بسم الله الرحمن الرحیم

اَللّٰهُمَّ صَلِّ عَلیٰ مُحَمَّدٍ وَ آلِ مُحَمَّدٍ وَ عَجِّلْ فَرَجَهُمْ

فیزیک (۳)

رشته‌های ریاضی و فیزیک ــ علوم تجربی

راهنمای معلّم

پایهٔ دوازدهم

دوره دوم متوسطه

وزارت آموزش و پرورش
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

نام کتاب: راهنمای معلّم فیزیک(۳) ـ پایهٔ دوازدهم دورهٔ دوم متوسطه ـ ۱۱۲۳۷۵
پدیدآورنده: سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی
مدیریت برنامه‌ریزی درسی و تألیف: دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری
شناسه افزوده برنامه‌ریزی و تألیف: روح‌الله خلیلی بروجنی(فصل‌های ۵،۱ و۶)ـ احمد احمدی (فصل ۲)ـ محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر (فصل‌های ۳و۴) (اعضای گروه تألیف)
مدیریت آماده‌سازی هنری: اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی
شناسه افزوده آماده‌سازی: احمد رضا امینی(مدیر امور فنی و چاپ) ـ جواد صفری (مدیر هنری)ـ الهه یعقوبی‌نیا (صفحه‌آرا) ـ فاطمه رئیسیان فیروزآباد (رسام)ـ زهره برهانی زرندی، رعنا فرج‌زاده درویی، شاداب ارشادی، سپیده ملک ایزدی و راحله زاد فتح‌اله (امور آماده‌سازی)
نشانی سازمان: تهران: خیابان ایرانشهر شمالی ـ ساختمان شمارهٔ ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)
تلفن: ۹ـ۸۸۸۳۱۱۶۱، دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶، کد پستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹
وبگاه: www.chap.sch.ir و www.irtextbook.ir
ناشر: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران تهران ـ کیلومتر ۱۷ جادهٔ مخصوص کرج ـ خیابان ۶۱ (داروپخش)
تلفن: ۵ـ۴۴۹۸۵۱۶۱، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۱۳۹ـ۳۷۵۱۵
چاپخانه: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»
سال انتشار و نوبت چاپ: چاپ اوّل ۱۳۹۸

شابک ۳ـ۳۴۲۴ـ۰۵ـ۹۶۴ـ۹۷۸
ISBN: 978_964_05_3424 _3

جوان‌ها قدر جوانی‌شان را بدانند و آن را در علم و تقوا و سازندگی خودشان صرف کنند که اشخاصی امین و صالح بشوند. مملکت ما با اشخاص امین می‌تواند مستقل باشد.

امام‌خمینی «قُدِّسَ سِرُّهُ»

کلیهٔ حقوق مادی و معنوی این کتاب متعلّق به سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی وزارت آموزش و پرورش است و هرگونه استفاده از کتاب و اجزای آن به‌صورت چاپی و الکترونیکی و ارائه در پایگاه‌های مجازی، نمایش، اقتباس، تلخیص، تبدیل، ترجمه، عکس‌برداری، نقاشی، تهیهٔ فیلم و تکثیر به هر شکل و نوع، بدون کسب مجوّز از این سازمان ممنوع است و متخلّفان تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

فهرست

فصل ۱ : حرکت بر خط راست ۱

۱ـ۱ـ شناخت حرکت ۵
۱ـ۲ـ حرکت با سرعت ثابت ۲۰
۱ـ۳ ـ حرکت با شتاب ثابت ۲۵
۱ـ۴ ـ سقوط آزاد ۳۸
راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱ ..... ۴۲

فصل ۲ : دینامیک و حرکت دایره‌ای ۵۵

۲ـ۱ـ قوانین حرکت نیوتون ۶۰
۲ـ۲ـ معرفی برخی از نیروهای خاص ۶۹
۲ـ۳ـتکانه و قانون دوم نیوتون ۸۴
۲ـ۴ـ حرکت دایره‌ای یکنواخت ۹۰
۲ـ۵ـ نیروی گرانشی ۹۷
راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲ ..... ۱۰۱

فصل ۳ : نوسان و موج ۱۱۳

۳ـ۱ـ نوسان دوره‌ای ۱۱۸
۳ـ۲ـ حرکت هماهنگ ساده ۱۱۸
۳ـ۳ـ انرژی در حرکت هماهنگ ساده ۱۲۵
۳ـ۴ـ تشدید ۱۳۱
۳ـ۵ـ موج و انواع آن ۱۳۶
۳ـ۶ـ مشخصه‌های موج ۱۴۰
راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳ ..... ۱۸۴

فصل ۴ : برهم کنش‌های موج ۱۹۵

۴ـ۱ـ بازتاب موج ۱۹۹
۴ـ۲ـ شکست موج ۲۰۷
۴ـ۳ـ پراش موج ۲۱۸
۴ـ۴ـ تداخل امواج ۲۳۴
راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل۴ ..... ۲۶۵

فصل ۵ : آشنایی با فیزیک اتمی ۲۷۷

۵ـ۱ـ اثر فوتوالکتریک و فوتون ۲۸۱
۵ـ۲ـ طیف خطی ۲۸۴
۵ـ۳ـ مدل اتمی رادرفورد ـ بور ۲۸۷
۵ـ۴ـ لیزر ۲۹۳
پرسش‌ها و تمرین‌های پیشنهادی فصل ۵ ..... ۲۹۴
راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۵ ..... ۲۹۷

فصل ۶ : آشنایی با فیزیک هسته‌ای ۳۰۳

۶ـ۱ـ ساختار هسته ۳۰۷
۶ـ۲ـ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر ۳۱۳
۶ـ۳ـ شکافت هسته‌ای ۳۱۲
۶ـ۴ـ گداخت (همجوشی) هسته‌ای ۳۱۳
پرسش‌ها و تمرین‌های پیشنهادی فصل ۶ ..... ۳۱۵
راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۶ ..... ۳۲۵

سخنی با همکاران

در دنیای امروز، دسترسی به دانش و اطلاعات، بسیار متنوع و آسان شده است؛ از این‌رو، بی‌اطلاعی از دانش و فنّاوری روز، ناتوانی در به‌کارگیری و پردازش آنها، عدم مهارت در دستیابی و تحلیل اطلاعات، عدم مهارت در برخورد با یک مسئلهٔ جدید و عدم تصمیم‌گیری مبتنی بر پردازش اطلاعات، برای شهروندان دنیای امروز غیرقابل قبول است. به همین منظور، نقش معلمان نسبت به سابق تغییر اساسی کرده است. نقش معلمان دیگر انتقال صرف دانش نیست، بلکه ایجاد نگرش مثبت و یاد دادن چگونگی برخورد با مسئله است؛ یعنی، دانش‌آموزان باید یاد بگیرند که سؤال‌های اساسی در یک مسئله یا یک موضوع را استخراج و اطلاعات موردنیاز خود را جمع‌آوری، پردازش و نتیجه‌گیری کنند. در این راستا، ابتدا معلم با طرح پرسش، نشان دادن یک تصویر و یا فیلم، طرح یک فعالیت، آزمایش یا ... در دانش‌آموزان ایجاد انگیزه کرده و آنها را با موضوع درگیر می‌کند و سپس آنها را هدایت می‌کند تا در تولید مفاهیم علمی مشارکت کنند. آموزش باید به‌گونه‌ای باشد که دانش‌آموزان نحوهٔ برخورد منطقی و علمی با مسائل را بیاموزند؛ لذا شایسته است، ما هم در به‌کارگیری شیوه‌های نوین آموزشی، آشنا شدن با دانش‌های جدید، کسب مهارت‌های مورد نیاز، استفاده از شبکه‌های اطلاعاتی، افزایش خلاقیت خود و... بکوشیم.

ساختار این کتاب پس از مطالعه، تحقیق، بررسی و بحث‌های مفصل بین کارشناسان آموزشی و همچنین مطالعه و بررسی کتاب‌های راهنمایی معلم مختلف تنظیم شده است و با ارائهٔ الگوهایی، مشارکت هرچه بیشتر دانش‌آموزان را در فرایند یاددهی ــ یادگیری و کسب تجربه، فراهم می‌کند. در ادامه، به شرح مختصر عناوین مطرح شده در این کتاب می‌پردازیم.

الف) هدف‌ها : در مواردی که هدف یک بخش، فصل، آزمایش و یا ... خیلی مشخص نیست، پیامدها، هدف‌های دانشی، مهارتی و نگرشی آن آورده شده است.

ب) دانسته‌های قبلی : در این قسمت، دانسته‌های قبلی دانش‌آموزان که در پایه‌های تحصیلی پایین‌تر مطرح شده و مرتبط با بخش است، آورده شده است.

پ) محدودهٔ بحث : به‌منظور تأکید روی مفاهیمی که در کتاب درسی به آنها پرداخته شده است، حوزه و محدودهٔ یادگیری در موارد ضروری، تعیین شده است.

ت) نشانگر (آیکون)های فیلم : برای عمق بخشیدن به مطالب نظری، فیلم‌های آموزشی تدارک دیده شده است که در کتاب با نشانگر(آیکون)هایی مشخص شده است. کلیهٔ فیلم‌ها در سایت بخش فیزیک بارگذاری شده است.

ث) راهنمای تدریس : در این قسمت، روش‌هایی برای شروع درس به معلم پیشنهاد شده است. این روش‌ها کاملاً انعطاف‌پذیرند و معلم می‌تواند با توجه به امکانات، شرایط و اقتضای کلاس، هر روش دیگری را که بتواند دانش‌آموزان را بیشتر ترغیب کرده و آنها را به موضوع درس علاقه‌مند کند، به‌کار گیرد. همچنین به منظور شفاف شدن مطالب درسی توصیه‌هایی نیز ارائه شده است.

ج) فعالیت‌های پیشنهادی : به منظور درک عمیق‌تر مفاهیم درسی و درگیر کردن دانش‌آموزان به منظور تولید مفهوم، در هر واحد یادگیری، تعدادی فعالیت پیش‌بینی شده است که برخی از آنها به صورت فعالیت‌های خارج از کلاس تدارک دیده شده است. تأکید می‌شود که انجام همهٔ این فعالیت‌ها ضروری نیست و یک معلم مجرب، با توجه به وضعیت کلاس یا امکاناتی که در اختیار دارد می‌تواند هر فعالیت دیگری را که مؤثر واقع شود، به‌دانش‌آموزان پیشنهاد کند.

چ) آزمایش‌های پیشنهادی : در اغلب موارد، قسمت عمده‌ای از یادگیری توسط انجام دادن آزمایش و کارهای عملی صورت می‌گیرد. برای افزایش عمق یادگیری و لذت بیشتر از آموختن و یادگیری تجربی، به آزمایش‌های متنوع و متعددی نیاز است؛ از این‌رو، در مواردی، آزمایش‌های کتاب تعمیم یافته یا آزمایش‌های ساده و جدیدی پیشنهاد شده است که دانش‌آموزان می‌توانند آنها را در گروه‌های خود انجام دهند.

ح) تمرین‌های پیشنهادی : برای عمق بخشیدن به بخش دانشی مطالب کتاب، تمرین‌های پیشنهادی نیز ارائه شده است که دبیران محترم می‌توانند از آنها به عنوان تکالیف درسی یا مثال استفاده کنند.

خ) دانستنی‌های معلم : برای آشنایی همکاران با برخی از موضوعات مرتبط با هر فصل، مطالبی در غالب «دانستنی‌های ضروری» تدارک دیده شده است. ضرورتی در انتقال این مفاهیم به دانش‌آموزان نیست و تنها می‌توان تحقیق در مورد برخی از آنها را به عنوان فعالیت خارج از کلاس به گروه‌های دانش‌آموزی واگذار کرد.

د) پاسخ فعالیت‌ها و تمرین‌ها : در بسیاری از موارد ابتدا اهداف تمرین‌ها و فعالیت‌های داخل هر فصل تعیین شده و سپس پاسخ آنها و پاسخ تمرین‌های آخر فصل آورده شده است.

برای دسترسی به آزمایشگاه‌های مجازی و شبیه‌سازهای مناسب هر فصل و همچنین مجموعه آزمایش‌های مرتبط با مفاهیم فصل‌های فیزیک ۳، می‌توانید به سایت بخش فیزیک به آدرس http: //physics-dep.talif.sch.ir مراجعه نمایید.

فصل یک

حرکت بر خط راست

۱ـ۱ـ شناخت حرکت
۱ـ۲ـ حرکت با سرعت ثابت
۱ـ۳ ـ حرکت با شتاب ثابت
۱ـ۴ـ سقوط آزاد
راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱

پیامدها

دانش‌آموزان با درک مفاهیم حرکت و انواع حرکت برخط راست، به این شناخت می‌رسند که :

- مبحث حرکت در فیزیک، یکی از مباحث بنیادی است که درفهم دیگر مباحث و زمینه‌های فیزیک نقش مهمی دارد.
- مفهوم فیزیکی کمیت‌هایی از قبیل تندی، سرعت و شتاب که برای توصیف حرکت به‌کار می‌روند با کاربرد آنها در گفتگوهای زندگی روزمره تفاوت دارد.

چه شناختی مطلوب است؟

- برای توصیف حرکت از کمیت‌هایی استفاده می‌شود که تعریف مشخصی دارند.
- ساده‌ترین نوع حرکت، حرکت جسم بر خط راست و با سرعت ثابت است.
- مسافت و جابه‌جایی دو کمیت فیزیکی متفاوت‌اند و تنها در یک حالت خاص، اندازه بردارجابه‌جایی با مسافت پیموده شده برابر است.
- تندی لحظه‌ای و سرعت لحظه‌ای را برای اختصار در بیان و نوشتار و بنابه قراردادی که در تمام کتاب‌های درسی رعایت می‌شود به‌صورت تندی و سرعت می‌نویسیم و به‌کار می‌بریم.
- بیشتر حرکت‌های اجسام دور و بر ما، حرکت شتابدار است که می‌توان آنها را در بیشتر شرایط به‌صورت حرکت با شتاب ثابت مدل‌سازی کرد و به توصیف و بررسی آنها پرداخت.
- حرکت اجسام در حال سقوط را می‌توان به‌عنوان نمونه‌ای از حرکت با شتاب ثابت مدل‌سازی کرد.
- حرکت سقوط آزاد شامل پرتاب جسم روبه بالا، روبه پایین و همچنین رها کردن جسم از ارتفاع معینی نسبت به سطح زمین است.

چه پرسش‌هایی اساسی است و باید درنظر گرفته شوند؟

- تفاوت مسافت و جابه‌جایی در چیست؟
- تفاوت تندی متوسط و سرعت متوسط در چیست؟
- چه موقع مسافت و اندازهٔ جابه‌جایی متحرک با یکدیگر برابر است؟
- چه موقع تندی متوسط و اندازهٔ سرعت متوسط متحرک با یکدیگر برابر است؟
- ساده‌ترین نوع حرکت، چه نوع حرکتی است؟
- حرکت بیشتر اجسام پیرامون را با چه نوع حرکتی می‌توان مدل‌سازی کرد؟
- حرکت جسم در چه شرایطی با شتاب ثابت است؟
- در چه صورت حرکت سقوط آزاد اجسام را می‌توان به صورت نمونه‌ای از حرکت با شتاب ثابت مدل‌سازی کرد؟
- در مدل‌سازی حرکت سقوط آزاد، چه عواملی را درنظر نمی‌گیریم؟

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

دانش آموزان خواهند دانست که :

- **واژگان کلیدی** : مسافت، مسیر، جابه‌جایی، تندی متوسط، سرعت متوسط، تندی لحظه‌ای، سرعت لحظه‌ای، شتاب متوسط، شتاب لحظه‌ای، سرعت ثابت، شتاب ثابت، سقوط آزاد.
- به کمک چند کمیت فیزیکی که تعریف مشخصی دارند، می‌توان حرکت تمام اجسام پیرامون را توصیف و بررسی کرد.
- حرکت بیشتر اجسام پیرامون را می‌توان به‌صورت حرکت با شتاب ثابت مدل‌سازی کرد.

دانش‌آموزان قادر خواهند بود :

- به بررسی و توصیف حرکت اجسام پیرامون بپردازند.
- برای حالتی که جسم بر خط راست حرکت می‌کند، نوع حرکت جسم را تشخیص دهند و کمیت‌های مرتبط با آن را محاسبه کنند.
- با طراحی فعالیتی ساده، حرکت با سرعت ثابت و حرکت با شتاب ثابت را نشان دهند.
- با طراحی فعالیتی ساده، تندی متوسط و سرعت متوسط یک متحرک را در یک مسیر مستقیم پیدا کنند.
- به کمک نرم‌افزارهای معینی (همچون google map) مسیر حرکت خود را از مبدأ تا مقصد مشخص کنند و با دانستن مسافت و جابه‌جایی، تندی متوسط و سرعت متوسط خود را حساب کنند.

