج‌ها پایسته بماند، شدت صوت را در فاصلهٔ الف) ۱/۰ m از چشمه ب) ۱/۵ m از چشمه به‌دست آورید.

پاسخ : الف) چشمهٔ نقطه‌ای، چشمه‌ای کوچک است که انرژی را در تمام راستاها به‌طور یکنواخت گسیل می‌کند و موجی که از آن دور می‌شود، موج کروی است. طبق فرض انرژی موج پایسته می‌ماند و بنابراین همهٔ انرژی گسیل شده توسط چشمه از سطوح کروی می‌گذرد. در این صورت برای شدت I در فاصلهٔ r از این چشمه داریم :

$$I = \frac{P_s}{۴\pi r^۲} = \frac{۱/۰\text{W}}{۴\pi(۱/۰\text{m})^۲} = ۷/۹۶\times۱۰^{-۲}\,\text{W/m}^۲ \approx ۸/۰\times۱۰^{-۲}\,\text{W/m}^۲$$

ب)

$$I_۲ = I_۱(\frac{r_۱}{r_۲})^۲ = (۷/۹۶\times۱۰^{-۲}\,\text{W/m}^۲)(\frac{۱/۰\text{m}}{۲/۵\text{m}})^۲$$

$$= ۱/۲۷\times۱۰^{-۲}\,\text{W/m}^۲ \approx ۱/۳\times۱۰^{-۲}\,\text{W/m}^۲$$

۷ صدای یک پتک فلزی در کارگاه آهنگری در فاصلهٔ ۱m از آن تراز شدت صوتی برابر ۹۰/۰dB دارد. اگر پتک مشابه دیگری شروع به کوبش کند، شدت صوت چقدر می‌شود؟ فرض کنید شنونده در فاصلهٔ یکسانی از هر دو پتک قرار دارد.

پاسخ : از رابطه ۳ـ۱۲ استفاده می‌کنیم :

$$\beta = ۹۰/۰\text{dB} = (۱۰\text{dB})\log\frac{I}{I_۰}$$

در نتیجه :

$$\log\frac{I}{I_۰} = ۹/۰۰ \Rightarrow \frac{I}{I_۰} = ۱/۰۰\times ۱۰^۹$$

بدیهی است وقتی دو پتک باهم صدا می‌کنند خواهیم داشت :

$$\frac{I'}{I_۰} = ۲/۰۰\times ۱۰^۹$$

بنابراین داریم :

$$\beta' = (۱۰\text{dB})\log\frac{I'}{I_۰} = (۱۰\text{dB})\log(۲/۰۰\times ۱۰^۹) = ۹۳/۰\ \text{dB}$$

توجه کنید که با وجود اینکه شدت صوت دو برابر شده است، تراز شدت صوت فقط ۳dB افزایش پیدا می‌کند. *این یک قانون کلی است که یک افزایش ۳dB معادل دو برابر شدن شدت است.*

۸ ستونی از سربازان با صدای طبل طبّال، با ۱۲۰ گام در هر دقیقه رژه می‌روند. وقتی طبّال با پای راست پیش می‌رود، سربازان عقب ستون با پای چپ خود به جلو گام برمی‌دارند. طول تقریبی ستون سربازان چقدر است؟

پاسخ : از رابطهٔ $x = vt$ استفاده می‌کنیم :

$$x = vt = (۳۴۳\,\text{m/s})(\frac{۱}{۱۲۰}\text{min})(۶۰\frac{\text{s}}{\text{min}}) \approx ۱۷۱\text{m}$$

۹ یک چشمهٔ نقطه‌ای آرمانی را درنظر بگیرید که با توان ثابت، صدا تولید می‌کند. وقتی شما به نقطه‌ای به فاصلهٔ دوبرابر از آن حرکت کنید، تراز شدت صوت چقدر تغییر می‌کند؟

پاسخ :

$$\beta_۲ - \beta_۱ = (۱۰\text{dB})(\log\frac{I_۲}{I_۰} - \log\frac{I_۱}{I_۰}) = (۱۰\text{dB})\log\frac{I_۲}{I_۱}$$

از طرفی $I_۲ / I_۱ = r_۱^۲ / r_۲^۲$ است و در نتیجه :

$$\beta_۲ - \beta_۱ = (۱۰\text{dB})\log\frac{r_۱^۲}{r_۲^۲} = (۱۰\text{dB})\log\frac{۱}{۲} = -۰/۶\text{dB}$$

۱۰ موج‌های صوتی پس از رسیدن به پردهٔ گوش، از گوش میانی عبور می‌کند. قطر سوراخ گوش میانی در افراد بزرگسال ۷ mm و طول آن ۲/۵ cm است. هنگام شنیدن صحبت‌های عادی، شدت موج‌های صوتی در گوش میانی $۳/۲ \times ۱۰^{-۶}\,\text{W/m}^۲$ است. توان متوسط دریافتی توسط گوش میانی چقدر است؟

پاسخ :

$$P = IA = I(\pi r^۲) = (۳/۲ \times ۱۰^{-۶}\,\text{W/m}^۲)(\pi)(۳/۵\times ۱۰^{-۳}\text{m})^۲$$

این نوسان ناچیز را پردهٔ گوش جذب می‌کند و نوسان حاصل از آن در گوش میانی و داخلی به تپ الکتریکی تبدیل و به مغز ارسال می‌شود.

راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳

۳ـ۱ و ۳ـ۲ نوسان دوره‌ای و حرکت هماهنگ ساده

۱. یک وزنهٔ ۲۰N را از انتهای یک فنر قائم می‌آویزیم. فنر ۲۰cm کشیده می‌شود. سپس این فنر را در حالی که به یک وزنهٔ ۵/۰N متصل است روی میز بدون اصطکاکی به نوسان درمی‌آوریم. دورهٔ تناوب این نوسان چقدر است؟

۲. هرگاه جسمی به جرم m به فنری متصل شود و به نوسان درآید، با دورهٔ تناوب ۲/۰s نوسان می‌کند. اگر جرم این جسم ۲/۰kg افزایش یابد، دورهٔ تناوب ۳/۰s می‌شود. مقدار m چقدر است؟

۳. جرم خودرویی همراه با سرنشینان آن ۱۶۰۰kg است. این خودرو روی چهار فنر با ثابت $۲/۰\times۱۰^{۴}$N/m سوار شده است. دورهٔ تناوب، بسامد، و بسامد زاویه‌ای ارتعاش خودرو وقتی از جاله‌ای می‌گذرد چقدر است؟ فرض کنید وزن خودرو به‌طور یکنواخت روی فنرهای چهارچرخ توزیع شده است.

۴. دامهٔ نوسان یک حرکت هماهنگ ساده $۳/۰\times۱۰^{-۲}$m و بسامد آن ۵/۰Hz هرتز است. معادلهٔ حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان ــ زمان آن را در یک دوره رسم کنید.

۵. نمودار مکان ــ زمان نوسانگری مطابق شکل زیر است:

الف) معادلهٔ حرکت این نوسانگر را بنویسید.

ب) مقدار t_1 را به‌دست آورید.

پ) اندازهٔ شتاب نوسانگر را در لحظهٔ t_1 محاسبه کنید.

۳ـ۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده

۶. دامهٔ نوسان وزنه‌ای که به یک فنر با ثابت ۷۴N/m متصل است و در راستای افقی نوسان می‌کند، برابر با ۸/۰cm است. اگر انرژی پتانسیل این نوسانگر در نقطه‌ای از مسیر نوسان، $۸/۰\times۱۰^{-۲}$J باشد، انرژی جنبشی آن در این مکان چقدر است؟ (از نیروهای اتلافی چشم‌پوشی شود.)

۷. جسمی به جرم ۱/۰kg به فنری افقی با ثابت ۶۰/۰N/cm متصل است. فنر به اندازهٔ ۹/۰cm فشرده و سپس رها می‌شود و جسم روی سطح افقی شروع به نوسان می‌کند. با چشم‌پوشی از اصطکاک

الف) دامهٔ نوسان و تندی بیشینهٔ جسم چقدر است؟

ب) وقتی تندی جسم ۱/۶m/s است، انرژی پتانسیل کشسانی آن چقدر است؟

۸. معادلهٔ حرکت هماهنگ سادهٔ یک نوسانگر در SI به‌صورت $x=(۰/۰۵۰\,\mathrm{m})\cos۴۰\pi t$ است.

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

ب) در چه زمانی، پس از لحظهٔ صفر، برای نخستین بار تندی نوسانگر به صفر می‌رسد؟

پ) تندی نوسانگر چقدر باشد تا انرژی جنبشی نوسانگر برابر با انرژی پتانسیل آن شود؟

۹. الف) ساعتی آونگ‌دار (یا آونگ ساده) در تهران تنظیم شده است. اگر این ساعت به منطقه‌ای در استوا برده شود، عقب می‌افتد یا جلو؟ مقدار این عقب یا جلوافتادن در یک شبانه‌روز چقدر است؟ ($g_{\text{تهران}}=۹/۸\,\mathrm{m/s^2}$ و $g_{\text{استوا}}=۹/۷۸\,\mathrm{m/s^2}$)

ب) به نظرشما آیا با افزایش دما، یک ساعت آونگ‌دار جلو می‌افتد یا عقب؟

۳ـ۴ تشدید

۱۰. هر فرد معمولاً با چرخش اندک بدنش به چپ و راست، راه می‌رود و بدین ترتیب نیروهای کوچکی به زمین زیر پایش وارد می‌کند. این نیروها بسامدی در حدود ۰/۵Hz دارند. لرزش شدید پل هوایی میلینیوم[1] در آغاز هزارهٔ جدید را به عبور منظم گروهی از افراد از این پل ربط داده‌اند. چگونه ممکن است نوسان‌های بدن این افراد موجب چنین لرزشی شده باشد؟

1ـ Millennium bridge

۸۵

از رابطهٔ $T=۲\pi\sqrt{m/k}$ استفاده می‌کنیم. در این رابطه به جای m از W/g استفاده می‌کنیم که در آن W وزن جسم است. همچنین ثابت فنر را از قانون هوک به دست می‌آوریم

$$k=\frac{|F|}{x}=\frac{۲۰\mathrm{N}}{۰/۲۰\mathrm{m}}=۱۰۰\,\mathrm{N/m}$$

در نتیجه:

$$T=۲\pi\sqrt{\frac{W/g}{k}}=۲\pi\sqrt{\frac{(۵/۰\mathrm{N})/(۹/۸\mathrm{N/kg})}{۱۰۰\mathrm{N/m}}}$$

$$=۰/۴۶\mathrm{s}$$

از رابطهٔ $T=۲\pi\sqrt{m/k}$ استفاده می‌کنیم. بنابراین داریم:

$$\frac{T_۲}{T_۱}=\sqrt{\frac{m_۲}{m_۱}}=\sqrt{\frac{(m+۲/۰)}{m}}=\frac{۳/۰}{۲/۰}$$

از آنجا $m=۱/۶\mathrm{kg}$ به دست می‌آید.