بودجه‌بندی پیشنهادی

جلسه اول : نگاهی به مقدمهٔ کتاب (سخنی با دانش‌آموزان)، تصویر شروع فصل، مقدمه‌ای بر بحث حرکت و اشاره‌ای به آنچه در علوم سال نهم درخصوص حرکت آموختند و همچنین بخش ۱ــ۱ تا پایان مسافت و جابه‌جایی
جلسه دوم : بخش ۱ــ۱ از تندی متوسط و سرعت متوسط (صفحه۳) تا تندی لحظه‌ای و سرعت لحظه‌ای (صفحه۹)
جلسه سوم : بخش ۱ــ۱ از تندی لحظه‌ای و سرعت لحظه‌ای (صفحه۹) تا تعیین شتاب متوسط و لحظه‌ای به کمک نمودار سرعت ــ زمان (صفحه ۱۱)
جلسه چهارم : بخش ۱ــ۱ از تعیین شتاب متوسط و لحظه‌ای به کمک نمودار سرعت ــ زمان (صفحه ۱۱) تا حرکت با سرعت ثابت (صفحهٔ ۱۳) و همچنین بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های پایان فصل مربوط به بخش ۱ــ۱
جلسه پنجم : بخش ۱ــ۲ حرکت با سرعت ثابت (صفحه ۱۳) تا پایان آن و همچنین بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های پایان فصل مربوط به بخش ۱ــ۲
جلسه ششم و هفتم : بخش ۱ــ۳ حرکت با شتاب ثابت (صفحهٔ ۱۵) و بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های پایان فصل مربوط به بخش ۱ــ۳
جلسه هشتم و نهم : بخش ۱ــ۴ سقوط آزاد تا پایان و همچنین بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های پایان فصل مربوط به بخش ۱ــ۴
جلسه دهم : جمع‌بندی و بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های باقی‌ماندهٔ پایان فصل
جلسه یازدهم : آزمون تشریحی فصل اول

در این تصویر حرکت خودروها (در دو مسیر رفت و برگشت) در بزرگراهی نشان داده شده که تقریباً بر خط راست است. از آنجا که دانش‌آموزان شناختی اولیه نسبت به کمیت‌های فیزیکی توصیف کننده حرکت به‌دست آورده‌اند، می‌توان در شروع بحث نگاهی به «آنچه دانش‌آموزان در علوم سال نهم در این خصوص فراگرفته‌اند» داشت و به بررسی پرسش داده شده در زیر این‌تصویر پرداخت. انتظار نمی‌رود که در این بحث و گفت‌وگو دانش آموزان قادر باشند تا پاسخی دقیق به این پرسش بدهند، بلکه اشاره‌ای درست به برخی از مفاهیم مرتبط به آن می‌تواند کافی باشد. به همین دلیل انتظار می‌رود در پایان بخش ۱ــ۱ دانش‌آموزان بتوانند به پاسخ مناسبی برای این پرسش برسند و در پاسخ خود کمیت‌ها و مفاهیم فیزیکی مرتبط را به درستی به‌کار ببرند.

۱ــ۱ــ شناخت حرکت

راهنمای تدریس : عنوان این بخش «شناخت حرکت» انتخاب شده است تا ضمن مروری بر آنچه دانش‌آموزان در علوم سال نهم فراگرفته‌اند، کمیت‌های مرتبط با حرکت به‌طور دقیق تر و با سازکار برداری (و همچنین به‌کار بردن برداری که برای حالت حرکت بر خط راست) معرفی شوند. لازم است دبیران محترم فیزیک توجه کنند که در این بخش حرکت اجسام هم در صفحه (برای تعریف کمیت‌های مرتبط با حرکت) و هم بر خط راست بررسی شده است به‌طوری که در مثال‌ها و تمرین‌های داده شده نیز این موضوع دیده می‌شود. بنابراین در این بخش نگاهی کلی‌تر و فراتر از حرکت بر خط راست، به حرکت اجسام داریم.

دانش‌آموزان در علوم سال نهم با مفاهیم مسافت و جابه‌جایی به‌طور کامل آشنا شده‌اند و به ماهیت برداری بودن جابه‌جایی نیز واقف‌اند. در اینجا ضمن مرور این مفاهیم، در پرسش ۱ــ۱ و فعالیت ۱ــ۱ به جمع‌بندی این دو مفهوم پرداخته‌ایم.

فیزیک ۳

بررسی حرکت اجسام، همواره مورد توجه بشر بوده است. در فیزیک نیز، شناخت و توصیف حرکت اجسام، یکی از مباحث مهمی است که در هر کتاب درسی به آن پرداخته می‌شود و زمینه‌ساز درک بهتر مباحث دیگر فیزیک است. آشنایی با حرکت اجسام، که به آن حرکت‌شناسی یا سینماتیک نیز گفته می‌شود، در بیشتر شاخه‌های مهندسی اهمیت زیادی دارد. برای مثال، مدت زمان رسیدن تندی خودرو از صفر به ۱۰۰km/h یکی از معیارهای مقایسهٔ خودروهای امروزی در صنعت خودروسازی است. همچنین مهندسانی که به طراحی و ساخت باند پرواز فرودگاه‌ها می‌پردازند توجه دارند که هواپیماهای مختلف برای آنکه به تندی لازم برای برخاستن برسند، چه مسافتی را باید روی باند پرواز طی کنند. زمین‌شناسان نیز برای تعیین محل‌هایی که امکان وقوع زمین‌لرزه در آنها بیشتر است باید حرکت صفحه‌های زمین را بررسی کنند و از مفاهیم مرتبط با بحث حرکت‌شناسی استفاده کنند. افزون بر اینها پژوهشگران پزشکی برای یافتن رگ مسدود باید به نحوهٔ حرکت خون در رگ‌ها توجه کنند.

در این فصل ابتدا نگاهی دقیق‌تر خواهیم انداخت به آنچه در علوم نهم در خصوص حرکت آموختید. پس از آن، به ساده‌ترین نوع حرکت، یعنی حرکت جسم بر خط راست، خواهیم پرداخت. در پایان فصل نیز، حرکت سقوط آزاد اجسام را به‌عنوان مثالی از حرکت با شتاب ثابت، بررسی می‌کنیم.

۱ــ۱ شناخت حرکت

در علوم سال نهم با مفاهیم اولیهٔ حرکت آشنا شدید. در این بخش ضمن مرور این مفاهیم و کمیت‌های مرتبط با آنها، زمینهٔ لازم را برای شناخت و توصیف دقیق‌تر حرکت فراهم می‌کنیم.

مسافت و جابه‌جایی : شکل ۱ــ۱ مسیر حرکت دونده‌ای را از مکان ۱ تا مکان ۲ نشان می‌دهد. طول این مسیر، مسافت پیموده شده یا به‌اختصار مسافت نامیده می‌شود. همچنین پاره‌خط جهت‌داری که مکان آغازین حرکت را به مکان پایانی حرکت وصل می‌کند بردار جابه‌جایی نامیده می‌شود.

شکل ۱ــ۱ مسیر حرکت و بردار جابه‌جایی دونده

پرسش ۱ــ۱

۱ــ شکل الف شخصی را در حال پیاده‌روی در راستای خط راست و بدون تغییر جهت، از مکان ۱ به مکان ۲ نشان می‌دهد. مسیر حرکت و بردار جابه‌جایی شخص را روی شکل مشخص و اندازهٔ بردار جابه‌جایی را با مسافت مقایسه کنید.

۲ــ شخص پس از رسیدن به مکان ۲، برمی‌گردد و روی همان مسیر به مکان ۳ می‌رود (شکل ب). مسیر حرکت و بردار جابه‌جایی شخص را روی شکل مشخص و اندازهٔ بردار جابه‌جایی را با مسافت پیموده شده مقایسه کنید.

۲

پرسش ۱ــ۱

۱ کافی است دانش‌آموزان روی شکل مسیر حرکت (که خط راست است) و همچنین بردار جابه‌جایی (پاره‌خط جهت‌داری که از نقطهٔ ۱ به نقطهٔ ۲ رسم می‌شود) را روی شکل مشخص کنند. در این پرسش هدف این بوده است که دانش‌آموزان توجه داشته باشند که تنها در حالت بسیار خاصی است که مسافت و اندازهٔ جابه‌جایی متحرک باهم برابر می شوند.

۲ در این پرسش نیز باید مسیر و بردار جابه‌جایی متحرک روی شکل مشخص شود. هدف این پرسش این بوده است که دانش‌آموزان متوجه شوند که در چه شرایطی مسافت و اندازهٔ بردار جابه‌جایی متحرک باهم برابر نیستند.

۳ در این پرسش نیز دانش‌آموزان باید روی شکل مسیر و بردار جابه‌جایی حرکت ماه به دور زمین را رسم کنند. هدف این پرسش این بوده است که وقتی حرکت جسم در صفحه است، مسیر، مسافت و بردار جابه‌جایی چه وضعیتی نسبت به یکدیگر دارند.

فعالیت ۱ـ۱

مشابه این فعالیت را باید هر دانش‌آموز با توجه به نحوهٔ آمدن خود به مدرسه انجام دهند. به این منظور می‌توانند از منوی بالای سمت راست google map نحوهٔ حرکت خود را مطابق شکل روبه‌رو تعیین‌کنند (پیاده‌روی، دوچرخه، تاکسی، اتوبوس و ...).

فصل ۱: حرکت بر خط راست

۳ـ شکل ب مسیر حرکت ماه به دور زمین را نشان می‌دهد. وقتی ماه در جهت نشان داده شده در شکل، از مکان ۱ به مکان ۲ می‌رود مسیر حرکت و بردار جابه‌جایی آن را روی شکل مشخص و اندازهٔ بردار جابه‌جایی آن را با مسافت پیموده شده مقایسه کنید.

ماه
زمین
مسیر (مدار) حرکت ماه به دور زمین
(ب)

فعالیت ۱ـ۱

هماننده شکل روبه‌رو و به کمک یک نرم‌افزار نقشه‌یاب (مانند google map)، مکان خانه و مدرسه‌تان را مشخص کنید. سپس مسافت و اندازهٔ بردار جابه‌جایی خانه تا مدرسه را تعیین کنید.

خانه
شمال
Vmin
۵۵ km

تندی متوسط و سرعت متوسط: اگر متحرکی مانند دونده‌ٔ شکل ۱ـ۱ در مدت زمان Δt از مکان ۱ به مکان ۲ برود و مسافت و بردار جابه‌جایی بین این دو مکان را به ترتیب با l و $\vec{d}$ نشان دهیم، همان‌طور که در علوم سال نهم دیدید، تندی متوسط و سرعت متوسط دونده به‌صورت زیر تعریف می‌شوند [1]:

$$s_{av} = \frac{l}{\Delta t} \quad \text{(تندی متوسط)} \qquad (۱ـ۱)$$

$$\vec{v}_{av} = \frac{\vec{d}}{\Delta t} \quad \text{(سرعت متوسط)} \qquad (۱ـ۲)$$

همان‌طور که دیده می‌شود تندی متوسط، کمیتی نرده‌ای و سرعت متوسط، کمیتی برداری[2] است و یکای SI آنها، متر بر ثانیه (m/s) است که می‌توان آنها را برحسب یکاهای دلخواه دیگری مانند کیلومتر بر ساعت (km/h) نیز بیان کرد.

۱ـ شاخص پایین $_{av}$ در نمادهای تندی متوسط و سرعت متوسط از واژهٔ انگلیسی average به معنای متوسط گرفته شده است.
۲ـ آموزش مسائلی که داشن‌آموزان را در محاسبهٔ $\vec{d}$ و $\Delta\vec{r}$، درگیر عملیات برداری در یا سه بعدی، در صفحه‌ی xy یا فضای xyz می کند خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

۳

تندی متوسط و سرعت متوسط

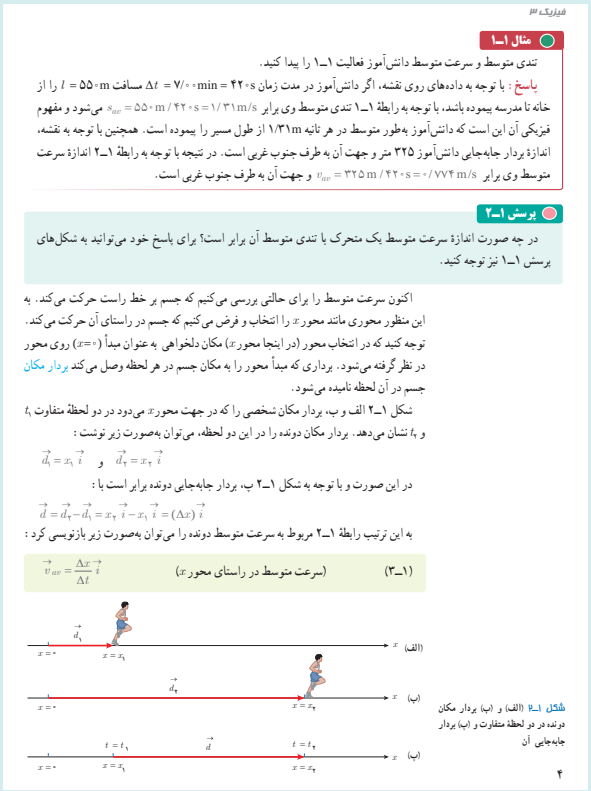
راهنمای تدریس: دانش‌آموزان در علوم سال نهم، با تعریف این کمیت‌ها آشنا شده‌اند ولی در اینجا ضمن آشنایی با نمادگذاری آنها، قادر خواهند بود تا این کمیت‌ها را در شرایط مختلف و با نمادگذاری‌های استاندارد انجام دهند. توجه کنید که به جای استفاده از نماد $\vec{v}$ برای سرعت متوسط، از نمادگذاری $\vec{v}_{av}$ استفاده شده است که تمام کتاب‌های درسی استاندارد و از جمله کتاب‌های فیزیک پایه دانشگاهی از آن استفاده می‌شود.

پرسش ۱ـ۲

پاسخ: همان‌طور که در ادامهٔ پرسش نیز آمده است دانش‌آموزان می‌توانند برای پاسخ دادن به شکل‌های پرسش ۱ـ۱ توجه کنند. مطابق این شکل‌ها، اگر متحرک برخط راست حرکت کند و در حین حرکت به عقب بازنگردد، اندازهٔ سرعت متوسط با تندی متوسط آن برابر است.

ادامه راهنمای تدریس: از آنجا که در ادامه تنها به حرکت بر خط راست پرداخته می‌شود، می‌توان کمیت‌های برداری جابه‌جایی و سرعت متوسط را برای حالتی که متحرک در امتداد محور x حرکت می‌کند، بازنویسی کرد. دانش‌آموزان باید توجه کنند که در این کتاب بردارهای مکان با نماد $\vec{d}$ اندیس‌دار معرفی شده است (مثلاً $\vec{d}_1$ ، $\vec{d}_2$ و ...) و بردار جابه‌جایی مشابه آنچه در علوم سال‌های هفتم و نهم و همچنین فیزیک (۱) دیده‌اند با نماد $\vec{d}$ معرفی شده است.

مثال ۱ــ۲ و تمرین ۱ــ۱ نیز مبتنی بر همین دیدگاه حرکت بر خط راست و توجه به نمادگذاری برداری مطرح شده‌اند.



فیزیک ۳

مثال ۱ــ۱

تندی متوسط و سرعت متوسط دانش‌آموز فعالیت ۱ــ۱ را پیدا کنید.

پاسخ: با توجه به داده‌های روی نقشه، اگر دانش‌آموز در مدت زمان $\Delta t = 7/00\,\text{min} = 420\,\text{s}$ مسافت $l = 550\,\text{m}$ را از خانه تا مدرسه پیموده باشد، با توجه به رابطهٔ ۱ــ۱ تندی متوسط وی برابر $s_{av} = 550\,\text{m}/420\,\text{s} = 1/31\,\text{m/s}$ می‌شود و مفهوم فیزیکی آن این است که دانش‌آموز به‌طور متوسط در هر ثانیه ۱/۳۱m از طول مسیر را پیموده است. همچنین با توجه به نقشه، اندازهٔ بردار جابه‌جایی دانش‌آموز ۳۲۵ متر و جهت آن به طرف جنوب غربی است. در نتیجه با توجه به رابطهٔ ۱ــ۲ اندازهٔ سرعت متوسط وی برابر $v_{av} = 325\,\text{m}/420\,\text{s} = 0/774\,\text{m/s}$ و جهت آن به طرف جنوب غربی است.

پرسش ۱ــ۲

در چه صورت اندازهٔ سرعت متوسط یک متحرک با تندی متوسط آن برابر است؟ برای پاسخ خود می‌توانید به شکل‌های پرسش ۱ــ۱ نیز توجه کنید.

اکنون سرعت متوسط را برای حالتی بررسی می‌کنیم که جسم بر خط راست حرکت می‌کند. به این منظور محوری مانند محور x را انتخاب و فرض می‌کنیم که جسم در راستای آن حرکت می‌کند. توجه کنید که در انتخاب محور (در اینجا محور x) مکان دلخواهی به عنوان مبدأ ($x=0$) روی محور در نظر گرفته می‌شود. برداری که مبدأ محور را به مکان جسم در هر لحظه وصل می‌کند بردار مکان جسم در آن لحظه نامیده می‌شود.

شکل ۱ــ۲ الف و ب، بردار مکان شخصی را که در جهت محور x می‌دود در دو لحظهٔ متفاوت t_1 و t_2 نشان می‌دهد. بردار مکان دونده را در این دو لحظه، می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\vec{d}_1 = x_1\vec{i} \quad \text{و} \quad \vec{d}_2 = x_2\vec{i}$$

در این صورت و با توجه به شکل ۱ــ۲ پ، بردار جابه‌جایی دونده برابر است با:

$$\vec{d} = \vec{d}_2 - \vec{d}_1 = x_2\vec{i} - x_1\vec{i} = (\Delta x)\vec{i}$$

به این ترتیب رابطهٔ ۱ــ۲ مربوط به سرعت متوسط دونده را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\vec{v}_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t}\vec{i} \qquad \text{(سرعت متوسط در راستای محور } x\text{)} \qquad (۱ــ۳)$$

شکل ۱ــ۲ (الف) و (ب) بردار مکان دونده در دو لحظهٔ متفاوت و (ب) بردار جابه‌جایی آن

۴

تمرین ۱ــ۱

جاهای خالی در جدول، برای هر متحرک به ترتیب از راست به چپ آمده است.

متحرک A : $(8/4\,\text{m})\vec{i}$ ، $(2/1\,\text{m/s})\vec{i}$ ، مثبت محور x (جهت محور x)

متحرک B : $(3/1\,\text{m})\vec{i}$ ، $(-1/4\,\text{m/s})\vec{i}$ ، منفی محور x (خلاف جهت محور x)

متحرک C : $(6/6\,\text{m})\vec{i}$ ، $(1/65\,\text{m/s})\vec{i}$ ، مثبت محور x

متحرک D : $(8/2\,\text{m})\vec{i}$ ، $(9/6\,\text{m})\vec{i}$ ، مثبت محور x

ادامهٔ راهنمای تدریس : هرچند در ابتدای این بخش کمیت‌هایی مانند جابه‌جایی، تندی متوسط و سرعت متوسط برای حالت کلی تعریف شده‌اند ولی از آنجا که هدف اصلی این فصل بررسی حرکت بر خط راست اجسام است، لذا می‌توان با حذف علامت بردار از روی کمیت‌های برداری، به **علامت جبری** این کمیت‌ها توجه کرد و از روی علامت آنها به جهت حرکت پی برد. مطابق شکل ۱ــ۳، اگر علامت هریک از کمیت‌های جابه‌جایی (Δx) و سرعت متوسط ($\mathrm{V}a_x$)، مثبت باشد، حرکت در جهت محور x و اگر منفی باشد حرکت متحرک در جهت منفی محور x است. توجه کنید که در ادامه، جابه‌جایی متحرک در امتداد محور x با نماد Δx نشان داده شده است که علامت Δx نشان‌دهندهٔ جهت حرکت متحرک است. برای مثال اگر جابه‌جایی متحرک $\Delta x = -۲/۱\,\mathrm{m}$ شده باشد، اندازهٔ جابه‌جایی برابر $۲/۱\,\mathrm{m}$ است و علامت منفی نشان‌دهنده جهت جابه‌جایی است که در اینجا در جهت منفی محور x (یا خلاف جهت محور x) است.

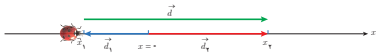
مثال ۱ــ۲

کفش‌دوزکی که در جهت محور x در حرکت است، در لحظه‌های $t_1 = ۰\,\mathrm{s}$ و $t_2 = ۷۴\,\mathrm{s}$ به ترتیب از مکان‌های $x_1 = -۲۸\,\mathrm{cm}$ و $x_2 = ۵۴\,\mathrm{cm}$ می‌گذرد.

الف) بردارهای مکان در لحظه‌های t_1 و t_2 و بردار جابه‌جایی کفش‌دوزک در این بازهٔ زمانی را رسم کنید.

ب) سرعت متوسط کفش‌دوزک را در این بازهٔ زمانی پیدا کنید.

پاسخ : الف)



ب) چون کفش‌دوزک در راستای خط راست حرکت می‌کند، سرعت متوسط آن برابر است با :

$$\vec{v}_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t}\vec{i} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}\vec{i} = \frac{۵۴\,\mathrm{cm} - (-۲۸\,\mathrm{cm})}{۷۴\,\mathrm{s} - ۰\,\mathrm{s}}\vec{i} = (۱/۱\,\mathrm{cm/s})\,\vec{i}$$

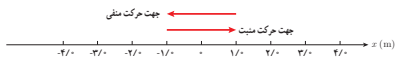
تمرین ۱ــ۱

جدول زیر را کامل کنید. فرض کنید هر چهار متحرک در مدت زمان $۴/۰\,\mathrm{s}$ فاصلهٔ بین مکان آغازین و مکان پایانی را طی می‌کنند.

	مکان آغازین	مکان پایانی	بردار جابه‌جایی	سرعت متوسط	جهت حرکت
متحرک A	$(-۲/۰\,\mathrm{m})\,\vec{i}$	$(۶/۴\,\mathrm{m})\,\vec{i}$			
متحرک B		$(-۲/۵\,\mathrm{m})\,\vec{i}$	$(-۵/۶\,\mathrm{m})\,\vec{i}$		
متحرک C	$(۲/۰\,\mathrm{m})\,\vec{i}$	$(۸/۶\,\mathrm{m})\,\vec{i}$			
متحرک D	$(-۱/۴\,\mathrm{m})\,\vec{i}$			$(۲/۴\,\mathrm{m/s})\,\vec{i}$	

از آنجا که در ادامهٔ این فصل، تنها حرکت اجسام بر خط راست بررسی می‌شود، جابه‌جایی متحرک را به‌جای بردار $\vec{d}$ به‌صورت Δx و سرعت متوسط را به‌جای بردار $\vec{v}_{av}$ به‌صورت رابطهٔ زیر در حل مسئله‌ها به کار می‌بریم. در این صورت علامت جبری Δx و v_{av} جهت جابه‌جایی را نشان می‌دهند. اگر متحرک در جهت محور x حرکت کند جابه‌جایی و سرعت متوسط آن مثبت و اگر متحرک در خلاف جهت محور x حرکت کند، جابه‌جایی و سرعت متوسط آن منفی خواهد بود (شکل ۱ــ۳).

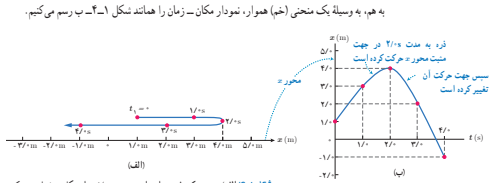
$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad \text{(رابطهٔ سرعت متوسط برای حرکت در راستای محور } x\text{)} \qquad (۱ــ۴)$$



شکل ۱ــ۳ مکانی که روی یک محور تعیین می‌شود برحسب یکای طول (در اینجا متر) نشانه‌گذاری می‌شود و در دو جهت تا بی‌نهایت ادامه دارد. نام محور، در اینجا x، در قسمت مثبت نوشته می‌شود.

ادامهٔ راهنمای تدریس : نمودارها نقش تعیین‌کننده‌ای در آموزش و یادگیری محتوای این فصل ایفا می‌کنند. به‌طوری که تقریباً تمامی مثال‌ها و تمرین‌های داخل و پایان فصل براساس نمودارها طراحی شده‌اند. از آنجا که برای نخستین بار است که دانش آموزان با این گونه نمودارها آشنا می‌شوند، باید وقت کافی برای آموزش درست و رفع کج‌فهمی‌های مرتبط با آنها گذاشته شود تا دانش‌آموزان قادر شوند در وضعیت‌های مختلف و برای بررسی و تبیین حرکت اجسام، از این نمودارها استفاده کنند.

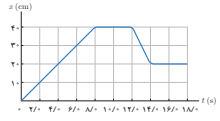
برای توصیف حرکت یک جسم می‌توان از نمودار مکان ــ زمان، که مکان جسم را در هر لحظه نشان می‌دهد، استفاده کرد. برای رسم این نمودار، زمان را روی محور افقی و مکان را روی محور قائم در نظر می‌گیریم. برای مثال، به حرکت ذره‌ای که در شکل ۱ــ۴ الف نشان داده شده است، توجه کنید. این ذره در لحظهٔ $t_1 = ۰\,\mathrm{s}$ در مکان $x_1 = ۱/۰\,\mathrm{m}$، در لحظهٔ $t_2 = ۱/۰\,\mathrm{s}$ در مکان $x_2 = ۳/۰\,\mathrm{m}$ قرار دارد و به همین ترتیب در لحظه‌های دیگر در مکان‌های دیگر. اگر بخواهیم نمودار مکان ــ زمان حرکت این ذره را رسم کنیم، ابتدا هر یک از زمان‌ها و مکان‌های داده شده است، در صفحهٔ tــx مشخص می‌کنیم و با وصل کردن این نقاط به هم، به وسیلهٔ یک منحنی (خم) هموار، نمودار مکان ــ زمان را همانند شکل ۱ــ۴ــ ب رسم می‌کنیم.



شکل ۱ــ۴ الف) مسیر حرکت ذره در امتداد محور x. ب) نمودار مکان ــ زمان متحرک

مثال ۱ــ۳

شکل روبه‌رو نمودار مکان ــ زمان موربه‌ای را نشان می‌دهد که در راستای محور x در حرکت است.



الف) در کدام بازهٔ زمانی موربه در جهت محور x حرکت می‌کند؟

ب) در کدام بازهٔ زمانی موربه در خلاف جهت محور x حرکت می‌کند؟

پ) در کدام بازه‌های زمانی موربه ایستاده است؟

ت) در کدام لحظه‌هایی فاصلهٔ موربه از مبدأ $۳۰\,\mathrm{cm}$ است؟

ث) در کدام بازهٔ زمانی فاصلهٔ موربه از مبدأ محور بیشترین مقدار است؟

ج) جابه‌جایی و سرعت متوسط موربه را در بازهٔ زمانی $۴/۰\,\mathrm{s}$ تا $۸/۰\,\mathrm{s}$ پیدا کنید.

پاسخ : الف) در بازهٔ زمانی $t = ۰/۰\,\mathrm{s}$ تا $t = ۸/۰\,\mathrm{s}$، زیرا در این بازه، x همواره در حال افزایش است.

ب) در بازهٔ زمانی $t = ۱۲/۰\,\mathrm{s}$ تا $t = ۱۴/۰\,\mathrm{s}$، زیرا در این بازه، x همواره در حال کاهش است.

پ) در بازه‌های زمانی $t = ۸/۰\,\mathrm{s}$ تا $t = ۱۲/۰\,\mathrm{s}$ و $t = ۱۴/۰\,\mathrm{s}$ تا $t = ۱۸/۰\,\mathrm{s}$

ت) در لحظه‌های $t = ۶/۰\,\mathrm{s}$ و $t = ۱۳/۰\,\mathrm{s}$

ث) در بازهٔ زمانی $t = ۸/۰\,\mathrm{s}$ تا $t = ۱۲/۰\,\mathrm{s}$

ج)

$$\Delta x = x_2 - x_1 = ۴۰\,\mathrm{cm} - ۲۰\,\mathrm{cm} = ۲۰\,\mathrm{cm}$$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{۲۰\,\mathrm{cm}}{۸/۰\,\mathrm{s} - ۴/۰\,\mathrm{s}} = ۵/۰\,\mathrm{cm/s}$$

علامت مثبت نشان می‌دهد که موربه در جهت مثبت محور x جابه‌جا شده است.

تعیین سرعت متوسط به کمک نمودار مکان ــ زمان

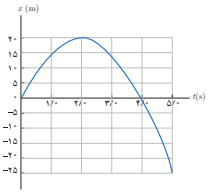
اگر در هر بازهٔ زمانی دلخواه دیگری نیز سرعت متوسط موتورسوار را حساب کنید، خواهید دید که همین مقدار برای آن به‌دست می‌آید. از آنجا که شیب نمودار مکان ــ زمان برای هر بازهٔ زمانی دلخواه برابر سرعت متوسط متحرک است، با توجه به ثابت بودن شیب نمودار مکان ــ زمان موتورسوار در طول حرکت، چنین انتظاری می‌رفت.

مثال ۱ــ۶

شکل روبه‌رو، نمودار مکان ــ زمان خودرویی را نشان می‌دهد که روی خط راست حرکت می‌کند.

الف) با استفاده از داده‌های روی شکل، سرعت متوسط خودرو را در هر یک از بازه‌های زمانی ۰/۰s تا ۲/۰s، ۲/۰s تا ۴/۰s، ۴/۰s تا ۵/۰s، ۲/۰s تا ۴/۰s، ۵/۰s تا ۴/۰s حساب کنید.

ب) در کدام یک از این بازه‌های زمانی، سرعت متوسط در جهت محور x و در کدام یک در خلاف جهت محور x است؟



پاسخ : الف) با توجه به داده‌های روی نمودار و بنا به رابطهٔ ۱ــ۳، سرعت متوسط خودرو برای هر یک از بازه‌های زمانی خواسته شده، برابر است با :

بازهٔ زمانی ۰/۰s تا ۲/۰s
$$v_{av}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{۲۰\,\mathrm{m}-۰\,\mathrm{m}}{۲/۰\,\mathrm{s}-۰/۰\,\mathrm{s}}=۱۰\,\mathrm{m/s}$$

بازهٔ زمانی ۰/۰s تا ۴/۰s
$$v_{av}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{۰\,\mathrm{m}-۰\,\mathrm{m}}{۴/۰\,\mathrm{s}-۰/۰\,\mathrm{s}}=۰\,\mathrm{m/s}$$

بازهٔ زمانی ۲/۰s تا ۴/۰s
$$v_{av}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{۰\,\mathrm{m}-۲۰\,\mathrm{m}}{۴/۰\,\mathrm{s}-۲/۰\,\mathrm{s}}=-۱۰\,\mathrm{m/s}$$

بازهٔ زمانی ۲/۰s تا ۵/۰s
$$v_{av}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{-۲۵\,\mathrm{m}-۲۰\,\mathrm{m}}{۵/۰\,\mathrm{s}-۲/۰\,\mathrm{s}}=-۱۵\,\mathrm{m/s}$$

بازهٔ زمانی ۴/۰s تا ۵/۰s
$$v_{av}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{-۲۵\,\mathrm{m}-۰\,\mathrm{m}}{۵/۰\,\mathrm{s}-۴/۰\,\mathrm{s}}=-۲۵\,\mathrm{m/s}$$

ب) در بازه‌های زمانی‌ای که سرعت متوسط خودرو مثبت است، سرعت متوسط خودرو در جهت محور x و در بازه‌های زمانی‌ای که سرعت متوسط منفی است، سرعت متوسط خودرو در خلاف جهت محور x است.

پرسش ۱ــ۳

با توجه به نمودار مکان ــ زمان شکل روبه‌رو به پرسش‌های زیر پاسخ دهید :

الف) متحرک چند بار از مبدأ مکان عبور می‌کند؟

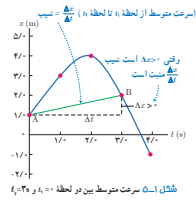
ب) در کدام بازه‌های زمانی متحرک در حال دور شدن از مبدأ است؟

پ) در کدام بازه‌های زمانی متحرک در حال نزدیک شدن به مبدأ است؟

ت) جهت حرکت چند بار تغییر کرده است؟ در چه لحظه‌هایی؟

ث) جابه‌جایی کل در جهت محور x است یا خلاف آن؟

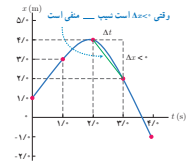
تعیین سرعت متوسط به کمک نمودار مکان ــ زمان : دوباره به نمودار شکل ۱ــ۴ که پاره‌خط بین دو نقطهٔ دلخواه آن مطابق شکل ۱ــ۵ رسم شده است توجه کنید. همان‌طور که از درس ریاضی می‌دانید نسبت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ برابر شیب پاره‌خطی است که دو نقطهٔ A و B را به هم وصل می‌کند. از سوی دیگر با توجه به رابطهٔ ۱ــ۳ می‌دانیم که این نسبت برابر سرعت متوسط متحرک در بازهٔ زمانی t_1 تا t_2 است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که سرعت متوسط متحرک بین دو لحظه از زمان برابر شیب پاره‌خطی است که نقاط نظیر آن دو لحظه در نمودار مکان ــ زمان را به یکدیگر وصل می‌کند.



شکل ۱ــ۵ سرعت متوسط بین دو لحظهٔ $t_1=۰$ و $t_2=۳۰$

مثال ۱ــ۴

با توجه به نمودار مکان ــ زمان شکل ۱ــ۴، سرعت متوسط ذره را در بازهٔ زمانی $t_1=۲/۰\,\mathrm{s}$ تا $t_2=۳/۰\,\mathrm{s}$ به‌دست آورید.



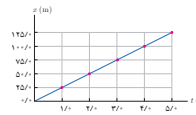
پاسخ : از رابطهٔ ۱ــ۴ داریم :

$$v_{av}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{۲/۰\,\mathrm{m}-۴/۰\,\mathrm{m}}{۳/۰\,\mathrm{s}-۲/۰\,\mathrm{s}}=-۲/۰\,\mathrm{m/s}$$

علامت منفی v_{av} نشان می‌دهد که شیب خط واصل بین این دو نقطه از نمودار مکان ــ زمان، منفی است. توجه کنید که بدون محاسبهٔ v_{av} نیز، با توجه به فهم هندسی‌ای که از منفی بودن شیب خط واصل دو نقطهٔ نمودار داریم، می‌توانستیم به منفی بودن v_{av} پی ببریم.

مثال ۱ــ۵

نمودار مکان ــ زمان موتورسواری که بر خط راست حرکت می‌کند مطابق شکل روبه‌رو است. سرعت متوسط موتورسوار را در هر یک از بازه‌های زمانی ۰/۰s تا ۱/۰s، ۱/۰s تا ۲/۰s، ۲/۰s تا ۴/۰s، ۱/۰s تا ۵/۰s محاسبه کنید. نتایج به‌دست آمده را با هم مقایسه و تفسیر کنید.



پاسخ : با توجه به داده‌های روی نمودار و بنا به رابطهٔ ۱ــ۴، سرعت متوسط موتورسوار، برای هر یک از بازه‌های زمانی خواسته شده، برابر است با :

بازهٔ زمانی ۰/۰s تا ۱/۰s
$$v_{av}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{۲۵/۰\,\mathrm{m}-۰/۰\,\mathrm{m}}{۱/۰\,\mathrm{s}-۰/۰\,\mathrm{s}}=۲۵\,\mathrm{m/s}$$

بازهٔ زمانی ۲/۰s تا ۴/۰s
$$v_{av}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{۱۰۰/۰\,\mathrm{m}-۵۰/۰\,\mathrm{m}}{۴/۰\,\mathrm{s}-۲/۰\,\mathrm{s}}=۲۵\,\mathrm{m/s}$$

بازهٔ زمانی ۱/۰s تا ۵/۰s
$$v_{av}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{۱۲۵/۰\,\mathrm{m}-۲۵/۰\,\mathrm{m}}{۵/۰\,\mathrm{s}-۱/۰\,\mathrm{s}}=۲۵\,\mathrm{m/s}$$

پرسش ۱ــ۳

الف) دوبار و در لحظه‌های t_2 و t_4.

ب) در بازه‌های صفر تا t_1 ، t_2 تا t_3، t_4 تا t_6.

پ) در بازه‌های t_1 تا t_2 ، t_3 تا t_4.

ت) دوبار و در لحظه‌های t_1 و t_3

ث) در جهت محور x (توجه کنید که Δx مربوط به لحظهٔ $t=۰$ تا لحظهٔ $t=t_6$، مثبت است).

تمرین ۱ـ۲

الف) در لحظهٔ $t = 8s$

ب) در بازه‌های صفر تا ۴s و همچنین ۶s تا ۸s.

پ) در بازهٔ ۸s تا ۱۴s.

ت) در بازهٔ ۴s تا ۶s.

ث) برای تندی متوسط از رابطه ۱ـ۱ و برای سرعت متوسط باید از رابطهٔ ۱ـ۴ استفاده کنند. هنگام محاسبه سرعت متوسط توجه به علامت جبری آن برای تعیین جهت حرکت الزامی است.