چون وزن (و در نتیجه جرم) به‌طور یکنواخت توزیع شده است، روی هر فنر $\frac{۱}{۴}$ جرم کل قرار می‌گیرد. بنابراین $m=M/۴=۴۰۰\mathrm{kg}$، و در نتیجه:

$$T=۲\pi\sqrt{\frac{m}{k}}=۲\pi\sqrt{\frac{۴۰۰\mathrm{kg}}{۲/۰۰\times۱۰^{۴}\mathrm{N/m}}}$$

$$=۰/۸۸۸\mathrm{s}$$

و از آنجا

$$f=\frac{۱}{T}=۱/۱۲۵\mathrm{s}^{-۱}\approx۱/۱۲\mathrm{Hz}$$

و

$$\omega=۲\pi f=۲\pi(۱/۱۲۵\mathrm{s}^{-۱})=۷/۰۷\mathrm{rad/s}$$

معادلهٔ حرکت نوسانگر با رابطهٔ $x=A\cos\omega t$ داده می‌شود. که در اینجا

$$A=۳/۰\times۱۰^{-۲}\mathrm{m}\ ,\ \omega=۲\pi f=۲\pi(۵/۰\mathrm{s}^{-۱})=۱۰\pi\,\mathrm{rad/s}$$

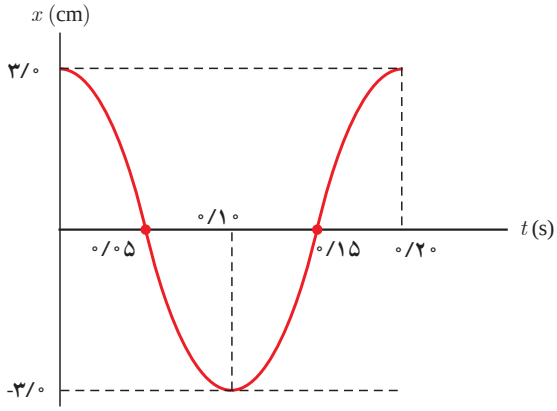
در نتیجه

$$x=(۳/۰\times۱۰^{-۲}\mathrm{m})\cos(۱۰\pi t)$$

برای رسم نمودار مکان ــ زمان خوب است دورهٔ تناوب را محاسبه کنیم:

$$T=\frac{۱}{f}=\frac{۱}{۵/۰\mathrm{s}^{-۱}}=۰/۲۰\mathrm{s}$$

بنابراین شکلی شبیه زیر خواهیم داشت



پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳

۳ـ۱ و ۳ـ۲ نوسان دوره‌ای و حرکت هماهنگ ساده

۱. یک وزنهٔ ۲۰N را از انتهای یک فنر قائم می‌آویزیم، فنر ۲۰cm کشیده می‌شود. سپس این فنر را در حالی که به یک وزنهٔ ۵/۰N متصل است روی میز بدون اصطکاکی به نوسان درمی‌آوریم. دورهٔ تناوب این نوسان چقدر است؟

۲. هرگاه جسمی به جرم m به فنری متصل شود و به نوسان درآید، با دورهٔ تناوب ۰/۲s نوسان می‌کند. اگر جرم این جسم ۲/۰kg افزایش یابد، دورهٔ تناوب ۰/۳s می‌شود. مقدار m چقدر است؟

۳. جرم خودرویی همراه با سرنشینان آن ۱۶۰۰kg است. این خودرو روی چهار فنر با ثابت $۲/۰۰\times۱۰^{۴}$N/m سوار شده است. دورهٔ تناوب، بسامد، و بسامد زاویه‌ای ارتعاش خودرو وقتی از جاله‌ای می‌گذرد چقدر است؟ فرض کنید وزن خودرو به‌طور یکنواخت روی فنرهای چهارچرخ توزیع شده است.

۴. دامهٔ نوسان یک حرکت هماهنگ ساده ۳×۱۰^{-۲}m و بسامد آن ۵/۰Hz هرتز است. معادلهٔ حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان ـ زمان آن را در یک دوره رسم کنید.

۵. نمودار مکان ـ زمان نوسانگری مطابق شکل زیر است :

الف) معادلهٔ حرکت این نوسانگر را بنویسید.

ب) مقدار t_1 را بدست آورید.

پ) اندازهٔ شتاب نوسانگر را در لحظهٔ t_1 محاسبه کنید.

۳ـ۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده

۶. دامهٔ نوسان وزنه‌ای که به یک فنر با ثابت ۷۴N/m متصل است و در راستای افقی نوسان می‌کند، برابر با ۸/۰cm است. اگر انرژی پتانسیل این نوسانگر در نقطه‌ای از مسیر نوسان، $۸/۰\times۱۰^{-۴}$J باشد، انرژی جنبشی آن در این مکان چقدر است؟ (از نیروهای اتلافی چشم‌پوشی شود.)

۷. جسمی به جرم ۰/۱kg به فنری افقی با ثابت ۶/۰N/cm متصل است. فنر به اندازهٔ ۹/۰cm فشرده و سپس رها می‌شود و جسم روی سطح افقی شروع به نوسان می‌کند. با چشم‌پوشی از اصطکاک

الف) دامهٔ نوسان و تندی بیشینهٔ جسم چقدر است؟

ب) وقتی تندی جسم ۰/۶m/s است، انرژی پتانسیل کشسانی آن چقدر است؟

۸. معادلهٔ حرکت هماهنگ ساده یک نوسانگر در SI به‌صورت $x=(۰/۰۵\text{m})\cos۲۰\pi t$ است.

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

ب) در چه زمانی، پس از لحظهٔ صفر، برای نخستین بار تندی نوسانگر به صفر می‌رسد؟

پ) تندی نوسانگر چقدر باشد تا انرژی جنبشی نوسانگر برابر با انرژی پتانسیل آن شود؟

۹. الف) ساعتی آونگ‌دار (یا آونگ ساده) در تهران تنظیم شده است. اگر این ساعت به منطقه‌ای در استوا برده شود، عقب می‌افتد یا جلو؟ مقدار این عقب یا جلوافتادن در یک شبانه‌روز چقدر است؟ ($g_{\text{تهران}}=۹/۸۰\text{m/s}^{۲}$ و $g_{\text{استوا}}=۹/۷۸\text{m/s}^{۲}$)

ب) به نظر شما آیا با افزایش دما، یک ساعت آونگ‌دار جلو می‌افتد یا عقب؟

۳ـ۴ تشدید

۱۰. هر فرد معمولاً با چرخش اندک بدنش به چپ و راست، راه می‌رود و بدین ترتیب نیروهای کوچکی به زمین زیر پایش وارد می‌کند. این نیروها بسامدی در حدود ۰/۵Hz دارند. لرزش شدید پل هوایی میلینیوم[1] در آغاز هزارهٔ جدید را به عبور منظم گروهی از افراد از این پل ربط داده‌اند. چگونه ممکن است نوسان‌های بدن این افراد موجب چنین لرزشی شده باشد؟

۱ـ Millennium bridge

۸۵

۵ الف) معادلهٔ حرکت نوسانگر با رابطهٔ $x=A\cos\omega t$ داده می‌شود. اگر در شکل دقت کنیم داریم :

$$\frac{۵T}{۴}=۰/۵۰\text{s}\Rightarrow T=۰/۴۰\text{s}$$

در نتیجه

$$\omega=\frac{۲\pi}{T}=\frac{۲\pi}{۰/۴۰\text{s}}=۵\pi\,\text{rad/s}$$

بنابراین معادلهٔ حرکت نوسانگر چنین می‌شود

$$x=A\cos ۵\pi t$$

ب) در زمان t_1، $x=A/۲$ است و در نتیجه

$$\frac{A}{۲}=A\cos ۵\pi t_1$$

در نتیجه

$$\cos ۵\pi t_1=\frac{۱}{۲}$$

چون t_1 نخستین زمانی است که $x=A/۲$ است، در رابطهٔ بالا $۵\pi t_1$ را برابر $\pi/۳$ می‌گذاریم. در نتیجه $t_1=\frac{۱}{۱۵}\text{s}$ می‌شود.

پ) با فرض آنکه نوسانگر این مسئله، دستگاه جرم ـ فنر باشد، از قانون هوک به صورت $|F|=k|x|$ استفاده می‌کنیم. بنابراین داریم :

$$m|a|=k|x|$$

و در نتیجه

$$|a|=\frac{k}{m}|x|=\omega^{۲}|x|=(۵\pi)^{۲}|x|$$

که در آن از $\omega=\sqrt{k/m}$ استفاده کردیم.

بنابراین باید x را در زمان t_1 محاسبه کنیم، که البته از روی شکل می‌دانیم برابر با ۲/۰cm است. اگر x را در لحظهٔ t_1 نداشتیم، باید از محاسبه‌ای نظیر محاسبهٔ زیر آن را به دست می‌آوردیم :

$$x(t_1)=A\cos ۵\pi t_1$$
$$=(۰/۰۴\text{m})\cos(۵\pi\frac{۱}{۱۵})=(۰/۰۴۰\text{m})\cos\frac{\pi}{۳}$$
$$=۰/۰۲۰\text{m}=۲/۰\text{cm}$$

در نتیجه

$$|a|=(۵\pi)^{۲}(۰/۰۲۰\text{m})=۴/۹۳\,\text{m/s}^{۲}\approx ۴/۹\,\text{m/s}^{۲}$$

۶ الف) انرژی کلّ نوسانگر برابر است با

$$E=\frac{۱}{۲}kA^{۲}=\frac{۱}{۲}(۷۴\,\text{N/m})(۰/۰۸۰\text{m})^{۲}=۰/۲۳۶۸\,\text{J}\approx ۰/۲۴\,\text{J}$$

ب) $E = K + U$ است و بنابراین

$$K = E - U = ۰/۲۳۶۸\ \text{J} - ۰/۰۸۰\ \text{J} = ۰/۱۶\ \text{J}$$

۷ الف) بدیهی است دامنهٔ نوسان $A = ۹/۰\text{cm}$ است و برای انرژی جنبشی بیشینه داریم :

$$K_{max} = \frac{۱}{۲}mv_{max}^{۲} = \frac{۱}{۲}kA^{۲}$$

بنابراین تندی بیشینهٔ v_{max} چنین می‌شود

$$v_{max} = \sqrt{\frac{k}{m}}A = \sqrt{\frac{۶/۰\times۱۰^{۲}\text{N/m}}{۱/۰\text{kg}}}(۰/۰۹۰\text{m}) = ۲/۲\text{m/s}$$

ب) از $E = K + U$ استفاده می‌کنیم. $E = \frac{۱}{۲}kA^{۲}$ قرار می‌دهیم و از آنجا درمی‌یابیم :

$$U = E - K = \frac{۱}{۲}kA^{۲} - \frac{۱}{۲}mv^{۲}$$

$$= \frac{۱}{۲}(۶/۰\times۱۰^{۲}\text{N/m})(۰/۰۹۰\text{m})^{۲} - \frac{۱}{۲}(۱/۰\text{kg})(۱/۶\text{m/s})^{۲}$$

$$= ۲/۴۳\ \text{J} - ۱/۲۸\ \text{J} = ۱/۱۵\ \text{J}$$

۸ الف) وقتی $x = ۰$ است، یعنی در زمانی که نوسانگر از نقطهٔ تعادل می‌گذرد، تندی آن بیشینه است.

$$A\cos\omega t = ۰ \quad , \quad A \neq ۰ \Rightarrow \omega t = (۲n+۱)\frac{\pi}{۲}$$

چون نخستین‌بار را خواسته است، $n = ۰$ می‌گذاریم :

$$\omega t = \pi/۲ \Rightarrow ۲۰\pi t = \frac{\pi}{۲}$$

و از آنجا $t = \frac{۱}{۴۰}\text{s}$ به‌دست می‌آید. (این نتیجه را می‌توانستیم به‌طور ساده‌ای با رسم یک نمودار کسینوسی نیز به‌دست آوریم، به‌طوری که در لحظهٔ $t = T/۴$ درمی‌یابیم برای نخستین‌بار $x = ۰$ می‌شود.)