در بازهٔ صفر تا ۲/۰s

$$s_{av} = \frac{l}{\Delta t} = \frac{۲۰\text{m}}{۲/۰\text{s}} = ۱۰\text{m/s}$$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{۲۰\text{m} - ۰}{۲/۰\text{s}} = ۱۰\text{m/s}$$

دوچرخه‌سوار در این بازهٔ زمانی در جهت محور x حرکت کرده است.

در بازهٔ ۸/۰s تا ۱۴/۰s

$$s_{av} = \frac{l}{\Delta t} = \frac{۶۰\text{m}}{۶/۰\text{s}} = ۱۰\text{m/s}$$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{۰ - ۶۰\text{m}}{۶/۰\text{s}} = -۱۰\text{m/s}$$

دوچرخه‌سوار در این بازه‌ها زمانی در خلاف جهت محور x حرکت کرده است.

در بازهٔ صفر تا ۱۴/۰s

$$s_{av} = \frac{l}{\Delta t} = \frac{۱۲۰\text{m}}{۱۴/۰s} \simeq ۸\text{m/s}$$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{۰ - ۰\text{m}}{۱۴/۰\text{s}} = ۰$$

فصل ۱: حرکت بر خط راست

تمرین ۱ـ۲

شکل روبه‌رو نمودار مکان ــ زمان دوچرخه‌سواری را نشان می‌دهد که روی مسیری مستقیم در حال حرکت است.

الف) در کدام لحظه‌ای دوچرخه‌سوار بیشترین فاصله از مبدأ را دارد؟

ب) در کدام بازه‌های زمانی دوچرخه‌سوار در جهت محور x حرکت می‌کند؟

پ) در کدام بازهٔ زمانی دوچرخه‌سوار در خلاف جهت محور x حرکت می‌کند؟

ت) در کدام بازهٔ زمانی، دوچرخه‌سوار ساکن است؟

ث) تندی متوسط و سرعت متوسط دوچرخه‌سوار را در هر یک از بازه‌های زمانی ۰/۰s تا ۲/۰s، ۲/۰s تا ۶/۰s، ۶/۰s تا ۸/۰s، ۸/۰s تا ۱۴/۰s، ۱۴/۰s تا ۰/۰s حساب کنید.

تندی لحظه‌ای و سرعت لحظه‌ای: تندی متحرک در هر لحظه از زمان را تندی لحظه‌ای می‌نامند. اگر هنگام گزارش تندی لحظه‌ای، به جهت حرکت متحرک نیز اشاره نشود، در واقع سرعت لحظه‌ای ($\vec{v}$) آن را، که کمیتی برداری است بیان کرده‌ایم. برای مثال وقتی درون خودرویی به طرف شمال در حال حرکت باشید و در نقطه‌ای از مسیر، عقربهٔ تندی‌سنج خودروی شما روی ۱۰۰km/h باشد (شکل ۱ـ۶)، تندی لحظه‌ای خودرو برابر ۱۰۰km/h و سرعت لحظه‌ای آن ۱۰۰km/h به‌طرف شمال است. برای سادگی، بیشتر وقت‌ها سرعت لحظه‌ای و تندی لحظه‌ای را به‌ترتیب به‌صورت سرعت و تندی بیان می‌کنند. از آنجا که در ادامهٔ این فصل تنها حرکت اجسام بر خط راست بررسی می‌شود، سرعت لحظه‌ای متحرک را در حل مسئله‌ها به‌جای بردار $\vec{v}$ به‌صورت «v» به کار می‌بریم. هر گاه متحرک در جهت مثبت محور «x» حرکت کند «v» مثبت است و هر گاه در جهت منفی محور حرکت کند «v» منفی است.

پرسش ۱ـ۳

از روی نمودار مکان ــ زمان توضیح دهید در چه صورت سرعت لحظه‌ای متحرک همواره با سرعت متوسط آن برابر است.

تعیین سرعت لحظه‌ای به کمک نمودار مکان ــ زمان: پیش از این دیدیم که سرعت متوسط متحرک بین هر دو لحظهٔ دلخواه، برابر شیب خطی است که نمودار مکان ــ زمان را در آن دو لحظه قطع می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱ـ۷ دیده می‌شود اگر Δt به‌تدریج کوچک و کوچک‌تر شود، نقطهٔ B به نقطهٔ A نزدیک و نزدیک‌تر می‌شود؛ به‌طوری که اگر Δt به سمت صفر میل کند ($\Delta t \to ۰$) نقطهٔ B به نقطهٔ A بسیار نزدیک می‌شود و سرانجام خط واصل بین این دو نقطه به خط مماس بر نمودار در نقطهٔ A میل می‌کند. در این حالت، شیب خط مماس برابر سرعت متحرک در لحظهٔ t_1 است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که: سرعت در هر لحظهٔ دلخواه، برابر شیب خط مماس بر نمودار مکان ــ زمان در آن لحظه است.

شکل ۱ـ۶ عقربهٔ تندی‌سنج، تندی لحظه‌ای خودرو را نشان می‌دهد و هیچ گونه اطلاعی در خصوص جهت حرکت خودرو به ما گزارش نمی‌کند.

توجه: واژهٔ لحظه در فیزیک با کاربرد محاوره‌ای آن در زندگی روزمره متفاوت است. همه ما ممکن است عبارت «لطفاً کمی صبر کن، تنها یک لحظه طول می‌کشد» را در موارد زیادی به کار ببریم که منظور یک بازهٔ زمانی کوتاه، مثلاً چند ثانیه یا چند دقیقه است. ولی در فیزیک یک لحظه به هیچ وجه طول نمی‌کشد؛ لحظه به یک تک‌مقدار از زمان اشاره دارد.

شکل ۱ـ۷ با کوچک شدن تدریجی Δt، نقطهٔ B به نقطهٔ A نزدیک می‌شود. در این صورت خط واصل بین این دو نقطه، در حالتی که بازهٔ زمانی Δt خیلی خیلی کوچک شود، به خط مماس بر منحنی در نقطهٔ A میل می‌کند. به این ترتیب شیب این خط، برابر با سرعت متحرک در لحظهٔ t_1 است.

تندی لحظه‌ای و سرعت لحظه‌ای

راهنمای تدریس : هرچند دانش‌آموزان با این کمیت‌ها در علوم سال نهم آشنا شده‌اند، در اینجا لازم است مجدداً توجه آنها را به تفاوت این دو کمیت جلب کنید. اندازهٔ سرعت لحظه‌ای که کمیتی برداری است، همواره با تندی لحظه‌ای برابر است. ذکر مثال‌هایی مشابه مثال داده شده در کتاب می‌تواند مفید باشد.

توجه

بیان «تندی لحظه‌ای» به‌صورت «تندی» و همچنین بیان «سرعت لحظه‌ای» به‌صورت «سرعت» یک قراردادی برای اختصارنویسی است که در تمامی کتاب‌های درسی فیزیک رعایت می‌شود. همان‌طور که در کتاب درسی نیز آمده است سرعت را با $\vec{v}$ نشان می‌دهیم. از آنجا که اندازهٔ سرعت برابر تندی است لذا تندی را با $|\vec{v}|$ یا v می‌توان نشان داد. از آنجا که در ادامهٔ فصل، حرکت بر خط راست بررسی می‌شود و با علامت‌های جبری کمیت‌ها سروکار داریم (به‌جای برداری نوشتن کمیت‌ها)، لذا باید توجه شود که بخش‌های حرکت با سرعت ثابت و حرکت با شتاب ثابت، نماد v نشان‌دهندهٔ سرعت است که توجه به علامت جبری آن اهمیت دارد. به همین دلیل در کتاب درسی اشارهٔ مستقیمی به نماد تندی نشده است.

پرسش ۱ـ۴

در پاسخ به این پرسش دانش‌آموزان می‌توانند به نتیجه مثال ۱ـ۵ توجه کنند. از این مثال برای بررسی حرکت با سرعت ثابت، در بخش بعدی نیز استفاده شده است.

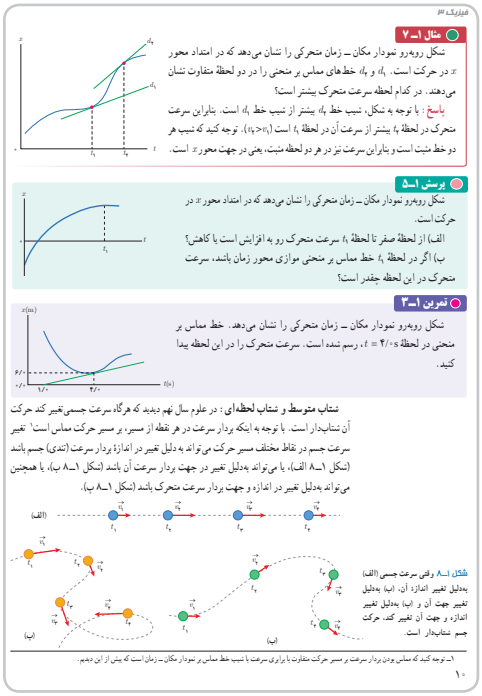
تعیین سرعت لحظه‌ای به کمک نمودار مکان ــ زمان

راهنمای تدریس : مفهوم سرعت لحظه‌ای به کمک نمودار و بدون توجه به مفهوم مشتق آمده است. لذا همکاران نیز باید مطابق روشی که در کتاب درسی اشاره شده است این بحث را در آموزش خود دنبال کنند. در ادامه نیز مثال ۱ـ۷ آمده است تا سرعت لحظه‌ای متحرکی را با توجه به نمودار مکان ــ زمان برای دو لحظهٔ دلخواه با یکدیگر مقایسه کند. بررسی مثال‌های دیگری مشابه این مثال، می‌تواند درک بهتری برای دانش‌آموزان فراهم کند.

پرسش ۱ـ۵

الف) با توجه به شیب خط مماس بر نمودار در لحظه‌های مختلف و مقایسه آنها با یکدیگر، دانش‌آموزان به سادگی می‌توانند به تغییرات سرعت متحرک پی‌ببرند. در اینجا سرعت متحرک از لحظهٔ شروع حرکت $t=0$ تا لحظهٔ $t=t_1$، شیب نمودار به تدریج کاهش می‌یابد. به این ترتیب، سرعت متحرک روبه کاهش است.

ب) چون شیب نمودار صفر است (خط مماس بر منحنی در این لحظه موازی محور زمان است)، لذا سرعت متحرک صفر است.



فیزیک ۳

مثال ۱ـ۷

شکل روبه‌رو نمودار مکان ـ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x در حرکت است. t_1 و t_2 خط‌های مماس بر منحنی را در دو لحظهٔ متفاوت نشان می‌دهند. در کدام لحظه سرعت متحرک بیشتر است؟

پاسخ: با توجه به شکل، شیب خط t_2 بیشتر از شیب خط t_1 است. بنابراین سرعت متحرک در لحظهٔ t_2 بیشتر از سرعت آن در لحظهٔ t_1 است ($v_2>v_1$). توجه کنید که شیب هر دو خط مثبت است و بنابراین سرعت نیز در هر دو لحظه مثبت، یعنی در جهت محور x است.

پرسش ۱ـ۵

شکل روبه‌رو نمودار مکان ـ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x در حرکت است.

الف) از لحظهٔ صفر تا لحظهٔ t_1 سرعت متحرک رو به افزایش است یا کاهش؟

ب) اگر در لحظهٔ t_1 خط مماس بر منحنی موازی محور زمان باشد، سرعت متحرک در این لحظه چقدر است؟

تمرین ۱ـ۳

شکل روبه‌رو نمودار مکان ـ زمان متحرکی را نشان می‌دهد. خط مماس بر منحنی در لحظهٔ $t=4/0\,s$ رسم شده است. سرعت متحرک را در این لحظه پیدا کنید.

شتاب متوسط و شتاب لحظه‌ای: در علوم سال نهم دیدید که هرگاه سرعت جسمی تغییر کند حرکت آن شتاب‌دار است. با توجه به اینکه بردار سرعت در هر نقطه از مسیر، بر مسیر حرکت مماس است[1] تغییر سرعت جسم در نقاط مختلف مسیر حرکت می‌تواند به دلیل تغییر در اندازهٔ بردار سرعت (تندی) جسم باشد (شکل ۱ـ۸ الف)، یا می‌تواند به‌دلیل تغییر در جهت بردار سرعت آن باشد (شکل ۱ـ۸ ب)، یا همچنین می‌تواند به‌دلیل تغییر در اندازه و جهت بردار سرعت متحرک باشد (شکل ۱ـ۸ پ).

(الف)

(ب)

(پ)

شکل ۱ـ۸ وقتی سرعت جسمی (الف) به‌دلیل تغییر اندازه آن، (ب) به‌دلیل تغییر جهت آن و (پ) به‌دلیل تغییر اندازه و جهت آن تغییر کند، حرکت جسم شتاب‌دار است.

۱ـ توجه کنید که مماس بودن بردار سرعت بر مسیر حرکت متفاوت با برابری سرعت با شیب خط مماس بر نمودار مکان ـ زمان است که پیش از این دیدیم.

۱۰

تمرین ۱ـ۲

دانش‌آموزان با توجه به نحوهٔ محاسبهٔ شیب خط در صفحه، که در درس ریاضی خود فراگرفته‌اند، به سادگی می‌توانند شیب خط مماس بر منحنی را در لحظهٔ $t=4/0\,s$ پیدا کنند.

$$\text{سرعت متحرک} = \frac{6/0\,m}{3/0\,s} = 2/0\,m/s$$

شتاب متوسط و شتاب لحظه‌ای

راهنمای تدریس: مشابه مبحث سرعت متوسط و سرعت لحظه‌ای، در اینجا نیز شتاب متوسط ابتدا برای حالت کلی تعریف شده است و سپس با حل یک مثال برداری بر خط راست، موضوع دنبال شده است. در ادامه چون صرفاً حرکت بر خط راست بررسی می‌شود. با کنار گذاشتن نمادگذاری برداری، با توجه به **علامت‌های جبری** سرعت در لحظه‌های مختلف، می‌توان شتاب متوسط را در هر دو لحظهٔ دلخواه محاسبه کرد. در این صورت مثبت شدن نتیجه، نشان می‌دهد شتاب متوسط مثبت و جهت آن روبه مثبت محور است.

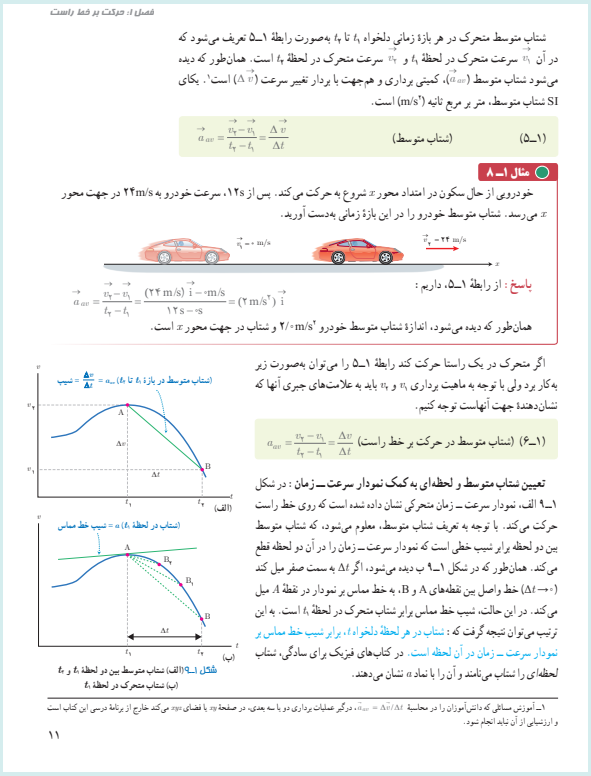
توجه

دانش‌آموزان هنگام جای‌گذاری سرعت در دو لحظهٔ مختلف در رابطهٔ ۱ـ۶، باید به علامت جبری سرعت‌ها الزاماً توجه کنند.

تعیین شتاب متوسط و لحظه‌ای به کمک نمودار سرعت زمان

راهنمای تدریس: در این قسمت نیز چون شتاب لحظه‌ای یا به اختصار شتاب، بدون توجه به مفهوم مشتق بیان شده است لذا همکاران باید مطابق روشی که در کتاب درسی به این موضوع پرداخته شده است، و تنها با توجه به شیب خط مماس بر منحنی سرعت ــ زمان، به مفهوم شتاب لحظه‌ای بپردازند. بررسی مثال‌ها و مسائلی که دانش‌آموزان را در به‌دست آوردن شتاب لحظه‌ای درگیر فرایند مشتق‌گیری از معادله‌های سرعت ــ زمان، یا مکان ــ زمان می‌کند خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است و در تمامی ارزشیابی‌های رسمی نیز مورد توجه نخواهد بود.

توجه به مثال ۱ــ۹ و نتیجه آن اهمیت دارد. زیرا در بخش حرکت با شتاب ثابت، از نتیجهٔ این مثال برای بررسی این نوع حرکت استفاده شده است.



فصل ۱: حرکت بر خط راست

شتاب متوسط متحرک در هر بازهٔ زمانی دلخواه t_1 تا t_2 به‌صورت رابطهٔ ۱ــ۵ تعریف می‌شود که در آن $\vec{v}_1$ سرعت متحرک در لحظهٔ t_1 و $\vec{v}_2$ سرعت متحرک در لحظهٔ t_2 است. همان‌طور که دیده می‌شود شتاب متوسط ($\vec{a}_{av}$)، کمیتی برداری و هم‌جهت با بردار تغییر سرعت ($\Delta\vec{v}$) است[1]. یکای SI شتاب متوسط، متر بر مربع ثانیه (m/s^2) است.

$$\vec{a}_{av} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \qquad (۱ــ۵) \quad \text{(شتاب متوسط)}$$

مثال ۱ــ۸

خودرویی از حال سکون در امتداد محور x شروع به حرکت می‌کند. پس از ۱۲s، سرعت خودرو به ۲۴m/s در جهت محور x می‌رسد. شتاب متوسط خودرو را در این بازهٔ زمانی به‌دست آورید.