ب) تندی نوسانگر وقتی صفر است که $x = -A$ باشد که این متناظر با زمان $t = \frac{۲}{۴۰}\text{s}$ است. این را می‌شود به طور ریاضی نیز نشان داد :

$$A\cos\omega t = -A \Rightarrow \cos\omega t = -۱ \Rightarrow \omega t = n\pi$$

بنابراین برای نخستین بار $\omega t = \pi$ و از آنجا $t = \frac{۲}{۴۰}\text{s}$ می‌شود.

پ) در $E = ۲U = ۲K$ باید $U = K$ قرار دهیم. در نتیجه $E = ۲U = ۲K$ می‌شود. از طرفی $E = K_{max} = \frac{۱}{۲}mv_{max}^{۲}$ است. بنابراین

$$K = \frac{E}{۲} = \frac{۱}{۲}(\frac{۱}{۲}mv_{max}^{۲})$$

$$\frac{۱}{۲}mv^{۲} = \frac{۱}{۴}mv_{max}^{۲} \Rightarrow |v| = \frac{۱}{\sqrt{۲}}v_{max}$$

از طرفی $v_{max} = A\omega$ است. بنابراین

$$|v| = \frac{۱}{\sqrt{۲}}A\omega = \frac{۱}{\sqrt{۲}}(۰/۰۵۰\text{m})(۲۰\pi)$$

$$= ۲/۲\ \text{m/s}$$

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳

۳ـ۱ و ۳ـ۲ نوسان دوره‌ای و حرکت هماهنگ ساده

۱. یک وزنهٔ ۲۰N را از انتهای یک فنر قائم می‌آویزیم، فنر ۲۰cm کشیده می‌شود. سپس این فنر را در حالی که به یک وزنهٔ ۵/۰N متصل است روی میز بدون اصطکاکی به نوسان درمی‌آوریم. دورهٔ تناوب این نوسان چقدر است؟

۲. هرگاه جسمی به جرم m به فنری متصل شود و به نوسان درآید، با دورهٔ تناوب ۲/۰s نوسان می‌کند. اگر جرم این جسم ۲/۰kg افزایش یابد، دورهٔ تناوب ۳/۰s می‌شود. مقدار m چقدر است؟

۳. جرم خودرویی همراه با سرنشینان آن ۱۶۰۰kg است. این خودرو روی چهار فنر با ثابت $۲/۰\times۱۰^{۴}\text{N/m}$ سوار شده است. دورهٔ تناوب، بسامد، و بسامد زاویه‌ای ارتعاش خودرو وقتی از چاله‌ای می‌گذرد چقدر است؟ فرض کنید وزن خودرو به‌طور یکنواخت روی فرهای چهارچرخ توزیع شده است.

۴. دامنهٔ نوسان یک حرکت هماهنگ ساده $۳/۰\times۱۰^{-۴}\text{m}$ و بسامد آن ۵/۰Hz هرتز است. معادلهٔ حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان ــ زمان آن را در یک دوره رسم کنید.

۵. نمودار مکان ــ زمان نوسانگری مطابق شکل زیر است :

الف) معادلهٔ حرکت این نوسانگر را بنویسید.

ب) مقدار t_1 را به‌دست آورید.

پ) اندازهٔ شتاب نوسانگر را در لحظهٔ t_1 محاسبه کنید.

۳ـ۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده

۶. دامنهٔ نوسان وزنه‌ای که به یک فنر با ثابت فنر ۷۲N/m متصل است و در راستای افقی نوسان می‌کند، برابر با ۸/۰cm است. اگر انرژی نوسان این نوسانگر در نقطه‌ای از مسیر نوسان، $۱/۰\times۱۰^{-۲}$J باشد، انرژی جنبشی آن در این مکان چقدر است؟ (از نیروهای اتلافی چشم‌پوشی شود.)

۷. جسمی به جرم ۱/۰kg به فنری افقی با ثابت ۶۰N/cm متصل است. فنر به اندازهٔ ۹/۰cm فشرده و سپس رها می‌شود و جسم روی سطح افقی شروع به نوسان می‌کند. با چشم‌پوشی از اصطکاک

الف) دامهٔ نوسان و تندی بیشینهٔ جسم چقدر است؟

ب) وقتی تندی جسم ۱/۶m/s است، انرژی پتانسیل کشسانی آن چقدر است؟

۸. معادلهٔ حرکت هماهنگ ساده یک نوسانگر در SI به‌صورت $x = (۰/۰۵۰\text{m})\cos۲۰\pi t$ است.

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

ب) در چه زمانی، پس از لحظهٔ صفر، برای نخستین بار تندی نوسانگر به صفر می‌رسد؟

پ) تندی نوسانگر چقدر باشد تا انرژی جنبشی نوسانگر برابر با انرژی پتانسیل آن شود؟

۹. الف) ساعتی آونگ‌دار (با آونگ ساده) در نهران تنظیم شده است. اگر این ساعت به منطقه‌ای در استوا برده شود، عقب می‌افتد یا جلو؟ مقدار این عقب یا جلو افتادن در یک شبانه‌روز چقدر است؟ ($g_{تهران} = ۹/۷۸\text{m/s}^{۲}$ و $g_{استوا} = ۹/۷۸۰\text{m/s}^{۲}$)

ب) به نظر شما آیا با افزایش دما، یک ساعت آونگ‌دار جلو می‌افتد یا عقب؟

۳ـ۴ تشدید

۱۰. هر فرد معمولاً با چرخش اندک بدنش به چپ و راست، راه می‌رود و بدین ترتیب نیروهای کوچکی به زمین زیر پایش وارد می‌کند. این نیروها بسامدی در حدود ۰/۵Hz دارند. لرزش شدید پل هوایی میلینیوم[1] در آغاز هزارهٔ جدید را به عبور منظم گروهی از افراد از این پل ربط داده‌اند. چگونه ممکن است نوسان‌های بدن این افراد موجب چنین لرزشی شده باشند؟

۱ـ Millennium bridge

۸۵

۹ الف) زمانی که ساعت نشان می‌دهد متناسب با عکس دورهٔ نوسان آونگ است. با استفاده از رابطهٔ $T = ۲\pi\sqrt{L/g}$ درمی‌یابیم که چون $g_{\text{تهران}} < g_{\text{استوا}}$ است، بنابراین ساعت در استوا عقب می‌افتد. میزان این عقب‌افتادگی را می‌توانیم محاسبه کنیم. چون $t_۲/t_۱ = T_۱/T_۲$ است، داریم

$$t_۲ - t_۱ = (\sqrt{g_۲/g_۱} - ۱)t_۱$$

که اگر $t_۱ = ۸۶۴۰۰\,s$ قرار دهیم به $|\Delta t| = ۸۸/۲\,s$ می‌رسیم.

ب) با افزایش دما، طول آونگ زیاد می‌شود و بنا به رابطهٔ $T = ۲\pi\sqrt{L/g}$ درمی‌یابیم که دورهٔ تناوب زیاد و بسامد کم شده است و بنابراین ساعت عقب می‌افتد.

۱۰ یقیناً بسامد ناشی از چرخش (تاب خوردن) بدن هر فرد تقریباً برابر بسامدی بود که پل با آن می‌توانست به چپ و راست تاب بخورد (بسامد طبیعی پل) و همین باعث پدیدهٔ تشدید پل شد. ولی تا هنگامی که راه رفتن عابران به طور منظم رخ نداده بود، لرزش پل آنقدر شدید نبود که به حادثه‌ای بیانجامد. این نوسان‌ها سبب شد که عابران برای حفظ تعادل خود گام‌های خود را با نوسان‌های پل هم‌گام کنند که این موجب شدیدتر شدن لرزش پل و وقوع این حادثه شد.

۱۱ با به نوسان درآمدن آونگ X، آونگ B با دامنهٔ بزرگی به نوسان درمی‌آید. البته سایر آونگ‌ها نیز ممکن است به نوسان درآیند اما دامنهٔ نوسان آنها کوچک است. در حالی که آونگ B که دورهٔ نوسان (و در نتیجه بسامد) آن با آونگ X یکسان است، با دامنهٔ بزرگی به نوسان ادامه می‌دهد. به عبارتی، به آونگ‌های دیگر هم انرژی منتقل می‌شود ولی بیشترین انرژی در حالت تشدید به نوسانگر B انتقال می‌یابد.

۱۲ الف) با افزایش بسامدِ نوسان‌ساز، بدیهی است که بسامد موج حاصل نیز افزایش می‌یابد. ولی تندی موج تغییر نمی‌کند زیرا ویژگی‌های محیط تغییری نکرده است. با توجه به رابطهٔ $\lambda = v/f$ درمی‌یابیم طول موج کم می‌شود.

ب) چون $v = \sqrt{F/\mu}$ است، با افزایش کشش ریسمان تندی موج زیاد می‌شود. ولی چون بسامدِ نوسان‌ساز تغییر نکرده است، بسامد موج نیز تغییری نمی‌کند و طبق رابطهٔ $\lambda = v/f$، طول موج زیاد می‌شود.

۱۳ الف) وقتی موج به سمت چپ می‌رود، پس از گذشت زمان $T/۴$ درهٔ نشان داده شده در شکل به اندازهٔ $\lambda/۴$ به سمت چپ می‌رود و این به معنی آن است که M رو به پایین حرکت کرده است. دامنه و طول موج نیز با نمادهای A و λ در شکل نشان داده شده‌اند.