پاسخ: از رابطهٔ ۱ــ۵، داریم:

$$\vec{a}_{av} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = \frac{(۲۴\,m/s)\,\vec{i} - ۰m/s}{۱۲s - ۰s} = (۲\,m/s^2)\,\vec{i}$$

همان‌طور که دیده می‌شود، اندازهٔ شتاب متوسط خودرو ۲/۰m/s^2 و شتاب در جهت محور x است.

اگر متحرک در یک راستا حرکت کند رابطهٔ ۱ــ۵ را می‌توان به‌صورت زیر به‌کار برد ولی با توجه به ماهیت برداری v_1 و v_2 باید به علامت‌های جبری آنها که نشان‌دهندهٔ جهت آنهاست توجه کنیم.

$$a_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \qquad (۱ــ۶) \quad \text{(شتاب متوسط در حرکت بر خط راست)}$$

شکل ۱ــ۹ (الف) شتاب متوسط بین دو لحظهٔ t_1 و t_2 (ب) شتاب متحرک در لحظهٔ t_1

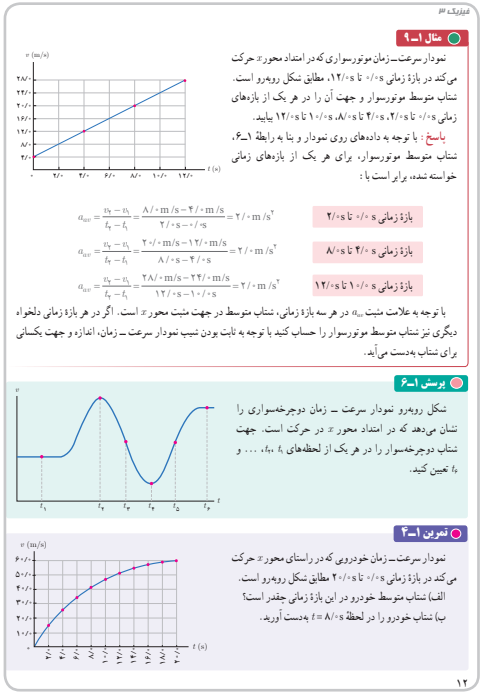
تعیین شتاب متوسط و لحظه‌ای به کمک نمودار سرعت ــ زمان: در شکل ۱ــ۹ الف، نمودار سرعت ــ زمان متحرکی نشان داده شده است که روی خط راست حرکت می‌کند. با توجه به تعریف شتاب متوسط، معلوم می‌شود، که شتاب متوسط بین دو لحظه برابر شیب خطی است که نمودار سرعت ــ زمان را در آن دو لحظه قطع می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱ــ۹ ب دیده می‌شود، اگر Δt به سمت صفر میل کند ($\Delta t \to 0$) خط واصل بین نقطه‌های A و B، به خط مماس بر نمودار در نقطهٔ A میل می‌کند. در این حالت، شیب خط مماس برابر شتاب متحرک در لحظهٔ t_1 است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که: شتاب در هر لحظهٔ دلخواه، برابر شیب خط مماس بر نمودار سرعت ــ زمان در آن لحظه است. در کتاب‌های فیزیک برای سادگی، شتاب لحظه‌ای را شتاب می‌نامند و آن را با نماد a نشان می‌دهند.

۱ــ آموزش مسائلی که دانش‌آموزان را در محاسبهٔ $\vec{a}_{av} = \Delta\vec{v}/\Delta t$، درگیر عملیات برداری دو یا سه بعدی، در صفحهٔ ۷۶ یا فضای ۳بعد می‌کند خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

۱۱

پرسش ۱ــ۶

در این پرسش دانش‌آموزان باید در لحظه‌های خواسته شده، خطی بر منحنی سرعت ــ زمان مماس کنند و با توجه به مثبت یا منفی بودن شیب (که به مفهوم شتاب لحظه‌ای مربوط است)، جهت شتاب دوچرخه‌سوار را تعیین کنند.



فیزیک ۳

مثال ۱ــ۹

نمودار سرعت ــ زمان موتورسواری که در امتداد محور x حرکت می‌کند در بازهٔ زمانی ۰/۰s تا ۱۲/۰s، مطابق شکل روبه‌رو است. شتاب متوسط موتورسوار و جهت آن را در هر یک از بازه‌های زمانی ۰/۰s تا ۲/۰s، ۲/۰s تا ۴/۰s، ۸/۰s تا ۱۰/۰s و ۱۰/۰s تا ۱۲/۰s بیابید.

پاسخ: با توجه به داده‌های روی نمودار و بنا به رابطهٔ ۱ــ۶، شتاب متوسط موتورسوار، برای هر یک از بازه‌های زمانی خواسته شده، برابر است با:

بازهٔ زمانی ۰/۰s تا ۲/۰s: $a_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{۸/۰\,m/s - ۴/۰\,m/s}{۲/۰s - ۰/۰s} = ۲/۰\,m/s^2$

بازهٔ زمانی ۴/۰s تا ۸/۰s: $a_{av} = \frac{۲۰/۰\,m/s - ۱۲/۰\,m/s}{۸/۰s - ۴/۰s} = ۲/۰\,m/s^2$

بازهٔ زمانی ۱۰/۰s تا ۱۲/۰s: $a_{av} = \frac{۲۸/۰\,m/s - ۲۴/۰\,m/s}{۱۲/۰s - ۱۰/۰s} = ۲/۰\,m/s^2$

با توجه به علامت مثبت a_{av} در هر سه بازهٔ زمانی، شتاب متوسط در جهت مثبت محور x است. اگر در هر بازهٔ زمانی دلخواه دیگری نیز شتاب متوسط موتورسوار را حساب کنید با توجه به ثابت بودن شیب نمودار سرعت ــ زمان، اندازه و جهت یکسانی برای شتاب به‌دست می‌آید.

پرسش ۱ــ۶

شکل روبه‌رو نمودار سرعت ــ زمان دوچرخه‌سواری را نشان می‌دهد که در امتداد محور x در حرکت است. جهت شتاب دوچرخه‌سوار را در هر یک از لحظه‌های t_1، t_2، ... و t_6 تعیین کنید.

تمرین ۱ــ۳

نمودار سرعت ــ زمان خودرویی که در راستای محور x حرکت می‌کند در بازهٔ زمانی ۰/۰s تا ۲۰/۰s مطابق شکل روبه‌رو است.

الف) شتاب متوسط خودرو در این بازهٔ زمانی چقدر است؟

ب) شتاب خودرو را در لحظهٔ $t = ۸/۰s$ به‌دست آورید.

۱۲

تمرین ۱ـ۴

الف) به سادگی می‌توان به کمک رابطهٔ ۱ـ۶ شتاب متوسط خودرو را در این بازهٔ زمانی به‌دست آورد.

ب) به کمک خط‌کش و با رسم خط مماس بر منحنی سرعت ـ زمان در لحظهٔ $t = ۸/۰\,s$ می‌توان مقدار تقریبی شتاب خودرو را در این لحظه به‌دست آورد. ممکن است دانش‌آموزان هنگام رسم خط بر منحنی و محل برخورد این خط مماس با محور سرعت، مقادیر فیزیکی متفاوت و نزدیک به هم را حدس بزنند که در اینجا اهمیت ندارد. با محاسبهٔ شیب خط مماس، شتاب در این لحظه تقریباً برابر است با :

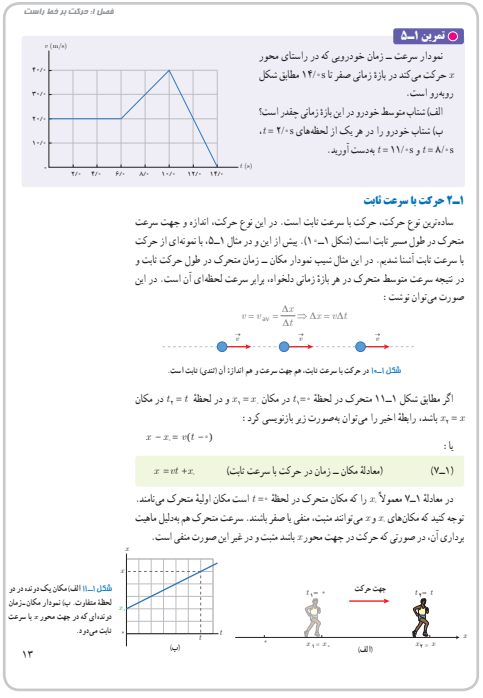
$$(\text{شتاب (در لحظهٔ } t = ۸/۰\,s) \simeq \frac{(۳۴/۰ - ۱۸/۰)\,m/s}{۸/۰\,s} = ۲/۰\,m/s^۲$$

تمرین ۱ـ۵

دانش‌آموزان باید توجه کنند وقتی متحرکی دارای چندین نوع حرکت است، در هر بازهٔ زمانی حرکت‌های آن جداگانه مورد بررسی قرار می گیرد و در لحظه‌هایی که نوع حرکت تغییر می کند (مثلاً لحظهٔ $t = ۶/۰\,s$ و $t = ۱۰/۰\,s$ در این نمودار) هیچ معادله‌ای نمی‌تواند به بررسی تغییر نوع حرکت بپردازد و به‌طور کلی این لحظه‌های خاص در هیچ کتاب درسی مورد بررسی قرار نمی‌گیرند.

الف) از رابطهٔ ۱ـ۶ استفاده شود.

ب) شتاب خودرو در لحظهٔ $t = ۲/۰\,s$ برابر صفر است در لحظهٔ $t = ۸/۰\,s$ برابر $\frac{(۴۰-۲۰)\,m/s}{(۱۰-۶)s} = ۵\,m/s^۲$ و در لحظهٔ $t = ۱۱/۰\,s$ برابر $\frac{(۰-۴۰)\,m/s}{(۱۴-۱۰)s} = -۱۰\,m/s^۲$ است دانش‌آموزان باید توجه کنند که در هریک از بازه‌های $۶/۰\,s$ تا $۱۰/۰\,s$ و همچنین $۱۰/۰\,s$ تا $۱۴/۰\,s$ شتاب خودرو ثابت است.


فصل ۱: حرکت بر خط راست

نمونه ۱ـ۵

نمودار سرعت ـ زمان خودرویی که در راستای محور x حرکت می‌کند در بازهٔ زمانی صفر تا $۱۴/۰\,s$ مطابق شکل روبه‌رو است.

الف) شتاب متوسط خودرو در این بازهٔ زمانی چقدر است؟

ب) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه‌های $t = ۲/۰\,s$، $t = ۸/۰\,s$ و $t = ۱۱/۰\,s$ به‌دست آورید.

۱ـ۲ حرکت با سرعت ثابت

ساده‌ترین نوع حرکت، حرکت با سرعت ثابت است. در این نوع حرکت، اندازه و جهت سرعت متحرک در طول مسیر ثابت است (شکل ۱ـ۱۰). پیش از این و در مثال ۱ـ۵، با نمونه‌ای از حرکت با سرعت ثابت آشنا شدیم. در این مثال شیب نمودار مکان ـ زمان متحرک در طول حرکت ثابت و در نتیجه سرعت متوسط متحرک در هر بازهٔ زمانی دلخواه، برابر سرعت لحظه‌ای آن است. در این صورت می‌توان نوشت :

$$v = v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow \Delta x = v\Delta t$$

شکل ۱ـ۱۰ حرکت با سرعت ثابت، هم جهت سرعت و هم اندازهٔ آن (لندی) ثابت است.

اگر مطابق شکل ۱ـ۱۱ متحرک در لحظهٔ $t_۰ = ۰$ در مکان $x_۰$ و در لحظهٔ t در مکان x باشد، رابطهٔ اخیر را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد :

$$x - x_۰ = v(t - ۰)$$

یا :

$$x = vt + x_۰ \qquad \text{(معادلهٔ مکان ـ زمان در حرکت با سرعت ثابت)} \qquad (۱ـ۷)$$

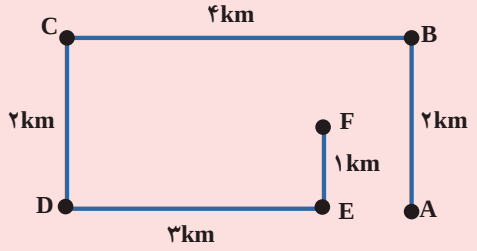
در معادلهٔ ۱ـ۷ معمولاً $x_۰$ را که مکان متحرک در لحظهٔ $t = ۰$ است مکان اولیهٔ متحرک می‌نامند. توجه کنید که مکان‌های $x_۰$ و x می‌توانند مثبت، منفی یا صفر باشند. سرعت متحرک هم به‌دلیل ماهیت برداری آن، در صورتی که حرکت در جهت محور x باشد مثبت و در غیر این صورت منفی است.

شکل ۱ـ۱۱ الف) مکان یک دونده در دو لحظهٔ متفاوت. ب) نمودار مکان ـ زمان دونده‌ای که در جهت محور x با سرعت ثابت می‌دود.

۱۳

تمرین‌های پیشنهادی بخش ۱ــ۱

۱ موتور سواری مطابق شکل زیر حرکت می‌کند و از نقطهٔ A به نقطهٔ F می‌رود.



الف) این موتور سوار چه مسافتی را طی کرده است؟

ب) بردار جابه‌جایی موتورسوار را رسم کنید و اندازهٔ آن را به کمک محاسبه به‌دست آورید.

۲ هنگامی که جسمی روی محور xها در جهت معینی حرکت می‌کند جهت بردار مکان آن

الف) ناگزیر تغییر می‌کند.

ب) ممکن است تغییر کند.

پ) تغییر نمی‌کند.

۳ شخصی می‌خواهد به نقطه‌ای در فاصلهٔ ۵ کیلومتری از محل کنونی خود در جهت جنوب غربی برود، اما باید در امتداد خیابان‌هایی حرکت کند که شمالی ــ جنوبی یا شرقی ــ غربی هستند. کمترین مسافتی که باید این شخص بپیماید تا به مقصد برسد، چقدر است؟ شکل مناسبی از مسئله رسم کنید.

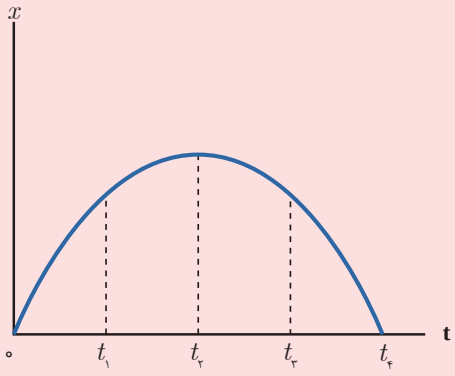
۴ یک کشتی می‌خواهد به نقطه‌ای که ۵۰km به سوی جنوب است برود. توفان غیرمنتظره‌ای کشتی را به نقطه‌ای در فاصلهٔ ۳۰km به طرف جنوب و ۲۰km به طرف غرب نقطهٔ مبدأ می‌راند. کشتی باید چه فاصله‌ای را و در چه جهت بپیماید تا به مقصد اولیهٔ خود برسد؟ شکل مناسبی از مسئله رسم کنید.

۵ دونده‌ای در لحظهٔ $t = ۰$ (مبدأ زمان) در مکان -۱۲m و در لحظهٔ $t = ۴\text{s}$ در مکان $+۲۴\text{m}$ قرار دارد.

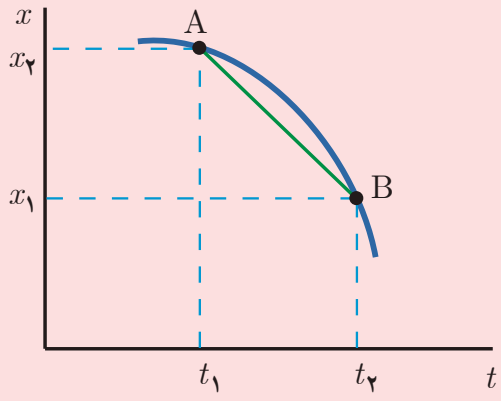
الف) بردارهای مکان دونده را در هر دو لحظه رسم کنید.

ب) بردار جابه‌جایی دونده را رسم و اندازهٔ آن را پیدا کنید.

۶ در کدام‌یک از لحظه‌های نشان داده شده در شکل زیر متحرک بیشترین فاصله را از مبدأ دارد؟



۷ شکل زیر نمودار $x - t$ متحرکی را نشان می‌دهد. شیب خط AB در این نمودار را برحسب کمیت‌های روی محورهای x و t به‌دست آورید و بگویید که مقدار به‌دست آمده نمایندهٔ چه کمیتی است؟

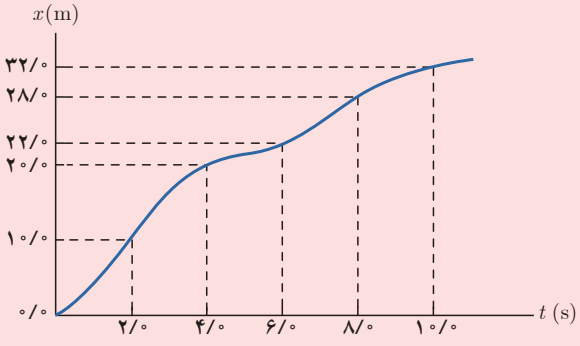


۸ نمودار مکان ــ زمان متحرکی مطابق شکل روبه‌رو است.

الف) در بازه‌های زمانی ۲ ثانیه، جابه‌جایی متحرک را در جدولی بنویسید.