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳

۳ـ۱ و ۳ـ۲ نوسان دوره‌ای و حرکت هماهنگ ساده

۱. یک وزنهٔ ۲۰N را از انتهای یک فنر قائم می‌آویزیم، فنر ۲۰cm کشیده می‌شود. سپس این فنر را در حالی که به یک وزنهٔ ۵۰N متصل است روی میز بدون اصطکاکی به نوسان درمی‌آوریم. دورهٔ تناوب این نوسان چقدر است؟

۲. هرگاه جسمی به جرم m به فنری متصل شود و به نوسان درآید، با دورهٔ تناوب ۲/۰s نوسان می‌کند. اگر جرم این جسم ۲/۰kg افزایش یابد، دورهٔ تناوب ۳/۰s می‌شود. مقدار m چقدر است؟

۳. جرم خودرویی همراه با سرنشینان آن ۱۶۰۰kg است. این خودرو روی چهار فنر با ثابت $۲/۰۰\times۱۰^{۴}$N/m سوار شده است. دورهٔ تناوب، بسامد، و بسامد زاویه‌ای ارتعاش خودرو وقتی از جاله‌ای می‌گذرد چقدر است؟ فرض کنید وزن خودرو به‌طور یکنواخت روی فنرهای چهارچرخ توزیع شده است.

۴. دامنهٔ نوسان یک حرکت هماهنگ ساده ۳×۱۰^{-۲}m و بسامد آن ۵/۰Hz هرتز است. معادلهٔ حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان ـ زمان آن را در یک دوره رسم کنید.

۵. نمودار مکان ـ زمان نوسانگری مطابق شکل زیر است:

الف) معادلهٔ حرکت این نوسانگر را بنویسید.

ب) مقدار $t_۱$ را بدست آورید.

پ) اندازهٔ شتاب نوسانگر را در لحظهٔ $t_۱$ محاسبه کنید.

۳ـ۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده

۶. دامنهٔ نوسان وزنه‌ای که به یک فنر با ثابت فنر ۷۲N/m متصل است و در راستای افقی نوسان می‌کند، برابر با ۸/۰cm است. اگر انرژی بتانسیل این نوسانگر در نقطه‌ای از مسیر نوسان، $۱/۰\times۱۰^{-۲}$J باشد، انرژی جنبشی آن در این مکان چقدر است؟ (از نیروهای اتلافی چشم‌پوشی شود.)

۷. جسمی به جرم ۱/۰kg به فنری افقی با ثابت ۶۰/۰N/cm متصل است. فنر به اندازهٔ ۹/۰cm فشرده و سپس رها می‌شود و جسم روی سطح افقی شروع به نوسان می‌کند. با چشم‌پوشی از اصطکاک

الف) دامنهٔ نوسان و تندی بیشینهٔ جسم چقدر است؟

ب) وقتی تندی جسم ۱/۲m/s است، انرژی پتانسیل کشسانی آن چقدر است؟

۸. معادلهٔ حرکت هماهنگ ساده یک نوسانگر در SI به‌صورت $x = (۰/۰۵۰\,m)\cos ۲۰\pi t$ است.

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

ب) در چه زمانی، پس از لحظهٔ صفر، برای نخستین بار تندی نوسانگر به صفر می‌رسد؟

پ) تندی نوسانگر چقدر باشد تا انرژی جنبشی نوسانگر برابر با انرژی پتانسیل آن شود؟

۹. الف) ساعتی آونگ‌دار (یا آونگ ساده) در تهران تنظیم شده است. اگر این ساعت به منطقه‌ای در استوا برده شود، عقب می‌افتد یا جلو؟ مقدار این عقب یا جلوافتادن در یک شبانه‌روز چقدر است؟ ($g_{\text{تهران}} = ۹/۷۸m/s^۲$ و $g_{\text{استوا}} = ۹/۷۸m/s^۲$)

ب) به نظر شما آیا با افزایش دما، یک ساعت آونگ‌دار جلو می‌افتد یا عقب؟

۳ـ۴ تشدید

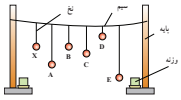
۱۰. هر فرد معمولاً با چرخش اندک بدنش به چپ و راست، راه می‌رود و بدن ترتیب نیروهای کوچکی به زمین زیر پایش وارد می‌کند. این نیروها بسامدی در حدود ۰/۵Hz دارند. لرزش شدید پل هوایی میلینیوم[۱] در آغاز هزارهٔ جدید را به عبور منظم گروهی از افراد از این پل ربط داده‌اند. چگونه ممکن است نوسان‌های بدن این افراد موجب چنین لرزشی شده باشد؟

۱ـ Millennium bridge

۸۵

فیزیک ۳

۱۱. مطابق شکل چند آونگ را از سیمی آویخته‌ایم. توضیح دهید با به نوسان درآوردن آونگ X، آونگ‌های دیگر چگونه به نوسان می‌کنند؟



۳ـ۵ و ۳ـ۶ موج و انواع آن، و مشخصه‌های موج

۱۲. یک نوسان‌ساز موج‌هایی دوره‌ای در یک ریسمان کشیده ایجاد می‌کند.

الف) با افزایش بسامد نوسان‌ساز کدام‌یک از کمیت‌های زیر تغییر نمی‌کند؟ بسامد موج، تندی موج، طول‌موج موج.

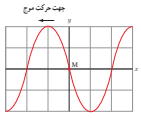
ب) حال اگر به جای افزایش بسامد، کشش ریسمان را افزایش دهیم، هر یک از کمیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟ بسامد موج، تندی موج، طول‌موج موج.

۱۳. شکل زیر یک تصویر لحظه‌ای از موجی عرضی در یک ریسمان کشیده شده را نشان می‌دهد. موج به سمت چپ حرکت می‌کند.

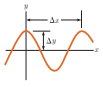
الف) با رسم این موج در زمان $T/۴$ بعد، نشان دهید جزء M ریسمان در این مدت در جه جهتی حرکت کرده است. همچنین روی این موج، دامنهٔ موج و طول‌موج را نشان دهید.

ب) اگر طول‌موج ۵/۰cm و تندی موج ۱۰cm/s باشد، بسامد موج را بدست آورید.

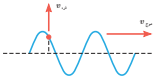
پ) تعیین کنید موج در مدت $T/۴$ چه مسافتی را پیموده است؟



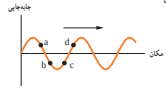
۱۴. در نمودار جابه‌جایی ـ مکانِ موج عرضی شکل زیر $\Delta x = ۴۰/۰cm$ و $\Delta y = ۱۵/۰cm$ است. اگر بسامد نوسان‌های چشمه ۸/۰Hz باشد، طول‌موج، دامنه، تندی و دورهٔ تناوب موج چقدر است؟



۱۵. شکل زیر موجی عرضی در یک ریسمان را نشان می‌دهد که با تندی $v_{\text{راست}}$ به سمت راست حرکت می‌کند، درحالی که تندی ذرهٔ نشان داده شدهٔ ریسمان $v_{\text{ذره}}$ است. آیا این دو تندی با هم برابرند؟ توضیح دهید.

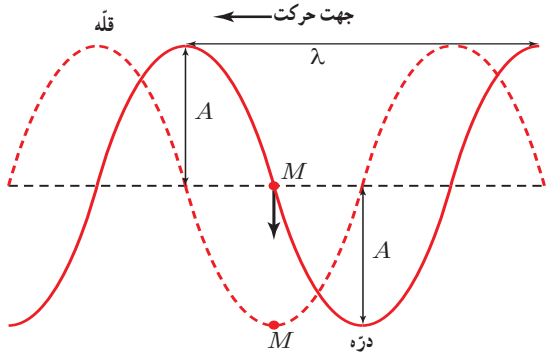


۱۶. شکل زیر یک موج سینوسی را در لحظه‌ای از زمان نشان می‌دهد که در جهت محور x در طول ریسمان کشیده شده‌ای حرکت می‌کند. چهار جزء از این ریسمان روی شکل نشان داده شده‌اند. در این لحظه هر یک از این چهار جزء بالا می‌روند یا پایین؟



۱۷. سیمی با چگالی $۷/۸۰g/cm^۳$ و سطح مقطع $۰/۵۰mm^۲$ بین دو نقطه با نیروی ۱۵۶N کشیده شده است. تندی انتشار موج عرضی را در این سیم محاسبه کنید.

۸۶



ب) بسامد موج برابر است با

$$f=\frac{v}{\lambda}=\frac{۱۰\,cm/s}{۵/۰\,cm}=۲/۰\,s^{-۱}=۲/۰\,Hz$$

پ) از رابطهٔ $x=vt$ استفاده می‌کنیم :

$$x=vt=v(\frac{T}{۴})=v(\frac{۱}{۴f})=(۱۰\,cm/s)(\frac{۱}{۸/۰\,s^{-۱}})$$

$$=۱/۲۵\,cm\approx ۱/۲\,cm$$

که این همان معادل $\lambda/۴=(۵/۰\,cm)/۴=۱/۲۵\,cm$ است.

۱۴ از روی شکل درمی‌یابیم طول موج $\lambda=\Delta x=۴۰/۰\,cm$ و دامنه $A=\Delta y=۱۵/۰\,cm$ است. با استفاده از رابطهٔ $v=\lambda f$ می‌توانیم تندی انتشار موج را به دست آوریم :

$$v=\lambda f=(۴۰/۰\,cm)\,(۸/۰۰\,s^{-۱})=۳۲۰\ cm/s=۳/۲۰\ m/s$$

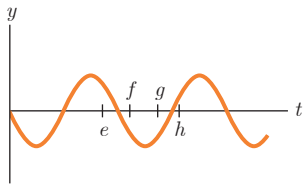
دورهٔ تناوب نیز وارون بسامد است :

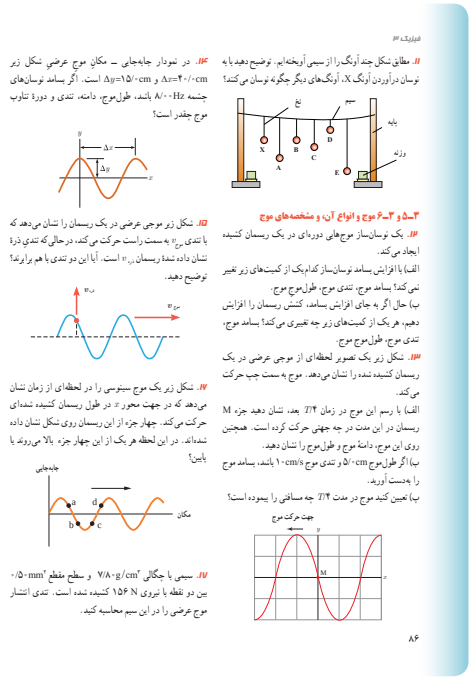
$$T=\frac{۱}{f}=\frac{۱}{۸/۰۰\,s^{-۱}}=۰/۱۲۵\,s$$

۱۵ خیر؛ این دو تندی متفاوت‌اند. تندی $v_{موج}$ همان تندی انتشار موج است که با مشخصه‌های ریسمان تعیین می‌شود و همیشه مقدار ثابتی در هر جای ریسمان دارد. ولی هر ذره روی ریسمان به طور هماهنگ ساده‌ای با نوسان چشمه حرکت می‌کند. بنابراین هر ذرهٔ ریسمان تندی ذره v را دارد که با زمان تغییر می‌کند. تندی ذره وقتی از موضع تعادل می‌گذرد، بیشینه و در نقطه‌های اوج و حضیض صفر است. در حالی که تندی موج همواره مقدار ثابتی دارد که از مشخصه‌های ریسمان تعیین می‌شود.