ب) سرعت متوسط متحرک در هریک از بازه‌های زمانی ۲s، و همچنین سرعت متوسط دربازهٔ زمانی ۱۰s چقدر است؟

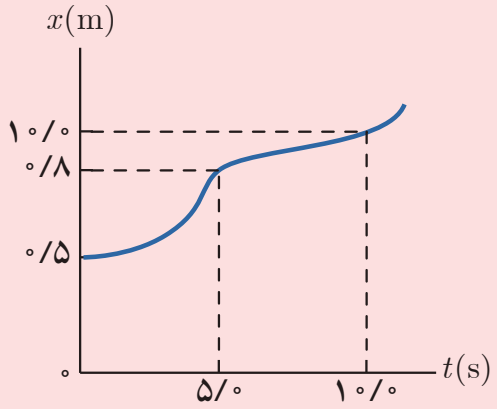
پ) در کدام بازهٔ زمانی سرعت متوسط متحرک بیشینه و در کدام بازه کمینه است؟



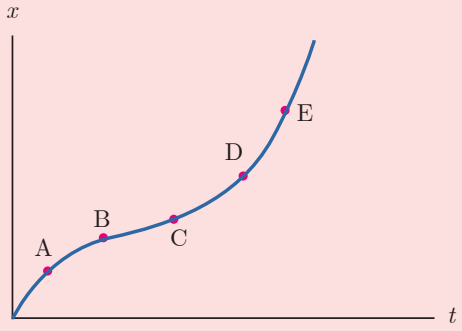
۹ نمودار مکان ــ زمان متحرکی که روی خط راست حرکت می‌کند مطابق شکل روبه‌رو است. نسبت سرعت متوسط متحرک در ۵ ثانیهٔ دوم حرکت به سرعت متوسط آن در ۵ ثانیهٔ اول حرکت کدام است؟

الف) $\frac{۲۵}{۶}$ ب) $\frac{۶}{۲۵}$

پ) $\frac{۳}{۲}$ ت) $\frac{۲}{۳}$

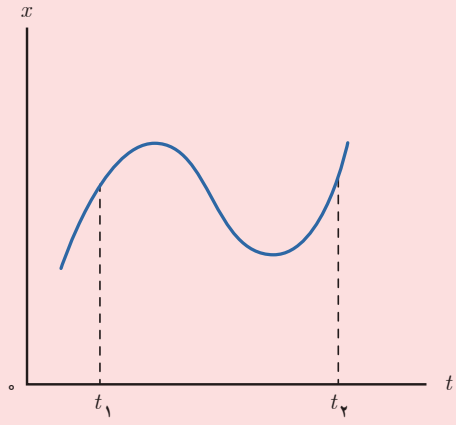


۱۰ نمودار مکان ــ زمان متحرکی مطابق شکل زیر است. سرعت متحرک را در نقطه‌های نشان داده شده روی نمودار با یکدیگر مقایسه کنید.



۱۱ نمودار $x-t$ متحرکی مطابق شکل زیر است. در بازهٔ زمانی t_1 تا t_2 چند مرتبه جهت حرکت جسم تغییر کرده است؟

الف) صفر ب) ۱ پ) ۲ ت) ۳



۱۲ معادلهٔ حرکت جسمی روی خط راست در SI با رابطهٔ $x = 2t^2 - 4t + 1$ بیان می‌شود.

الف) بردار مکان جسم را در لحظه‌های $t = 0$، ۱، ۲، ۳ ثانیه روی محور xها نشان دهید.

ب) نمودار مکان ــ زمان آن را رسم کنید.

پ) سرعت متوسط متحرک را در بازهٔ زمانی $t_1 = 2s$ تا $t_2 = 4s$ به‌دست آورید.

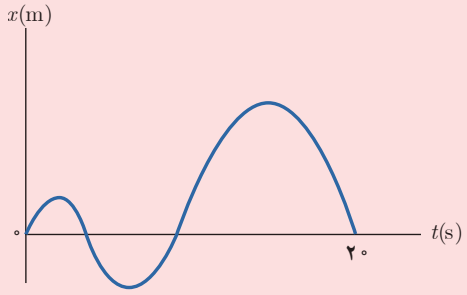
ت) با توجه به نمودار مکان ــ زمان (قسمت ب) تعیین کنید در چه لحظه‌ای سرعت متحرک صفر است؟

۱۳ معادلهٔ مکان ــ زمان ذره‌ای که در امتداد محور x حرکت می‌کند به صورت $x = At^2 - Bt^3$ است، که در آن x برحسب متر و t برحسب ثانیه است.

الف) ضریب‌های A و B در SI چه یکایی دارند؟

ب) اگر مقدارهای A و B در SI به ترتیب ۳ و ۱ باشد، جابه‌جایی و سرعت متوسط ذره در ۴ ثانیهٔ اول حرکت چقدر است؟

۱۴ شکل زیر نمودار مکان ــ زمان ذره‌ای را به مدت ۲۰s نشان می‌دهد که برخط راست حرکت می‌کند. با توجه به این نمودار، در بازهٔ زمانی ۰ تا ۲۰ ثانیه :



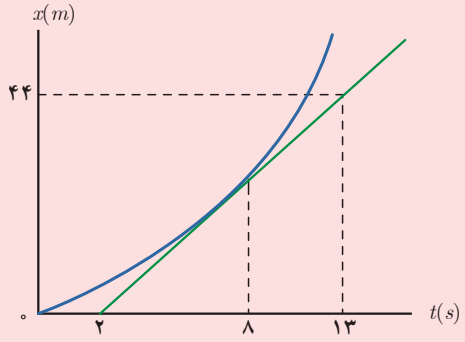
الف) سرعت متوسط ذره مثبت بوده است.

ب) سرعت متوسط ذره منفی بوده است.

پ) سرعت متوسط ذره صفر بوده است.

ت) بدون اطلاع از مقدارهای عددی روی محور x نمی‌توان سرعت متوسط را تعیین کرد.

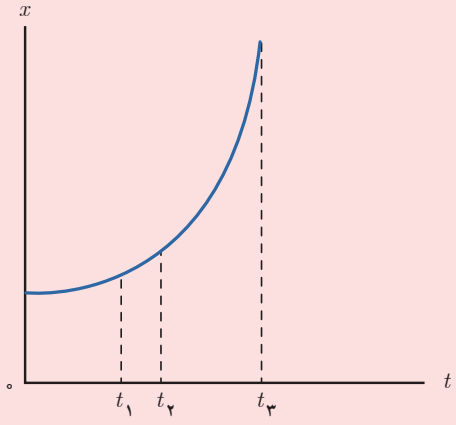
۱۵ با توجه به نمودار مکان ــ زمان متحرکی که در شکل روبه‌رو نشان داده شده است، سرعت لحظه‌ای آن را در $t = 8\,s$ پیدا کنید.



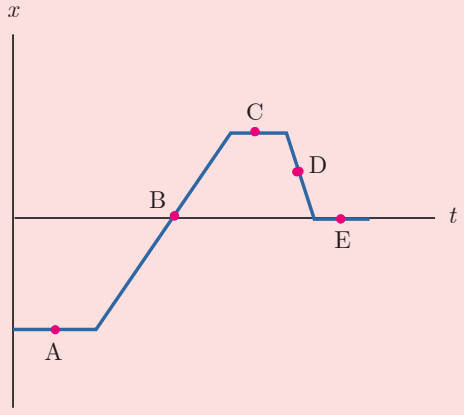
۱۶ نمودار مکان ــ زمان متحرکی به شکل سهمی و مطابق شکل روبه‌رو است. سرعت متوسط متحرک در کدام بازهٔ زمانی بیشتر است؟

الف) ۰ تا t_1 ب) t_1 تا t_2 پ) t_2 تا t_3

ت) به اندازهٔ بازه‌های زمانی بستگی دارد.



۱۷ شکل روبه‌رو نمودار مکان ــ زمان متحرکی را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار جاهای خالی را در جدول صفحه بعد کامل کنید.

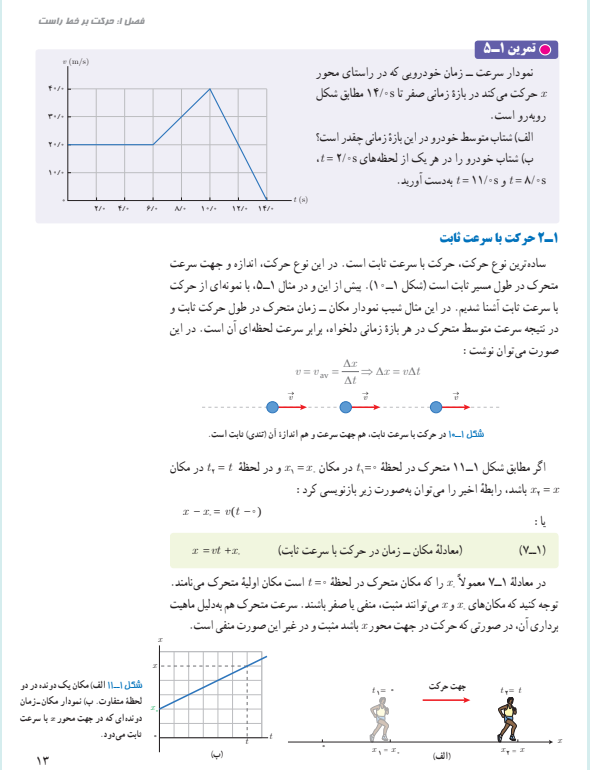


سرعت متحرک کمینه (غیرصفر) است.	نقطه (ها)ی .....
سرعت متحرک بیشینه است.	نقطه (ها)ی .....
جسم ساکن است.	نقطه (ها)ی .....
با سرعت ثابت غیرصفر حرکت می‌کند.	نقطه (ها)ی .....
جسم به طرف چپ حرکت می‌کند.	نقطه (ها)ی .....

۱۸ خودرویی به طرف شمال در حرکت است. آیا ممکن است گاهی جهت شتاب آن به طرف جنوب باشد؟ توضیح دهید.

۱ــ۲ــ حرکت با سرعت ثابت

راهنمای تدریس : پیش از این و در مثال ۱ــ۵، دانش‌آموزان با حرکتی که در آن سرعت متوسط متحرک با سرعت لحظه‌ای آن در طول حرکت یکسان است آشنا شده‌اند. ضمن توجه دوباره دانش‌آموزان به این مثال، همچنین با توجه به شکل ۱ــ۱۰، معادله ۱ــ۷ را برای دانش‌آموزان به‌دست آورید و به بررسی بیشتر این حرکت بپردازید.



فصل ۱: حرکت بر خط راست

تمرین ۱ــ۵

نمودار سرعت ــ زمان خودرویی که در راستای محور x حرکت می‌کند در بازهٔ زمانی صفر تا $14/0\,s$ مطابق شکل روبه‌رو است.

الف) شتاب متوسط خودرو در این بازهٔ زمانی چقدر است؟

ب) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه‌های $t = 7/0\,s$، $t = 8/0\,s$ و $t = 11/0\,s$ به‌دست آورید.

۱ــ۲ حرکت با سرعت ثابت

ساده‌ترین نوع حرکت، حرکت با سرعت ثابت است. در این نوع حرکت، اندازه و جهت سرعت متحرک در طول مسیر ثابت است (شکل ۱ــ۱۰). پیش از این و در مثال ۱ــ۵، با نمونه‌ای از حرکت با سرعت ثابت آشنا شدیم. در این مثال شیب نمودار مکان ــ زمان متحرک در طول حرکت ثابت و در نتیجه سرعت متوسط متحرک در هر بازهٔ زمانی دلخواه، برابر سرعت لحظه‌ای آن است. در این صورت می‌توان نوشت :

$$v = v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow \Delta x = v\Delta t$$

شکل ۱ــ۱۰ در حرکت با سرعت ثابت، هم جهت سرعت و هم اندازهٔ آن (تندی) ثابت است.

اگر مطابق شکل ۱ــ۱۱ متحرک در لحظهٔ $t_1 = 0$ در مکان $x_1 = x_0$ و در لحظهٔ $t_2 = t$ در مکان $x_2 = x$ باشد، رابطهٔ اخیر را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد :

$$x - x_0 = v(t - 0)$$

یا :

$$x = vt + x_0 \qquad \text{(معادلهٔ مکان ــ زمان در حرکت با سرعت ثابت)} \qquad (۱ــ۷)$$

در معادلهٔ ۱ــ۷ معمولاً x_0 را که مکان متحرک در لحظهٔ $t = 0$ است مکان اولیهٔ متحرک می‌نامند. توجه کنید که مکان‌های x_0 و x می‌توانند مثبت، منفی یا صفر باشند. سرعت متحرک هم به‌دلیل ماهیت برداری آن، در صورتی که حرکت در جهت محور x باشد مثبت و در غیر این صورت منفی است.

شکل ۱ــ۱۱ الف) مکان یک دونده در دو لحظهٔ متفاوت. ب) نمودار مکان-زمان دونده‌ای که در جهت محور x با سرعت ثابت می‌دود.

تمرین ۱ــ۶

با توجه به شیب هر یک از نمودارها، دانش‌آموزان به سادگی می‌توانند سرعت هر یک از متحرک‌های A و B را پیدا کنند.

$$v_A = \frac{8/0\,m}{4/0\,s} = 2/0\,m/s \quad \text{و} \quad v_B = \frac{(24/0 - 14/0)\,m/s}{4/0\,s} = 2/5\,m/s$$

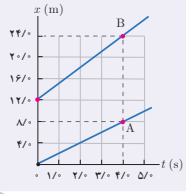
با توجه به رابطهٔ ۱ــ۷ معادله مکان ــ زمان هر متحرک را به‌طور جداگانه می‌نویسیم.

$$x_A = v_A t + x_{0A} = (2/0\,m/s)t + 0 = (2/0\,m/s)t \quad \text{و} \quad x_B = v_B t + x_{0B} = (2/5\,m/s)t + 12/0\,m$$

تمرین ۱ــ۶

شکل مقابل نمودار مکان ــ زمان دو متحرک A و B را نشان می‌دهد که در راستای محور x حرکت می‌کنند.

سرعت هر متحرک را پیدا کنید و معادلهٔ مکان ــ زمان آنها را بنویسید.



تمرین ۱ــ۷

الف) در این قسمت نیازی به محاسبه نیست و کافی است از محل برخورد دو نمودار، خطی موازی محور زمان رسم شود و محل برخورد آن با محور x، تعیین شود. مقدار حدس زده شده برابر مکان هم‌رسی تقریبی کفش‌دوزک‌هاست $(x \simeq 0/5\,\mathrm{m})$. همچنین خطی که از محل برخورد دو نمودار، موازی محور x رسم می‌شود و محور زمان را قطع می‌کند زمان هم‌رسی تقریبی کفش‌دوزک‌هاست $(t \simeq 3/5\,\mathrm{s})$.

ب) با توجه به شیب هر نمودار، سرعت هر کفش‌دوزک را به‌طور جداگانه به‌دست می‌آوریم.

$$v_A = \frac{(0-4/0)\,\mathrm{m}}{4/0\,\mathrm{s}} = -1/0\,\mathrm{m/s}$$

$$= \frac{[0-(-3/0)]}{3\ 0} = 1\ 0\,\mathrm{m/s}$$

$$x_A = v_A t + x_{0A} = (-1/0\,\mathrm{m/s})t + 4/0\,\mathrm{m}$$

$$x_B = v_B t + x_{0B} = (1/0\,\mathrm{m/s})t + (-3/0)\,\mathrm{m}$$

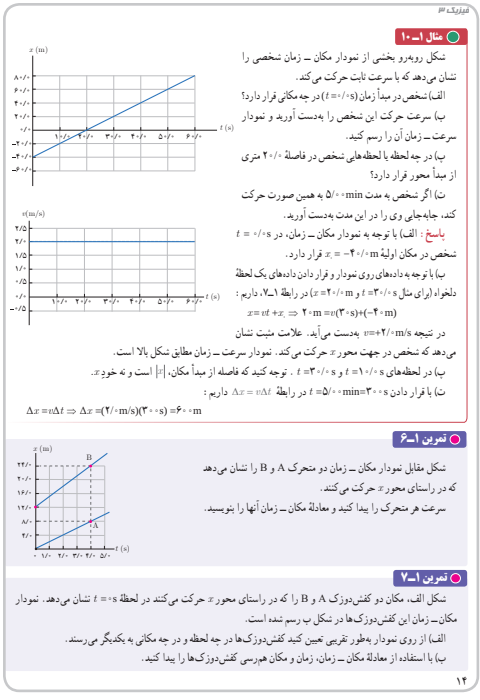
با برابر قرار دادن این دو معادله داریم $(x_A = x_B)$:

$$(-1/0\,\mathrm{m/s})t + 4/0\,\mathrm{m} = (1/0\,\mathrm{m/s})t - 3/0\,\mathrm{m}$$

$$(2/0\,\mathrm{m/s})t = 7/0\,\mathrm{m} \Rightarrow t = 3/5\,\mathrm{s}$$

با جای‌گذاری t در یکی از معادله‌های مکان ــ زمان کفش‌دوزک‌ها داریم :

$$x_A = (-1/0\,\mathrm{m/s})(3/5\mathrm{s}) + 4/0\mathrm{m} = 0/5\,\mathrm{m}$$



فیزیک ۳

مثال ۱ــ۱۰

شکل روبه‌رو بخشی از نمودار مکان ــ زمان شخصی را نشان می‌دهد که با سرعت ثابت حرکت می‌کند.

الف) شخص در مبدأ زمان $(t = 0/0\,\mathrm{s})$ در چه مکانی قرار دارد؟

ب) سرعت حرکت این شخص را به‌دست آورید و نمودار سرعت ــ زمان آن را رسم کنید.

پ) در چه لحظه یا لحظه‌هایی شخص در فاصلهٔ $20/0$ متری از مبدأ محور قرار دارد؟

ت) اگر شخص به مدت $5/00\,\mathrm{min}$ به همین صورت حرکت کند، جابه‌جایی وی را در این مدت به‌دست آورید.

پاسخ : الف) با توجه به نمودار مکان ــ زمان، در $t = 0/0\,\mathrm{s}$ شخص در مکان اولیهٔ $x_0 = -40/0\,\mathrm{m}$ قرار دارد.

ب) با توجه به داده‌های روی نمودار و قرار دادن داده‌های یک لحظهٔ دلخواه (برای مثال $t = 30/0\,\mathrm{s}$ و $x = 20/0\,\mathrm{m}$) در رابطهٔ ۱ــ۷، داریم :

$$x = vt + x_0 \Rightarrow 20\,\mathrm{m} = v(30\,\mathrm{s}) + (-40\,\mathrm{m})$$

در نتیجه $v = +2/0\,\mathrm{m/s}$ به‌دست می‌آید. علامت مثبت نشان می‌دهد که شخص در جهت محور x حرکت می‌کند. نمودار سرعت ــ زمان مطابق شکل بالا است.

پ) در لحظه‌های $t = 30/0\,\mathrm{s}$ و $t = 30/0\,\mathrm{s}$. توجه کنید که فاصله از مبدأ مکان، $|x|$ است و نه خود x.

ت) با قرار دادن $t = 5/00\,\mathrm{min} = 300\,\mathrm{s}$ در رابطهٔ $\Delta x = v\Delta t$ داریم :

$$\Delta x = v\Delta t \Rightarrow \Delta x = (2/0\,\mathrm{m/s})(300\,\mathrm{s}) = 600\,\mathrm{m}$$

تمرین ۱ــ۶

شکل مقابل نمودار مکان ــ زمان دو متحرک A و B را نشان می‌دهد که در راستای محور x حرکت می‌کنند.

سرعت هر متحرک را پیدا کنید و معادلهٔ مکان ــ زمان آنها را بنویسید.

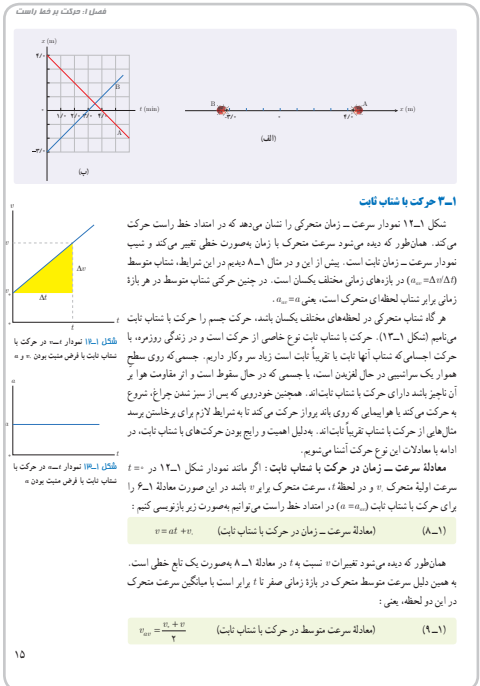
تمرین ۱ــ۷

شکل الف، مکان دو کفش‌دوزک A و B را که در راستای محور x حرکت می‌کنند در لحظهٔ $t = 0\,\mathrm{s}$ نشان می‌دهد. نمودار مکان ــ زمان این کفش‌دوزک‌ها در شکل ب رسم شده است.

الف) از روی نمودار به‌طور تقریبی تعیین کنید کفش‌دوزک‌ها در چه لحظه و در چه مکانی به یکدیگر می‌رسند.

ب) با استفاده از معادلهٔ مکان ــ زمان، زمان و مکان هم‌رسی کفش‌دوزک‌ها را پیدا کنید.

۱۲



فصل ۱: حرکت بر خط راست

(الف)

(ب)

۱ــ۳ حرکت با شتاب ثابت

شکل ۱ــ۱۲ نمودار سرعت ــ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد خط راست حرکت می‌کند. همان‌طور که دیده می‌شود سرعت متحرک با زمان به‌صورت خطی تغییر می‌کند و شیب نمودار سرعت ــ زمان ثابت است. پیش از این و در مثال ۱ــ۸ دیدیم در این شرایط، شتاب متوسط $(a_{av} = \Delta v/\Delta t)$ در بازه‌های زمانی مختلف یکسان است. در چنین حرکتی شتاب متوسط در هر بازهٔ زمانی برابر شتاب لحظه‌ای متحرک است، یعنی $a = a_{av}$.

هر گاه شتاب متحرک در لحظه‌های مختلف یکسان باشد، حرکت جسم را حرکت با شتاب ثابت می‌نامیم (شکل ۱ــ۱۳). حرکت با شتاب ثابت نوع خاصی از حرکت است و در زندگی روزمره، با حرکت اجسامی که شتاب آنها ثابت یا تقریباً ثابت است زیاد سر و کار داریم. جسمی که روی سطح هموار یک سرانبیی در حال لغزیدن است، یا جسمی که در حال سقوط است و از مقاومت هوا بر آن ناچیز باشد دارای حرکت با شتاب ثابت‌اند. همچنین خودرویی که پس از سبز شدن چراغ، شروع به حرکت می‌کند یا هواپیمایی که روی باند پرواز حرکت می‌کند تا به شرایط لازم برای برخاستن برسد مثال‌هایی از حرکت با شتاب تقریباً ثابت‌اند. به‌دلیل اهمیت و رایج بودن حرکت‌های با شتاب ثابت، در ادامه با معادلات این نوع حرکت آشنا می‌شویم.

شکل ۱ــ۱۴ نمودار vــt در حرکت با شتاب ثابت با فرض مثبت بودن v و a

شکل ۱ــ۱۴ نمودار aــt در حرکت با شتاب ثابت با فرض مثبت بودن a

معادلهٔ سرعت ــ زمان در حرکت با شتاب ثابت : اگر مانند نمودار شکل ۱ــ۱۲ در $t = 0$ سرعت اولیهٔ متحرک v_0 و در لحظهٔ t، سرعت متحرک برابر v باشد در این صورت معادلهٔ ۱ــ۶ را برای حرکت با شتاب ثابت $(a = a_{av})$ در امتداد خط راست می‌توانیم به‌صورت زیر بازنویسی کنیم :

$$v = at + v_0 \qquad \text{(معادلهٔ سرعت ــ زمان در حرکت با شتاب ثابت)} \qquad (۱ــ۸)$$

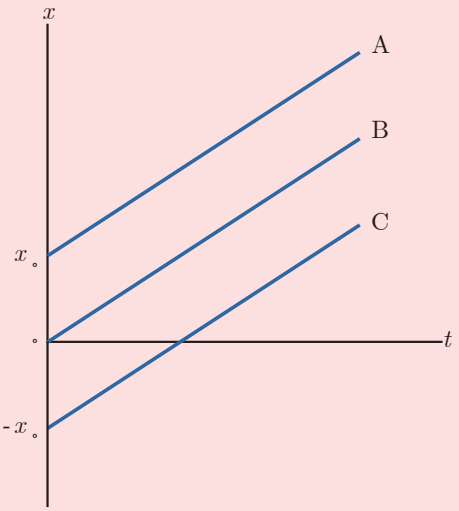
همان‌طور که دیده می‌شود تغییرات v نسبت به t در معادلهٔ ۱ــ۸ به‌صورت یک تابع خطی است. به همین دلیل سرعت متوسط متحرک در بازهٔ زمانی صفر تا t برابر است با میانگین سرعت متحرک در این دو لحظه، یعنی :

$$v_{av} = \frac{v_0 + v}{2} \qquad \text{(معادلهٔ سرعت متوسط در حرکت با شتاب ثابت)} \qquad (۱ــ۹)$$

۱۵

تمرین‌های پیشنهادی بخش ۱ــ۲

۱ شکل زیر نمودار مکان ــ زمان سه متحرک را نشان می‌دهد که حرکت آنها با سرعت ثابت و بر خط راست است. معادلهٔ حرکت هر متحرک را بنویسید.



۲ معادلهٔ حرکت سه متحرک به ترتیب $x=-v_At+x_0$، $x=-v_Bt$ و $x=-v_Ct-x_0$ است که در آن $v_A=v_B=v_C>0$ و x_0 عددی مثبت است. نمودار مکان ــ زمان این سه متحرک را در یک دستگاه مختصات رسم کنید.

۳ متحرکی که با سرعت ثابت در امتداد خط راست حرکت می‌کند در لحظهٔ $t_1=0$ در $x_1=-8\text{m}$ و در لحظهٔ $t_2=4\text{s}$ در $x_2=12\text{m}$ قرار دارد. معادلهٔ مکان ــ زمان متحرک را بنویسید.

۴ در حرکت با سرعت ثابت بر خط راست سرعت متوسط در هر بازهٔ زمانی

الف) برابر سرعت لحظه‌ای است.

ب) برابر صفر است.

پ) کوچک‌تر از سرعت لحظه‌ای است.

ت) بزرگ‌تر از سرعت لحظه‌ای است.

۵ معادلهٔ حرکت متحرکی در SI به‌صورت $x=12t-24$ است.

الف) تغییر مکان متحرک در ۲ ثانیهٔ اول حرکت چقدر است؟

ب) در چه لحظه‌ای متحرک به مبدأ مکان می‌رسد؟

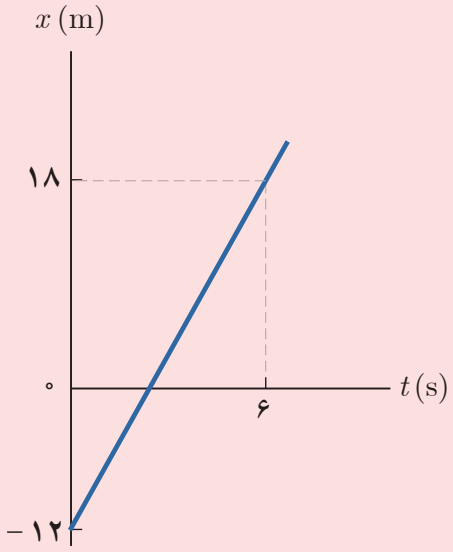
پ) نمودار مکان زمان متحرک را رسم کنید.

۶ شکل صفحه بعد نمودار مکان ــ زمان متحرکی را در ۶ ثانیهٔ اول حرکت نشان می‌دهد.

الف) نوع حرکت متحرک را تعیین کنید.

ب) معادلهٔ حرکت متحرک را بنویسید.

پ) جابه‌جایی متحرک در ۲ ثانیهٔ اول حرکت چقدر است؟



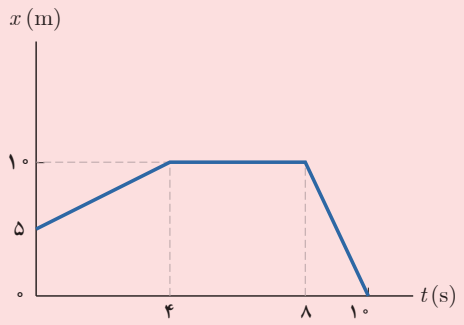
۷ جسمی با سرعت ثابت در امتداد خط راست در حرکت است. اگر این جسم در لحظهٔ $t = ۴s$ در فاصلهٔ ۲۲m از مبدأ مکان و ۲ ثانیه بعد در فاصلهٔ ۳۴m از آن مبدأ باشد، سرعت جسم چقدر است؟ معادلهٔ مکان ــ زمان جسم را بنویسید.

۸ متحرکی در امتداد خط راست در حرکت است. این متحرک در ۲ ثانیهٔ اول حرکت با سرعت ثابت ۴ m/s، آن‌گاه به مدت ۴s با سرعت ثابت ۶m/s و بقیهٔ مسیر را به مدت ۵s با سرعت ۳ m/s طی می‌کند. نمودار سرعت ــ زمان متحرک را رسم کنید. اگر در $t = ۰$ متحرک در مبدأ مکان باشد، نمودار مکان ــ زمان آن را در کل مسیر رسم کنید.

۹ دو متحرک هم‌زمان از مبدأ مکان با سرعت‌های ۷۲km/h و ۱۰۸km/h در جهت محور x می‌گذرند. پس از چند دقیقه فاصلهٔ آنها از یکدیگر به ۳۶۰۰m می‌رسد.

الف) ۶ ب) ۸ پ) ۱۰ ت) ۱۲

۱۰ شکل روبه‌رو نمودار مکان ــ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد خط راست حرکت می‌کند.



الف) جابه‌جایی متحرک در کل زمان حرکت چقدر است؟

ب) سرعت متوسط متحرک را در هر بازهٔ زمانی و همچنین در کل زمان حرکت به‌دست آورید.

پ) معادلهٔ حرکت متحرک را در هر بازهٔ زمانی بنویسید.

ت) نمودار سرعت زمان متحرک را برای هر بازهٔ زمانی در یک دستگاه مختصات رسم کنید.

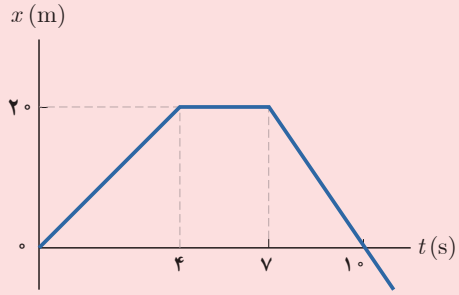
۱۱ ذره‌ای با سرعت ثابت روی محور xها به حرکت درمی‌آید و پس از ۲s به مبدأ می‌رسد و ۲s بعد به نقطهٔ $x=-6\text{m}$ می‌رسد. معادلهٔ حرکت آن در SI کدام است؟

الف) $x=-3t-6$ ب) $x=-3t+6$ پ) $x=3t-6$ ت) $x=3t+6$

۱۲ قطاری با سرعت ثابت ۳۰ m/s از روی پلی به طول ۴۰۰ m در مدت ۲۰ s می‌گذرد. طول قطار چند متر است؟

الف) ۲۰۰ ب) ۴۰۰ پ) ۶۰۰ ت) ۸۰۰

۱۳ نمودار مکان ــ زمان متحرکی که در امتداد محور x حرکت می‌کند مطابق شکل روبه‌رو است. سرعت این متحرک ۱۰ s پس از شروع حرکت چند m/s است؟



الف) صفر

ب) ۹ m/s در جهت مثبت محور x

پ) ۹ m/s در جهت منفی محور x

ت) $\frac{۲۰}{۳}$ m/s در جهت مثبت محور x

ث) $\frac{۲۰}{۳}$ m/s در جهت منفی محور x

۱۴ معادلهٔ سرعت ــ زمان متحرکی در SI به‌صورت $v=4t+v_0$ و سرعت متوسط آن در ۵ ثانیهٔ اول حرکت ۲۰ m/s بوده است.

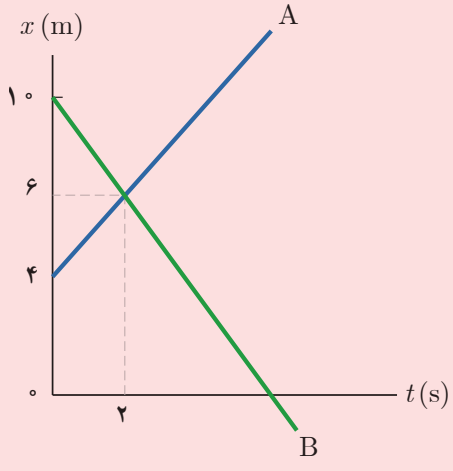
الف) مقدار v_0 چقدر است؟ ب) درصورتی‌که در $t=0$ متحرک در $x_0=-2\text{m}$ باشد، نمودار مکان ــ زمان آن را رسم کنید.

۱۵ دو هواپیما از فرودگاهی به‌طور هم‌زمان به طرف فرودگاه دیگری پرواز می‌کنند. تندی پرواز هواپیمای اول ۱۰۸۰ km/h و تندی پرواز هواپیمای دوم ۹۰۰ km/h است. اگر هواپیمای اول پس از ۲ ساعت به مقصد برسد،

الف) فاصلهٔ بین دو فرودگاه چقدر است؟

ب) هواپیمای دوم چند دقیقه پس از هواپیمای اول به مقصد می‌رسد؟ (فرض کنید هواپیماها از ابتدا تا انتها روی مسیری مستقیم و با سرعت ثابت حرکت می‌کنند.)

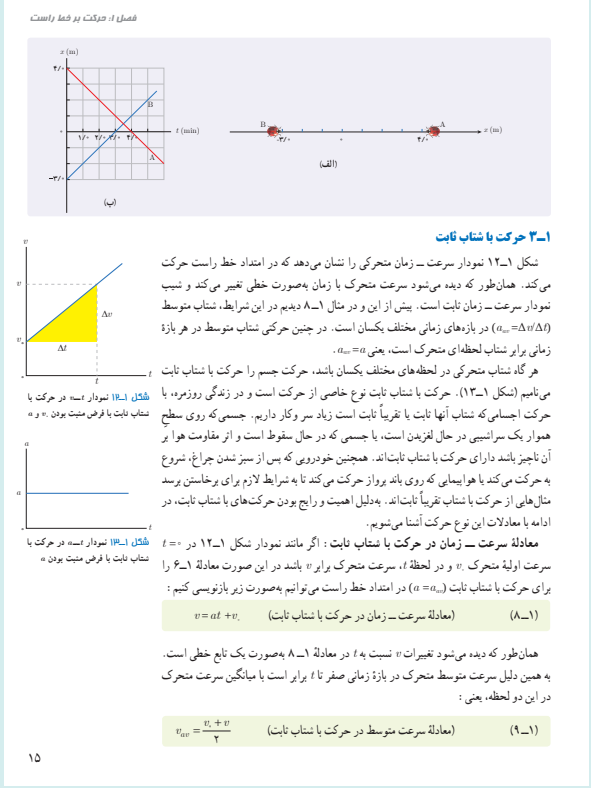
۱۶ نمودار مکان ــ زمان دو متحرک مطابق شکل روبه‌رو است. معادله مکان ــ زمان این دو متحرک را به‌دست آورید.



۱ــ۳ــ حرکت با شتاب ثابت

راهنمای تدریس : مثال ۱ــ۸ شروع مناسبی برای بررسی حرکت با شتاب ثابت است. در کتاب درسی نیز با همین مثال و تمرکز روی نمودار شکل ۱ــ۱۲ مبحث حرکت با شتاب ثابت شروع شده است. از آنجا که در زندگی روزمره حرکت بسیاری از اجسام پیرامون ما با تقریب خوبی، حرکت با شتاب ثابت است، لذا در تمامی کتاب‌های درسی فیزیک، حرکت با شتاب ثابت و معادله‌های مربوط به آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

توجه : به چگونگی اثبات رابطهٔ ۱ــ۹ در مسئله ۳ پایان فصل پرداخته شده است. لازم به توضیح است که اثبات این رابطه جزء اهداف این کتاب نیست و صرفاً جهت آگاهی همکاران آورده شده است.



فصل ۱: حرکت بر خط راست

۱ــ۳ حرکت با شتاب ثابت

شکل ۱ــ۱۲ نمودار سرعت ــ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد خط راست حرکت می‌کند. همان‌طور که دیده می‌شود سرعت متحرک با زمان به‌صورت خطی تغییر می‌کند و شیب نمودار سرعت ــ زمان ثابت است. پیش از این و در مثال ۱ــ۸ دیدیم در این شرایط، شتاب متوسط ($a_{av}=\Delta v/\Delta t$) در بازه‌های زمانی مختلف یکسان است. در چنین حرکتی شتاب متوسط در هر بازهٔ زمانی برابر شتاب لحظه‌ای متحرک است، یعنی $a_{av}=a$.