۱۶ با استدلالی مشابه آنچه در حل مسئله ۱۳ ارائه کردیم (و نیز با وارسی شکل ۳ـ۱۹ کتاب) درمی‌یابیم a و b رو به بالا، و c و d رو به پایین حرکت می‌کنند.

(پرسش جالب دیگری هم که می‌شد مطرح کرد در مورد جابه‌جایی یک جزءِ ریسمان برحسب زمان، مطابق شکل زیر، است.





فیزیک ۳

۱۱. مطابق شکل چند آونگ را از سیمی آویخته‌ایم. توضیح دهید با به نوسان درآوردن آونگ X، آونگ‌های دیگر چگونه نوسان می‌کنند؟

۳ـ۵ و ۳ـ۶ موج و انواع آن، و مشخصه‌های موج

۱۲. یک نوسان‌ساز موج‌های دوره‌ای در یک ریسمان کشیده ایجاد می‌کند.

الف) با افزایش بسامد نوسان‌ساز کدام‌یک از کمیت‌های زیر تغییر نمی‌کند؟ بسامد موج، تندی موج، طول‌موج موج.

ب) حال اگر به جای افزایش بسامد، کشش ریسمان را افزایش دهیم، هر یک از کمیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟ بسامد موج، تندی موج، طول‌موج موج.

۱۳. شکل زیر یک تصویر لحظه‌ای از موجی عرضی در یک ریسمان کشیده نشده را نشان می‌دهد. موج به سمت چپ حرکت می‌کند.

الف) با رسم این موج در زمان $T/۴$ بعد، نشان دهید جزء M ریسمان در این مدت در چه جهتی حرکت کرده است. همچنین روی این موج، دامنهٔ موج و طول‌موج را نشان دهید.

ب) اگر طول‌موج ۵/۰cm و تندی موج ۱۰cm/s باشد، بسامد موج را بدست آورید.

پ) تعیین کنید موج در مدت $T/۴$ چه مسافتی را پیموده است؟

۸۶

۱۴. در نمودار جابه‌جایی ـ مکانی موج عرضی شکل زیر $\Delta x=۴۰/۰cm$ و $\Delta y=۱۵/۰cm$ است. اگر بسامد نوسان‌های چشمه ۸/۰۰Hz باشد، طول‌موج، دامنه، تندی و دورهٔ تناوب موج چقدر است؟

۱۵. شکل زیر موجی عرضی در یک ریسمان را نشان می‌دهد که با تندی $v_{موج}$ به سمت راست حرکت می‌کند، درحالی‌که تندی ذرهٔ نشان داده شده ریسمان $v_{ذره}$ است. آیا این دو تندی با هم برابرند؟ توضیح دهید.

۱۶. شکل زیر یک موج سینوسی را در لحظه‌ای از زمان نشان می‌دهد که در جهت محور x در طول ریسمان کشیده شده‌ای حرکت می‌کند. چهار جزء از این ریسمان روی شکل نشان داده شده‌اند. در این لحظه هر یک از این چهار جزء بالا می‌روند یا پایین؟

۱۷. سیمی با چگالی $۷/۸g/cm^۳$ و سطح مقطع $۰/۵۰mm^۲$ بین دو نقطه با نیروی ۱۵۶ N کشیده شده است. تندی انتشار موج عرضی را در این سیم محاسبه کنید.

در این صورت در شکل صفحه قبل، در زمان‌های e و f جزءِ ریسمان رو به پایین و در لحظه‌های g و h جزءِ ریسمان حرکت می‌کند.)

۱۷ باید از رابطهٔ $v=\sqrt{F/\mu}$ استفاده کنیم. ولی توجه کنید که μ چگالی خطی جرم است و در اینجا چگالی حجمی داده شده است. اگر چگالی حجمی داده شده را در مساحت مقطع سیم ضرب کنیم، چگالی خطی جرم به دست می‌آید :

$$\mu=\rho A$$

$$=(۷/۸۰\,g/cm^۳)(۰/۵۰\times۱۰^{-۲}\,cm^۲)(\frac{۱۰^{-۳}\,kg}{g})(\frac{۱۰^۲\,cm}{m})$$

$$=۰/۰۰۳۹\ kg/m$$

از آنجا تندی انتشار موج چنین می‌شود :

$$v=\sqrt{\frac{F}{\mu}}=\sqrt{\frac{۱۵۶N}{۰/۰۰۳۹\,kg/m}}=۲۰۰\,m/s=۲/۰\times۱۰\,m/s$$

۱۸ در واقع این شکل براساس افزایش طول موج (یا کاهش بسامد) از چپ به راست مرتب شده است و بنابراین در مقایسه با شکل ۳ـ۲۲ کتاب که طیف امواج الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد درمی‌یابیم P، Q، R، S و T به ترتیب معادل ناحیه‌های فرابنفش، مرئی، فروسرخ، میکروموج و امواج رادیویی است.

۱۹ از قاعدهٔ دست راست برای تعیین جهت میدان مغناطیسی استفاده می‌کنیم (شکل ۳ـ۲۱ کتاب). جهت انتقال انرژی همان جهت انتشار موج و در سوی $-\hat{k}$ است. سوی میدان الکتریکی نیز در جهت $+\hat{j}$ است. بنابراین جهت میدان مغناطیسی در سوی $+\hat{i}$ (سوی مثبت محور z) می‌شود.

۲۰ الف) از رابطهٔ $f=c/\lambda$ استفاده می‌کنیم :

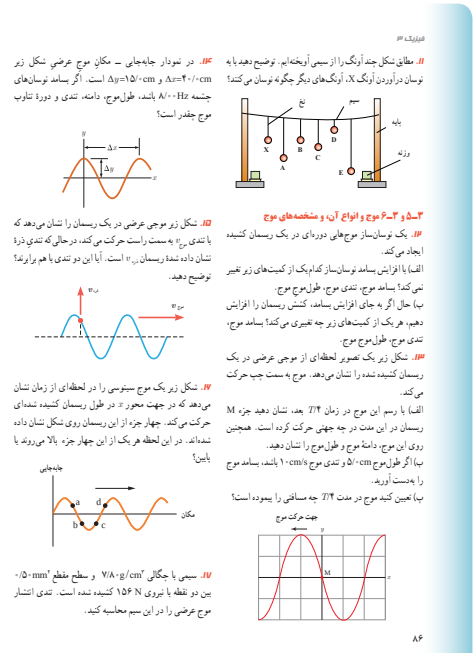
$$f=\frac{c}{\lambda}=\frac{۳/۰\times۱۰^۸\,m/s}{۶/۲۰\times۱۰^{-۷}\,m}=۴/۸۳۹\times۱۰^{۱۴}\,Hz\approx۴/۸\times۱۰^{۱۴}\,Hz$$

ب) طول موج در هوا چنین می‌شود :

$$\lambda=\frac{c}{f}=\frac{۳/۰\times۱۰^۸\,m/s}{۴/۳۰\times۱۰^{۱۴}\,s^{-۱}}=۶/۹۷۷\times۱۰^{-۷}\,m\approx۷/۰\times۱۰^{-۷}\,m$$

و در آب

$$\lambda=\frac{v}{f}=\frac{۲/۲۵\times۱۰^۸\,m/s}{۴/۳۰\times۱۰^{۱۴}\,s^{-۱}}=۵/۲۳\times۱۰^{-۷}\,m$$


فیزیک ۳

۱۱. مطابق شکل چند آونگ را از سیمی آویخته‌ایم. توضیح دهید با به نوسان درآوردن آونگ X، آونگ‌های دیگر چگونه نوسان می‌کنند؟

نخ — سیم — پایه — رزنه — X — A — B — C — D — E

۳ـ۵ و ۳ـ۶ موج و انواع آن، و مشخصه‌های موج

۱۲. یک نوسان‌ساز موج‌های دورداری در یک ریسمان کشیده ایجاد می‌کند.

الف) با افزایش بسامد نوسان‌ساز کدام‌یک از کمیت‌های زیر تغییر نمی‌کند؟ بسامد موج، تندی موج، طول‌موج موج.

ب) حال اگر به جای افزایش بسامد، کشش ریسمان را افزایش دهیم، هریک از کمیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟ بسامد موج، تندی موج، طول‌موج موج.

۱۳. شکل زیر یک تصویر لحظه‌ای از موجی عرضی در یک ریسمان کشیده نشده را نشان می‌دهد. موج به سمت چپ حرکت می‌کند.

الف) با رسم این موج در زمان $T/۴$ بعد، نشان دهید جزء M ریسمان در این مدت در چه جهتی حرکت کرده است. همچنین روی این موج، دامنهٔ موج و طول‌موج را نشان دهید.

ب) اگر طول‌موج ۵/۰cm و تندی موج ۱۰cm/s باشد، بسامد موج را بدست آورید.

پ) تعیین کنید موج در مدت $T/۴$ چه مسافتی را پیموده است؟

جهت حرکت موج — y — M — x

۸۶

۱۴. در نمودار جابه‌جایی ـ مکانِ موج عرضی شکل زیر $\Delta x=۴۰/۰cm$ و $\Delta y=۱۵/۰cm$ است. اگر بسامد نوسان‌های چشمه ۸/۰۰Hz باشد، طول‌موج، دامنه، تندی و دورهٔ تناوب موج چقدر است؟

y — Δx — Δy — x

۱۵. شکل زیر موجی عرضی در یک ریسمان را نشان می‌دهد که با تندی $v_{چ}$ به سمت راست حرکت می‌کند، درحالی‌که تندی ذرهٔ نشان داده شده ریسمان $v_{ر}$ است. آیا این دو تندی با هم برابرند؟ توضیح دهید.

$v_{ر}$ — $v_{چ}$

۱۶. شکل زیر یک موج سینوسی را در لحظه‌ای از زمان نشان می‌دهد که در جهت محور x در طول ریسمان کشیده شده‌ای حرکت می‌کند. چهار جزء از این ریسمان روی شکل نشان داده شده‌اند. در این لحظه هر یک از این چهار جزء بالا می‌روند یا پایین؟

جابه‌جایی — a — b — c — d — مکان

۱۷. سیمی با چگالی $۷/۸\,g/cm^۳$ و سطح مقطع $۰/۵۰\,mm^۲$ بین دو نقطه با نیروی ۱۵۶ N کشیده شده است. تندی انتشار موج عرضی را در این سیم محاسبه کنید.

فصل ۳: نوسان و موج

۱۸. شکل زیر طیف موج‌های الکترومغناطیسی را با یک مقیاس تقریبی نشان می‌دهد.

الف) نام قسمت‌هایی از طیف را که با حروف علامت‌گذاری شده‌اند، بنویسید.

ب) اگر در طول طیف از چپ به راست حرکت کنیم، مقدار کدام مشخصه‌های موج افزایش یا کاهش می‌یابد و کدام ثابت می‌ماند؟

پرتوهای γ	پرتوهای X	P	Q	R	S

۱۹. شکل زیر میدان الکتریکی یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در نقطه‌ای معین و دور از چشمه، در یک لحظه نشان می‌دهد. موج انرژی را در خلاف جهت محور z انتقال می‌دهد. جهت میدان مغناطیسی موج را در این نقطه و این لحظه تعیین کنید.

y — $\vec{E}$ — x — z

۲۰. الف) طول‌موج نور نارنجی در هوا حدود $۶/۲۰\times۱۰^{-۷}\,m$ است. بسامد این نور چند هرتز است؟

ب) بسامد نور قرمز در حدود $۴/۳۰\times۱۰^{۱۴}\,Hz$ است. طول‌موج این نور را در هوا و آب حساب کنید. (سرعت نور را در هوا $۳/۰\times۱۰^۸\,m/s$ و در آب $۲/۲۵\times۱۰^۸\,m/s$ فرض کنید.)

۲۱. چشمهٔ موجی با بسامد ۱۰Hz در یک محیط که تندی انتشار موج در آن ۱۰۰m/s است، نوسان‌های طولی ایجاد می‌کند. اگر دامنهٔ نوسان‌ها ۲/۰ cm باشد،

الف) فاصلهٔ بین دو تراکم متوالی این موج چقدر است؟

ب) فاصلهٔ بین یک تراکم و یک انبساط متوالی چقدر است؟

۲۲. عقرب‌های ماسه‌ای وجود طعمه را با امواجی که بر از حرکت طعمه در ساحل شنی ایجاد می‌شود، احساس می‌کنند. این امواج که در سطح ماسه منتشر می‌شوند، بر دو نوع‌اند : امواج عرضی با تندی $v_۱=۵۰\,m/s$ و امواج طولی با تندی $v_۲=۱۵۰\,m/s$. عقرب ماسه‌ای می‌تواند با استفاده از اختلاف زمانی بین زمان رسیدن این امواج به نزدیک‌ترین پای خود، فاصلهٔ خود از طعمه را تعیین کند. اگر این اختلاف زمان برابر $\Delta t=۴/۰ms$ باشد، طعمه در چه فاصله‌ای از عقرب قرار دارد؟

۲۳. توضیح دهید کدام یک از عامل‌های زیر بر تندی صوت در هوا مؤثر است.

الف) شکل موج ب) دامنهٔ موج پ) بسامد موج ت) دمای هوا

۲۴. در سونوگرافی معمولاً[1] از کاوه‌ای[2] دستی موسوم به *برگفتار فراصوتی* برای تشخیص پزشکی استفاده می‌شود که دقیقاً روی ناحیهٔ موردنظر از بدن بیمار گذاشته و حرکت داده می‌شود. این کاوه در بسامد ۶/۷MHz عمل می‌کند.

الف) بسامد زاویه‌ای در این کاوهٔ نوسان چقدر است؟

ب) اگر تندی موج صوتی در بافتی نرم از بدن ۱۵۰۰m/s باشد، طول‌موج این موج در این بافت چقدر است؟

۱ـ probe

۲ـ Ultrasonic Transducer

۸۷

فصل ۳: نوسان و موج

۱۸. شکل زیر طیف موج‌های الکترومغناطیسی را با یک مقیاس تقریبی نشان می‌دهد.
الف) نام قسمت‌هایی از طیف را که با حروف علامت‌گذاری شده‌اند، بنویسید.
ب) اگر در طول طیف از چپ به راست حرکت کنیم، مقدار کدام مشخصه‌های موج افزایش یا کاهش می‌یابد و کدام ثابت می‌ماند؟

پرتوهای γ	پرتوهای x	P	Q	R	S

۱۹. شکل زیر میدان الکتریکی یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در نقطه‌ای معین و دور از چشمه، در یک لحظه نشان می‌دهد. موج انرژی را در خلاف جهت محور z انتقال می‌دهد. جهت میدان مغناطیسی موج را در این نقطه و این لحظه تعیین کنید.

۲۰. الف) طول‌موج نور نارنجی در هوا حدود $۶/۲ \times ۱۰^{-۷}$ m است. بسامد این نور چند هرتز است؟
ب) بسامد نور قرمز در حدود $۴/۳۰ \times ۱۰^{۱۴}$ Hz است. طول‌موج این نور را در هوا و آب حساب کنید. (سرعت نور را در هوا $۳/۰ \times ۱۰^{۸}$ m/s و در آب $۲/۲۵ \times ۱۰^{۸}$ m/s فرض کنید.)

۲۱. چشمهٔ موجی با بسامد ۱۰ Hz در یک محیط که تندی انتشار موج در آن ۱۰۰ m/s است، نوسان‌هایی طولی ایجاد می‌کند. اگر دامنهٔ نوسان‌ها ۲/۰ cm باشد،
الف) فاصلهٔ بین دو تراکم متوالی این موج چقدر است؟
ب) فاصلهٔ بین یک تراکم و یک انبساط متوالی چقدر است؟

۲۲. عقرب‌های ماسه‌ای وجود طعمه را با امواجی که بر اثر حرکت طعمه در ساحل شنی ایجاد می‌شود، احساس می‌کنند. این امواج که در سطح ماسه منتشر می‌شوند، بر دو نوع‌اند: امواج عرضی با تندی $v_T = ۵۰$ m/s و امواج طولی با تندی $v_L = ۱۵۰$ m/s. عقرب ماسه‌ای می‌تواند با استفاده از اختلاف زمانی بین زمان رسیدن این امواج به نزدیک‌ترین پای خود، فاصلهٔ خود از طعمه را تعیین کند. اگر این اختلاف زمان برابر $\Delta t = ۴/۰$ ms باشد، طعمه در چه فاصله‌ای از عقرب قرار دارد؟

۲۳. توضیح دهید کدام یک از عامل‌های زیر بر تندی صوت در هوا مؤثر است.
الف) شکل موج ب) دامنهٔ موج پ) بسامد موج ت) دمای هوا

۲۴. در سونوگرافی معمولاً از کاوه‌ای[1] دستی موسوم به *ترگذار فراصوتی*[2] برای تشخیص پزشکی استفاده می‌شود که دقیقاً روی ناحیهٔ موردنظر از بدن بیمار گذاشته و حرکت داده می‌شود. این کاوه در بسامد ۶/۷MHz عمل می‌کند.
الف) بسامد زاویه‌ای در این کاوهٔ نوسان چقدر است؟
ب) اگر تندی موج صوتی در بافتی نرم از بدن ۱۵۰۰ m/s باشد، طول‌موج این موج در این بافت چقدر است؟

۱ـ probe
۲ـ Ultrasonic Transducer

۸۷

۲۱ از رابطهٔ $\lambda = v/f$، طول موج را به دست می‌آوریم :

$$\lambda = \frac{۱۰۰\,\text{m/s}}{۱۰\,\text{s}^{-۱}} = ۱۰\,\text{m}$$

الف) فاصلهٔ بین دو تراکم متوالی همان طول موج است.
ب) فاصلهٔ بین یک تراکم و یک انبساط متوالی $\lambda/۲ = ۵/۰$ m می‌شود.

۲۲ براساس آنچه در شکل آمده است درمی‌یابیم مسافت d برابر است با

$$d = v_L t_L = v_T t_T$$

که در آن v_L و v_T به ترتیب تندی امواج طولی و عرضی، و t_L و t_T به ترتیب زمان رسیدن امواج طولی و عرضی است. از هر کدام از فرمول‌های سمت راست می‌توانیم مسافت d را تعیین کنیم. اما t_L یا t_T را نداریم. با توجه به اینکه $\Delta t = t_T - t_L$ داده شده است، می‌توانیم t_L یا t_T را به دست آوریم :

$$\Delta t = t_T - t_L = t_T - t_T \frac{v_T}{v_L} = t_T(۱ - \frac{v_T}{v_L})$$

$$= t_T(۱ - \frac{۵۰\,\text{m/s}}{۱۵۰\,\text{m/s}}) = \frac{۲}{۳} t_T = ۴/۰\,\text{ms}$$

و از آنجا $t_T = ۶/۰$ ms می‌شود و در نتیجه

$$d = v_T\, t_T = (۵۰\ \text{m/s})\,(۶/۰ \times ۱۰^{-۳}\text{s}) = ۰/۳۰\,\text{m} = ۳۰\,\text{cm}$$

۲۳ همان‌طور که در متن درس آمده است، از گزینه‌های داده شده تنها دمای هوا بر تندی صوت تأثیر می‌گذارد. البته در حالت کلی عوامل مؤثر بر تندی صوت، تراکم‌پذیری و چگالی محیط است که این برای گازهای کامل که هوا نیز با تقریب خوبی چنین است، متناسب با جذر دمای گاز در مقیاس کلوین می‌شود.

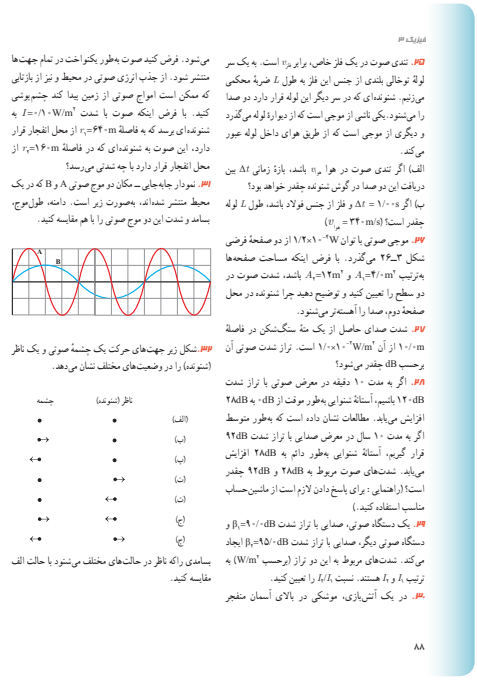
۲۴ الف) بسامد زاویه‌ای برابر است با

$$\omega = ۲\pi f = ۲\pi\,(۶/۷ \times ۱۰^{۶}\,\text{s}^{-۱}) = ۴/۲۱ \times ۱۰^{۷}\,\text{rad/s} \approx ۴/۲ \times ۱۰^{۷}\,\text{rad/s}$$

توجه کنید که مقدار ω بسیار زیاد است و این به معنای نوسان‌های بسیار سریع کاوه است. در حالی که برای یک نوسانگر کُند، مانند آونگ یک ساعت پاندولی، ماجرا برعکس است و دورهٔ تناوب زیاد و بسامد پایین است.

ب) از رابطهٔ $\lambda = v/f$ داریم :

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{۱۵۰۰\,\text{m/s}}{۶/۷ \times ۱۰^{۶}\,\text{s}^{-۱}} = ۲/۲۳ \times ۱۰^{-۴}\,\text{m} \approx ۲/۲ \times ۱۰^{-۴}\,\text{m}$$



فیزیک ۳

۲۴. تندی صوت در یک فلز خاص، برابر $v_{فلز}$ است. به یک سر لولهٔ توخالی بلندی از جنس این فلز به طول L ضربهٔ محکمی می‌زنیم. شنونده‌ای که در سر دیگر این لوله قرار دارد دو صدا را می‌شنود. یکی ناشی از موجی است که از دیوارهٔ لوله می‌گذرد و دیگری از موجی است که از طریق هوای داخل لوله عبور می‌کند.

الف) اگر تندی صوت در هوا $v_{هوا}$ باشد، بازهٔ زمانی Δt بین دریافت این دو صدا در گوش شنونده، چقدر خواهد بود؟

ب) اگر $\Delta t = ۱/۰۰s$ و فلز از جنس فولاد باشد، طول L لوله چقدر است؟ $(v_{هوا} = ۳۴۰m/s)$

۲۵. موجی صوتی با توان $۱/۲\times۱۰^{-۴}W$ از دو صفحهٔ فرضی شکل ۳ـ۲۶ می‌گذرد. با فرض اینکه مساحت صفحه‌ها به‌ترتیب $A_۱=۴/۰m^۲$ و $A_۲=۱۲m^۲$ باشد، شدت صوت در دو سطح را تعیین کنید و توضیح دهید چرا شنونده در محل صفحهٔ دوم، صدا را آهسته‌تر می‌شنود.

۲۶. شدت صدای حاصل از یک مثلث سنگ‌شکن در فاصلهٔ $۱۰/۰m$ از آن $۱/۰\times۱۰^{-۲}W/m^۲$ است. تراز شدت صوتی آن برحسب dB چقدر می‌شود؟

۲۷. اگر به مدت ۱۰ دقیقه در معرض صوتی با تراز شدت ۱۲۰dB باشیم، آستانهٔ شنوایی به‌طور موقت از ۰dB به ۲۸dB افزایش می‌یابد. مطالعات نشان داده است که به‌طور متوسط اگر به مدت ۱۰ سال در معرض صدایی با تراز شدت ۹۲dB قرار گیریم، آستانهٔ شنوایی به‌طور دائم به ۲۸dB افزایش می‌یابد. شدت‌های صوت مربوط به ۲۸dB و ۹۲dB چقدر است؟ (راهنمایی: برای پاسخ دادن لازم است از ماشین‌حساب مناسب استفاده کنید.)

۲۸. یک دستگاه صوتی، صدایی با تراز شدت $\beta_۱=۹۰/۰dB$ و دستگاه صوتی دیگر، صدایی با تراز شدت $\beta_۲=۹۵/۰dB$ ایجاد می‌کند. شدت‌های مربوط به این دو تراز (برحسب $W/m^۲$) به ترتیب $I_۱$ و $I_۲$ هستند. نسبت $I_۲/I_۱$ را تعیین کنید.

۲۹. در یک آتش‌بازی، موشکی در بالای آسمان منفجر می‌شود. فرض کنید صوت به‌طور یکنواخت در تمام جهت‌ها منتشر شود. از جذب انرژی صوتی در محیط و نیز از بازتابی که ممکن است امواج صوتی از زمین پیدا کند چشم‌پوشی کنید. با فرض اینکه صوت با شدت $I=۰/۱۰W/m^۲$ به شنونده‌ای برسد که به فاصلهٔ $r_۱=۶۴۰m$ از محل انفجار قرار دارد، این صوت به شنونده‌ای که در فاصلهٔ $r_۲=۱۶۰m$ از محل انفجار قرار دارد با چه شدتی می‌رسد؟

۳۰. نمودار جابه‌جایی ـ مکان دو موج صوتی A و B که در یک محیط منتشر شده‌اند، به‌صورت زیر است. دامنه، طول‌موج، بسامد و شدت این دو موج صوتی را با هم مقایسه کنید.

۳۱. شکل زیر جهت‌های حرکت یک چشمهٔ صوتی و یک ناظر (شنونده) را در وضعیت‌های مختلف نشان می‌دهد.

	ناظر (شنونده)	چشمه
(الف)	•	•
(ب)	•	•→
(پ)	•	←•
(ت)	•→	•
(ث)	←•	•
(ج)	←•	•→
(چ)	•→	←•

بسامدی را که ناظر در حالت‌های مختلف می‌شنود با حالت الف مقایسه کنید.

۸۸

۲۵ الف) برای Δt داریم :

$$\Delta t = t_{هوا} - t_{فلز} = \frac{L}{v_{هوا}} - \frac{L}{v_{فلز}} = L\left(\frac{v_{فلز} - v_{هوا}}{v_{فلز}\ v_{هوا}}\right)$$

ب) از رابطهٔ به دست آمده در قسمت الف، L را به دست می‌آوریم :

$$L = \frac{\Delta t\ (v_{فلز}\ v_{هوا})}{v_{فلز} - v_{هوا}}$$

که در آن $v_{فلز}$ همان تندی صوت در فولاد است. از جدول ۳ـ۱ کتاب، این تندی را برابر ۵۹۴۱m/s درمی‌یابیم. در نتیجه برای L داریم :

$$L = \frac{(۱/۰۰s)(۵۹۴۱m/s)(۳۴۰m/s)}{۵۹۴۱m/s - ۳۴۰m/s} = ۳۶۰/۳m \approx ۳۶۱m$$

۲۶ از رابطهٔ $I = \overline{P}/A$ استفاده می‌کنیم. به ترتیب در محل صفحه‌ها داریم :

$$I_۱ = \frac{\overline{P}}{A_۱} = \frac{۱/۲\times۱۰^{-۴}W}{۴/۰m^۲} = ۳/۰\times۱۰^{-۵}W/m^۲$$

$$I_۲ = \frac{\overline{P}}{A_۲} = \frac{۱/۲\times۱۰^{-۴}W}{۱۲m^۲} = ۱/۰\times۱۰^{-۵}W/m^۲$$

گرچه توان عبوری از سطوح برابر است، ولی شنوندهٔ دوم توان بر واحد سطح کمتری از شنوندهٔ اول دریافت می‌کند.

۲۷ تراز شدت صوت از رابطهٔ زیر به دست می‌آید :

$$\beta = (۱۰dB)\log\left(\frac{I}{I_۰}\right)$$

که در آن $I_۰ = ۱/۰۰\times۱۰^{-۱۲}W/m^۲$ است. بنابراین β به ازای $I = ۱/۰\times۱۰^{-۲}W/m^۲$ چنین می‌شود

$$\beta = (۱۰dB)\log\left(\frac{۱/۰\times۱۰^{-۲}W/m^۲}{۱/۰۰\times۱۰^{-۱۲}W/m^۲}\right) = ۱/۰\times۱۰^{۲}dB$$

۲۸ اهمیت این مسئله، بیش از حل آن، به محتوای آن بازمی‌گردد. در واقع اگر مدتی طولانی در معرض صدایی با تراز شدت بالایی قرار گیریم، آستانهٔ شنوایی ما ممکن است به طور دائم افزایش یابد. در هر حال، حل مسئله که نیاز به ماشین حسابی با قابلیت چنین محاسباتی دارد چنین است :

$$\beta = (۱۰dB)\log\left(\frac{I}{I_۰}\right)$$

و از آنجا

$$I = I_۰\ ۱۰^{\left(\frac{\beta}{۱۰dB}\right)}$$

که به ترتیب به ازای $\beta_۱ = ۲۸dB$ و $\beta_۲ = ۹۲dB$ چنین به دست می‌دهد :

$$I_۱ = (۱/۰۰\times۱۰^{-۱۲}W/m^۲)\,۱۰^{\left(\frac{۲۸dB}{۱۰dB}\right)} = ۶/۳۱\times۱۰^{-۱۰}W/m^۲$$

$$\approx 6/3 \times 10^{-10}\ \mathrm{W/m^2}$$

$$I_2 = (1/00 \times 10^{-12}\mathrm{W/m^2})\,10^{\frac{92\mathrm{dB}}{10\mathrm{dB}}} = 1/58 \times 10^{-3}\ \mathrm{W/m^2}$$

$$\approx 1/6 \times 10^{-3}\ \mathrm{W/m^2}$$

۲۹ نخست تفاضل βها را محاسبه می‌کنیم.

$$\beta_2 - \beta_1 = (10\,\mathrm{dB})\log\left(\frac{I_2}{I_0}\right) - (10\,\mathrm{dB})\log\left(\frac{I_1}{I_0}\right)$$

$$= (10\,\mathrm{dB})\log\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

و از آنجا

$$\frac{I_2}{I_1} = 10^{0/50} = 3/16 \approx 3/2$$

۳۰ از رابطهٔ $I = \overline{P}/A$ استفاده می‌کنیم که در اینجا $A = 4\pi r^2$ است. بنابراین داریم:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\dfrac{\overline{P}}{4\pi r_1^2}}{\dfrac{\overline{P}}{4\pi r_2^2}} = \frac{r_2^2}{r_1^2} = \left(\frac{160\,\mathrm{m}}{640\,\mathrm{m}}\right)^2 = \left(\frac{1}{4}\right)^2$$

و در نتیجه

$$I_2 = 16\, I_1 = 16\,(0/10\ \mathrm{W/m^2}) = 1/6\ \mathrm{W/m^2}$$

۳۱ همان‌طور که از شکل مشخص است دامنهٔ A دو برابر دامنهٔ B است. همچنین طول موج B دو برابر طول موج A است. از طرفی، طبق رابطهٔ $f = v/\lambda$ درمی‌یابیم که بسامد B نصف بسامد A است. در مورد شدت نیز با توجه به اینکه طبق رابطهٔ $I = \overline{P}/A$، شدت با توان متوسط $\overline{\ }$ متناسب است و نیز همان‌طور که در متن درس اشاره کردیم توان متوسط با مربع بسامد و دامنه متناسب است، بنابراین داریم:

$$\frac{I_B}{I_A} = \left(\frac{A_B^2 f_B^2}{A_A^2 f_A^2}\right) = \left(\frac{A_B}{A_A}\right)^2\left(\frac{f_B}{f_A}\right)^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^2\left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{16}$$

یعنی شدت موج صوتی A، ۱۶ برابر شدت موج صوتی B است.

۳۲ در حالت‌های (ب) و (پ) ناظر ساکن و چشمه متحرک است که این حالتی است که در وضعیت الف اثر دوپلر در متن درس آن را بررسی کردیم. بنابراین همان استدلال را به‌کار می‌گیریم. اگر چشمه به طرف ناظر حرکت کند (حالت ب)، تجمع جبهه‌های موج در جلوی آن بیشتر خواهد شد و بنابراین ناظر ساکن روبه‌روی آن طول موج کوتاه‌تری نسبت به وضعیتی که چشمه، ساکن بود اندازه می‌گیرد که این به معنی افزایش بسامد برای این ناظر است. با استدلالی مشابه درمی‌یابیم که با دور شدن چشمه، از بسامدی که ناظر اندازه می‌گیرد کم می‌شود و بنابراین در حالت (پ) کاهش بسامد داریم. حالت‌های (ت) و (ث) نیز همان وضعیتی هستند که در حالت ب اثر دوپلر در متن درس آن را بررسی کردیم. در این وضعیت‌ها تجمع جبهه‌های موج تغییر نمی‌کند، و اگر مانند حالت (ث) ناظر به هدف چشمه حرکت کند با جبهه‌های موج بیشتری مواجه می‌شود که به معنی افزایش بسامد است. ولی اگر ناظر مانند حالت

۶۵. تندی صوت در یک فلز خاص، برابر v_m است. به یک سر لولهٔ توخالی بلندی از جنس این فلز به طول L ضربهٔ محکمی می‌زنیم. شنونده‌ای که در سر دیگر این لوله قرار دارد دو صدا را می‌شنود. یکی ثانیهٔ از موجی است که از دیوارهٔ لوله می‌گذرد و دیگری از موجی است که از طریق هوای داخل لوله عبور می‌کند.

الف) اگر تندی صوت در هوا v_a باشد، بازهٔ زمانی Δt بین دریافت این دو صدا در گوش شنونده چقدر خواهد بود؟

ب) اگر $\Delta t = 1/00\,\mathrm{s}$ و فلز از جنس فولاد باشد، طول L لوله چقدر است؟ $(v_m = 340\,\mathrm{m/s})$

۶۶. موجی صوتی با توان $1/20\times10^{-7}\,\mathrm{W}$ از دو صفحهٔ فرضی شکل ۳ـ۲۶ می‌گذرد. با فرض اینکه مساحت صفحه‌ها به‌ترتیب $A_1 = 20\,\mathrm{m^2}$ و $A_2 = 12\,\mathrm{m^2}$ باشد، شدت صوت در دو سطح را تعیین کنید و توضیح دهید چرا شنونده در محل صفحهٔ دوم، صدا را آهسته‌تر می‌شنود.

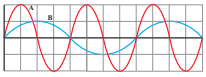
۶۷. شدت صدای حاصل از یک منبع سنگ‌شکن در فاصلهٔ $100\,\mathrm{m}$ از آن $1/00\times10^{-7}\,\mathrm{W/m^2}$ است. تراز شدت صوتی آن برحسب dB چقدر می‌شود؟

۶۸. اگر به مدت ۱۰ دقیقه در معرض صوتی با تراز شدت $120\,\mathrm{dB}$ باشیم، آستانهٔ شنوایی به‌طور موقت از $0\,\mathrm{dB}$ به $28\,\mathrm{dB}$ افزایش می‌یابد. مطالعات نشان داده است که به‌طور متوسط اگر به مدت ۱۰ سال در معرض صدایی با تراز شدت $92\,\mathrm{dB}$ قرار گیریم، آستانهٔ شنوایی به‌طور دائم به $28\,\mathrm{dB}$ افزایش می‌یابد. شدت‌های صوت مربوط به $28\,\mathrm{dB}$ و $92\,\mathrm{dB}$ چقدر است؟ (راهنمایی: برای پاسخ دادن لازم است از ماشین‌حساب مناسب استفاده کنید.)

۶۹. یک دستگاه صوتی، صدایی با تراز شدت $\beta_1 = 90/0\,\mathrm{dB}$ و دستگاه صوتی دیگر، صدایی با تراز شدت $\beta_2 = 95/0\,\mathrm{dB}$ ایجاد می‌کند. شدت‌های مربوط به این دو تراز (برحسب $\mathrm{W/m^2}$) به ترتیب I_1 و I_2 هستند. نسبت I_2/I_1 را تعیین کنید.

۷۰. در یک آتش‌بازی، موشکی در بالای آسمان منفجر می‌شود. فرض کنید صوت به‌طور یکنواخت در تمام جهت‌ها منتشر شود. از جذب انرژی صوتی در محیط و نیز از بازتابی که ممکن است امواج صوتی از زمین پیدا کند چشم‌پوشی کنید. با فرض اینکه صوت با شدت $I = 0/10\,\mathrm{W/m^2}$ به شنونده‌ای برسد که به فاصلهٔ $r_1 = 640\,\mathrm{m}$ از محل انفجار قرار دارد، این صوت به شنونده‌ای که در فاصلهٔ $r_2 = 160\,\mathrm{m}$ از محل انفجار قرار دارد با چه شدتی می‌رسد؟

۷۱. نمودار جابه‌جایی ـ مکان دو موج صوتی A و B که در یک محیط منتشر شده‌اند، به‌صورت زیر است. دامنه، طول‌موج، بسامد و شدت این دو موج صوتی را با هم مقایسه کنید.



۷۲. شکل زیر جهت‌های حرکت یک چشمهٔ صوتی و یک ناظر (شنونده) را در وضعیت‌های مختلف نشان می‌دهد.

	ناظر (شنونده)	چشمه
(الف)	•	•
(ب)	•	↔
(پ)	•	↔
(ت)	↔	•
(ث)	↔	•
(ج)	↔	↔
(چ)	↔	↔

بسامدی را که ناظر در حالت‌های مختلف می‌شنود با حالت الف مقایسه کنید.

(ت) از چشمه دور شود به معنی کاهش بسامد خواهد بود. در این مسئله می‌شد حالت‌های زیر را نیز از دانش‌آموزان پرسید. وضعیت‌هایی که چشمه و آشکارساز رودررو به سمت یکدیگر نزدیک می‌شوند و وضعیت‌هایی که چشمه و آشکارساز در خلاف جهت از هم دور می‌شوند. در این صورت با تلفیق هر دو استدلال بالا درمی‌یابیم که در وضعیتی که هر دو به هم نزدیک می‌شوند، بسامد دریافتی بیشتر و در وضعیتی که از هم دور می‌شوند، بسامد دریافتی کوچک‌تر می‌شود.

فیزیک ۳

۲۴. تندی صوت در یک فلز خاص، برابر v_1 است. به یک سر لولهٔ توخالی بلندی از جنس این فلز به طول L ضربهٔ محکمی می‌زنیم. شنونده‌ای که در سر دیگر این لوله قرار دارد دو صدا را می‌شنود. یکی ناشی از موجی است که از دیوارهٔ لوله می‌گذرد و دیگری از موجی است که از طریق هوای داخل لوله عبور می‌کند.

الف) اگر تندی صوت در هوا v_2 باشد، بازهٔ زمانی Δt بین دریافت این دو صدا در گوش شنونده، چقدر خواهد بود؟

ب) اگر $\Delta t = 1/0\,s$ و فلز از جنس فولاد باشد، طول L لوله چقدر است؟ $(v_{fe} = 34\,m/s)$

۲۵. موجی صوتی با توان $1/2\times10^{-7}W$ از دو صفحهٔ فرضی شکل ۳ـ۲۶ می‌گذرد. با فرض اینکه مساحت صفحه‌ها به‌ترتیب $A_1=40\,m^2$ و $A_2=12\,m^2$ باشد، شدت صوت در دو سطح را تعیین کنید و توضیح دهید چرا شنونده در محل صفحهٔ دوم، صدا را آهسته‌تر می‌شنود.

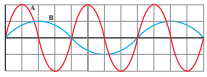
۲۶. شدت صدای حاصل از یک مثلث سنگ‌شکن در فاصلهٔ $10\,m$ از آن $1/0\times10^{-7}W/m^2$ است. تراز شدت صوتی آن برحسب dB چقدر می‌شود؟

۲۷. اگر به مدت ۱۰ دقیقه در معرض صوتی با تراز شدت $120\,dB$ باشیم، آستانهٔ شنوایی به‌طور موقت از $0\,dB$ به $28\,dB$ افزایش می‌یابد. مطالعات نشان داده است که به‌طور متوسط اگر به مدت ۱۰ سال در معرض صدایی با تراز شدت $92\,dB$ قرار گیریم، آستانهٔ شنوایی به‌طور دائم به $28\,dB$ افزایش می‌یابد. شدت‌های صوت مربوط به $28\,dB$ و $92\,dB$ چقدر است؟ (راهنمایی: برای پاسخ دادن لازم است از ماشین‌حساب مناسب استفاده کنید.)

۲۸. یک دستگاه صوتی، صدایی با تراز شدت $\beta_1=90\,dB$ و دستگاه صوتی دیگر، صدایی با تراز شدت $\beta_2=95\,dB$ ایجاد می‌کند. شدت‌های مربوط به این دو تراز (برحسب W/m^2) به ترتیب I_1 و I_2 هستند. نسبت I_2/I_1 را تعیین کنید.

۲۹. در یک آتش‌بازی، موشکی در بالای آسمان منفجر می‌شود. فرض کنید صوت به‌طور یکنواخت در تمام جهت‌ها منتشر شود. از جذب انرژی صوتی در محیط و نیز از بازتابی که ممکن است امواج صوتی از زمین پیدا کند چشم‌پوشی کنید. با فرض اینکه صوت با شدت $I=0/10\,W/m^2$ به شنونده‌ای برسد که به فاصلهٔ $r_1=640\,m$ از محل انفجار قرار دارد، این صوت به شنونده‌ای که در فاصلهٔ $r_2=160\,m$ از محل انفجار قرار دارد با چه شدتی می‌رسد؟

۳۰. نمودار جابه‌جایی ـ مکان دو موج صوتی A و B که در یک محیط منتشر شده‌اند، به‌صورت زیر است. دامنه، طول‌موج، بسامد و شدت این دو موج صوتی را با هم مقایسه کنید.



۳۱. شکل زیر جهت‌های حرکت یک چشمهٔ صوتی و یک ناظر (شنونده) را در وضعیت‌های مختلف نشان می‌دهد.

	ناظر (شنونده)	چشمه
(الف)	•	•
(ب)	•	•→
(پ)	•	←•
(ت)	•→	•
(ث)	←•	•
(ج)	←•	•→
(چ)	•→	←•

بسامدی را که ناظر در حالت‌های مختلف می‌شنود با حالت الف مقایسه کنید.