شکل ۱ــ۱۲ نمودار $v-t$ در حرکت با شتاب ثابت با فرض مثبت بودن v و a

شکل ۱ــ۱۳ نمودار $a-t$ در حرکت با شتاب ثابت با فرض مثبت بودن a

هر گاه شتاب متحرکی در لحظه‌های مختلف یکسان باشد، حرکت جسم را حرکت با شتاب ثابت می‌نامیم (شکل ۱ــ۱۳). حرکت با شتاب ثابت نوع خاصی از حرکت است و در زندگی روزمره، با حرکت اجسامی که شتاب آنها ثابت یا تقریباً ثابت است زیاد سر وکار داریم. جسمی که روی سطح هموار یک سرانبیی در حال لغزیدن است، یا جسمی که در حال سقوط است و اثر مقاومت هوا بر آن ناچیز باشد دارای حرکت با شتاب ثابت‌اند. همچنین خودرویی که پس از سبز شدن چراغ، شروع به حرکت می‌کند یا هواپیمایی که روی باند پرواز حرکت می‌کند تا به شرایط لازم برای برخاستن برسد مثال‌هایی از حرکت با شتاب تقریباً ثابت‌اند. به‌دلیل اهمیت و رایج بودن حرکت‌های با شتاب ثابت، در ادامه با معادلات این نوع حرکت آشنا می‌شویم.

معادلهٔ سرعت ــ زمان در حرکت با شتاب ثابت : اگر مانند نمودار شکل ۱ــ۱۲ در $t=0$ سرعت اولیهٔ متحرک v_0 و در لحظهٔ t، سرعت متحرک برابر v باشد در این صورت معادلهٔ ۱ــ۶ را برای حرکت با شتاب ثابت ($a=a_{av}$) در امتداد خط راست می‌توانیم به‌صورت زیر بازنویسی کنیم :

$$v=at+v_0 \qquad \text{(معادلهٔ سرعت ــ زمان در حرکت با شتاب ثابت)} \qquad (۱ــ۸)$$

همان‌طور که دیده می‌شود تغییرات v نسبت به t در معادلهٔ ۱ــ۸ به‌صورت یک تابع خطی است. به همین دلیل سرعت متوسط متحرک در بازهٔ زمانی صفر تا t برابر است با میانگین سرعت متحرک در این دو لحظه، یعنی :

$$v_{av}=\frac{v_0+v}{2} \qquad \text{(معادلهٔ سرعت متوسط در حرکت با شتاب ثابت)} \qquad (۱ــ۹)$$

تمرین ۱ــ۸

الف)

$$v=(-۱/۸\ \mathrm{m/s^۲})t+۲/۲\ \mathrm{m/s}$$
$$=(-۱/۸\ \mathrm{m/s^۲})(۴/۰\ \mathrm{s})+۲/۲\ \mathrm{m/s}$$
$$=-۵/۰\ \mathrm{m/s}$$

ب) سرعت متحرک در لحظهٔ $t=0$ برابر است :

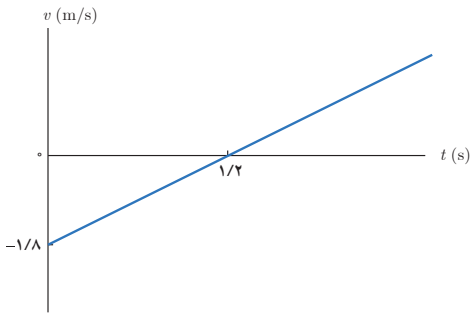
$$v_0=۲/۲\ \mathrm{m/s}$$

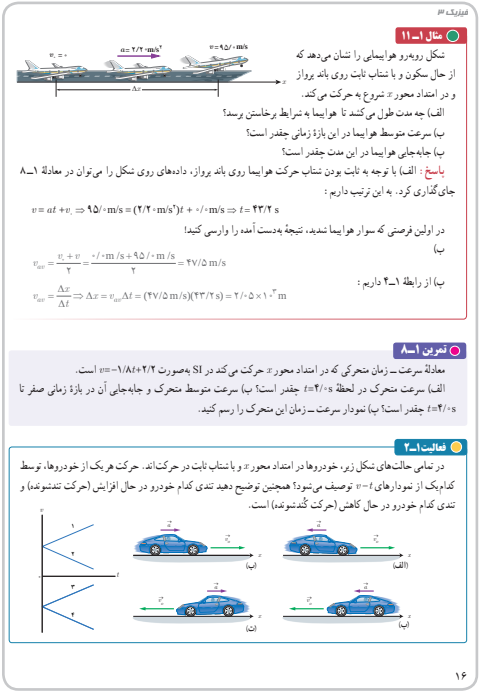
چون حرکت جسم با شتاب ثابت است، داریم :

$$v_{av}=\frac{v_0+v}{۲}=\frac{۲/۲\ \mathrm{m/s}+(-۵/۰)\mathrm{m/s}}{۲}=-۱/۴\ \mathrm{m/s}$$

پ) ابتدا لحظه‌ای را تعیین می‌کنیم که سرعت متحرک صفر می‌شود. به این ترتیب داریم :

$$v=(-۱/۸\ \mathrm{m/s})t+۲/۲\ \mathrm{m/s}$$
$$0=(-۱/۸\ \mathrm{m/s})t+۲/۲\ \mathrm{m/s}\Rightarrow t\simeq ۱/۲\ \mathrm{s}$$





فیزیک ۳

مثال ۱ــ۱۱

شکل روبه‌رو هواپیمایی را نشان می‌دهد که از حال سکون و با شتاب ثابت روی باند پرواز و در امتداد محور x شروع به حرکت می‌کند.

الف) چه مدت طول می‌کشد تا هواپیما به شرایط برخاستن برسد؟

ب) سرعت متوسط هواپیما در این بازهٔ زمانی چقدر است؟

پ) جابه‌جایی هواپیما در این مدت چقدر است؟

$v_0=0$ $\quad a=2/2\ m/s^2$ $\quad v=95/0\ m/s$ $\quad \Delta x$

پاسخ : الف) با توجه به ثابت بودن شتاب حرکت هواپیما روی باند پرواز، داده‌های روی شکل را می‌توان در معادلهٔ ۱ــ۸ جای‌گذاری کرد. به این ترتیب داریم :

$$v=at+v_0 \Rightarrow 95/0\,m/s=(2/20\,m/s^2)t+0/0\,m/s \Rightarrow t=43/2\,s$$

در اولین فرصتی که سوار هواپیما شدید، نتیجهٔ به‌دست آمده را وارسی کنید!

ب)

$$v_{av}=\frac{v_0+v}{2}=\frac{0/0\,m/s+95/0\,m/s}{2}=47/5\,m/s$$

پ) از رابطهٔ ۱ــ۴ داریم :

$$v_{av}=\frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow \Delta x=v_{av}\Delta t=(47/5\,m/s)(43/2\,s)=2/05\times10^{3}\,m$$

تمرین ۱ــ۸

معادلهٔ سرعت ــ زمان متحرکی که در امتداد محور x حرکت می‌کند در SI به‌صورت $v=-1/8t+2/2$ است.

الف) سرعت متحرک در لحظهٔ $t=2/0\,s$ چقدر است؟ ب) سرعت متوسط متحرک و جابه‌جایی آن در بازهٔ زمانی صفر تا $t=4/0\,s$ چقدر است؟ پ) نمودار سرعت ــ زمان این متحرک را رسم کنید.

فعالیت ۱ــ۲

در تمامی حالت‌های شکل زیر، خودروها در امتداد محور x و با شتاب ثابت در حرکت‌اند. حرکت هر یک از خودروها، توسط کدام‌یک از نمودارهای $v-t$ توصیف می‌شود؟ همچنین توضیح دهید تندی کدام خودرو در حال افزایش (حرکت تندشونده) و تندی کدام خودرو در حال کاهش (حرکت کُندشونده) است.

۱۶

فعالیت ۱ــ۲

در این فعالیت حرکت تندشونده و کند شونده با توجه به مفهوم تندی معرفی شده است. هرگاه مطابق نمودارهای ۱ و ۴، در هر لحظه از زمان تندی متحرک روبه افزایش باشد (منظور از تندی اندازهٔ سرعت است که همواره مقدار مثبتی دارد) حرکت تند شونده است و هرگاه در هر لحظه از زمان، تندی متحرک رو به کاهش باشد (مانند نمودار ۲ و ۳)، حرکت کند شونده است. لذا اگر نمودارهای سرعت ــ زمان متحرک را در اختیار داشته باشیم، برای تعیین تند شونده یا کند شونده بودن حرکت، کافی است به چگونگی تغییرات تندی متحرک روی نمودار توجه شود.

ــ حرکت خودروی الف توسط نمودار ۲

ــ حرکت خودروی ب توسط نمودار ۱

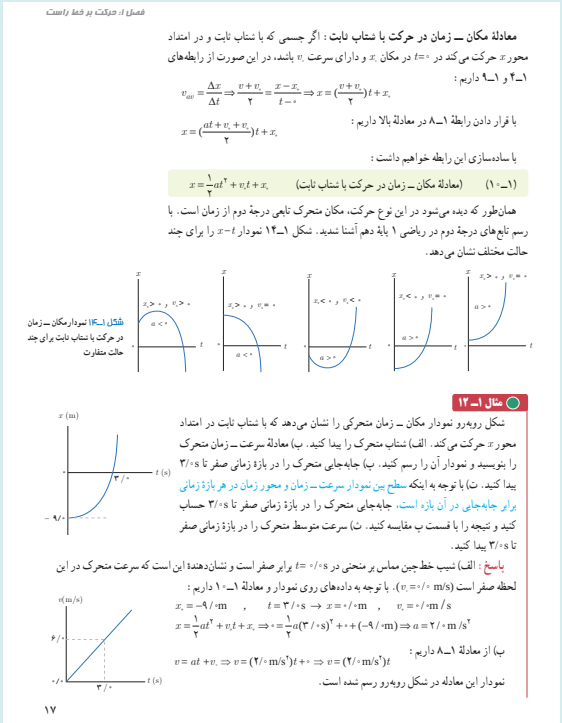
ــ حرکت خودروی پ توسط نمودار ۴

ــ حرکت خودروی ت توسط نمودار ۳

توجه

برای هر یک از خودروها، توصیه می‌شود دانش‌آموزان یک مثال واقعی بزنند. برای مثال در خصوص خودروی شکل (ت) که توسط نمودار ۳ توصیف می‌شود. می‌توان گفت : خودرویی در خلاف جهت محور x در حرکت است که مانعی را در دوردست می‌بیند و با شتاب ثابت، تندی خود را کاهش می‌دهد (حرکت کند شونده).

ادامه راهنمای تدریس: از آنجا که دانش‌آموزان در ریاضی سال دهم با معادلهٔ $y = ax^2 + bx + c$ و نحوهٔ رسم آن برای حالت‌های مختلف آشنا شده‌اند، لذا در این قسمت از آموخته‌های قبلی دانش‌آموزان در درس ریاضی برای رسم معادلهٔ مکان ــ زمان متحرک که دارای حرکت با شتاب ثابت است استفاده کرده‌ایم. معادلهٔ مکان ــ زمان برای چند حالت خاص در شکل ۱ــ۱۴ و مثال ۱ــ۱۲ در کتاب درسی رسم شده است. حالت‌های دیگر را نیز همکاران محترم می‌توانند به کمک دانش‌آموزان مورد بررسی قرار دهند.



فصل ۱: حرکت بر خط راست

معادلهٔ مکان ــ زمان در حرکت با شتاب ثابت : اگر جسمی که با شتاب ثابت و در امتداد محور x حرکت می‌کند در $t=0$ در مکان x_0 و دارای سرعت v_0 باشد، در این صورت از رابطه‌های ۱ــ۴ و ۱ــ۹ داریم :

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow \frac{v+v_0}{2} = \frac{x-x_0}{t-0} \Rightarrow x = (\frac{v+v_0}{2})t + x_0$$

با قرار دادن رابطهٔ ۱ــ۸ در معادلهٔ بالا داریم :

$$x = (\frac{at+v_0+v_0}{2})t + x_0$$

با ساده‌سازی این رابطه خواهیم داشت :

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \qquad \text{(معادلهٔ مکان ــ زمان در حرکت با شتاب ثابت)} \quad (۱ــ۱۰)$$

همان‌طور که دیده می‌شود در این نوع حرکت، مکان متحرک تابعی درجهٔ دوم از زمان است. با رسم تابع‌های درجهٔ دوم در ریاضی ۱ پایهٔ دهم آشنا شدید. شکل ۱ــ۱۴ نمودار $x-t$ را برای چند حالت مختلف نشان می‌دهد.

شکل ۱ــ۱۴ نمودار مکان ــ زمان در حرکت با شتاب ثابت برای چند حالت متفاوت

مثال ۱ــ۱۲

شکل روبه‌رو نمودار مکان ــ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که با شتاب ثابت در امتداد محور x حرکت می‌کند. الف) شتاب متحرک را پیدا کنید. ب) معادلهٔ سرعت ــ زمان متحرک را بنویسید و نمودار آن را رسم کنید. ب) جابه‌جایی متحرک را در بازهٔ زمانی صفر تا $3/0\,s$ پیدا کنید. ت) با توجه به اینکه سطح بین نمودار سرعت ــ زمان و محور زمان در هر بازهٔ زمانی برابر جابه‌جایی در آن بازه است، جابه‌جایی متحرک را در بازهٔ زمانی صفر تا $3/0\,s$ حساب کنید و نتیجه را با قسمت ب مقایسه کنید. ث) سرعت متوسط متحرک را در بازهٔ زمانی صفر تا $3/0\,s$ پیدا کنید.

پاسخ : الف) شیب خط چین مماس بر منحنی در $t = 0/0\,s$ برابر صفر است و نشان‌دهندهٔ این است که سرعت متحرک در این لحظه صفر است ($v_0 = 0/0\ m/s$). با توجه به داده‌های روی نمودار و معادلهٔ ۱ــ۱۰ داریم :

$$x_0 = -9/0\,m \quad , \quad t = 3/0\,s \rightarrow x = 0/0\,m \quad , \quad v_0 = 0/0\,m/s$$

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \Rightarrow 0 = \frac{1}{2}a(3/0\,s)^2 + 0 + (-9/0\,m) \Rightarrow a = 2/0\,m/s^2$$

ب) از معادلهٔ ۱ــ۸ داریم :

$$v = at + v_0 \Rightarrow v = (2/0\,m/s^2)t + 0 \Rightarrow v = (2/0\,m/s^2)t$$

نمودار این معادله در شکل روبه‌رو رسم شده است.

تمرین ۱ــ۹

مبدأ مکان و مبدأ زمان را محل گذر خودرو از چهارراه در نظر می‌گیریم. در این صورت :

$x = 0$

$v_0 = 18/0\ km/h = 5/0\ m/s$

$a = 1/0\ m/s^2$

$\Delta x = 300\ m$

$v = ?$

از آنجا که هنوز معادلهٔ سرعت ــ جابه‌جایی معرفی نشده است، هدف این تمرین استفاده از معادله‌هایی است که تاکنون دانش‌آموزان با آنها آشنا شده‌اند. ابتدا از معادلهٔ ۱ــ۱۱، مدت زمان حرکت خودرو را به‌دست می‌آوریم :

فیزیک ۳

ب) با توجه به نمودار مکان ــ زمان، جابه‌جایی متحرک در بازهٔ زمانی $(0/0\,s, 3/0\,s)$ برابر $\Delta x = 0/0 - (-9/0\,m) = 9/0\,m$ است.

ت) سطح بین منحنی سرعت و محور زمان در نمودار سرعت ــ زمان، برابر $(\frac{1}{2} \times 6/0\,m/s)(3/0\,s) = 9/0\,m$ است که با نتیجهٔ قسمت ب سازگار است.

ث) از رابطهٔ ۱ــ۴ داریم :

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{9/0\,m}{3/0\,s} = 3/0\,m/s$$

توجه کنید که می‌توانستیم سرعت متوسط در این بازهٔ زمانی را از رابطهٔ $v_{av} = \frac{(v_0+v)}{2}$ نیز حساب کنیم که به همین نتیجه می‌رسد.

تمرین ۱ــ۹

خودرویی با سرعت $18/0\,km/h$ در امتداد مسیری مستقیم از چهارراهی می‌گذرد تندی آن با شتاب $1/0\,m/s^2$ افزایش می‌یابد. سرعت خودرو پس از $300\,m$ جابه‌جایی چقدر است؟

معادلهٔ سرعت ــ جابه‌جایی در حرکت با شتاب ثابت : اگر هنگام بررسی حرکت جسمی، زمان t معلوم نباشد، می‌توان از معادلهٔ سرعت ــ جابه‌جایی برای پیدا کردن یکی از کمیت‌های جابه‌جایی Δx، سرعت اولیه v_0، سرعت "v"، یا شتاب "a" متحرک استفاده کرد. برای به‌دست آوردن این معادله از رابطه‌های ۱ــ۴ و ۱ــ۹ شروع می‌کنیم. به این ترتیب مشابه آنچه هنگام به‌دست آوردن معادلهٔ مکان ــ زمان دیدیم می‌توان نوشت :

$$x = (\frac{v+v_0}{2})t + x_0$$

با به‌دست آوردن t از معادلهٔ ۱ــ۸ و قرار دادن آن در رابطهٔ بالا داریم :

$$x = (\frac{v+v_0}{2})(\frac{v-v_0}{a}) + x_0$$

در این صورت داریم :

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \qquad \text{(معادلهٔ سرعت ــ جابه‌جایی در حرکت با شتاب ثابت)} \quad (۱ــ۱۱)$$

اگر چه این رابطه را برای بازهٔ زمانی صفر تا t به‌دست آوردیم، برای هر بازهٔ زمانی دلخواه t_1 تا t_2 نیز می‌توانیم از رابطهٔ زیر استفاده کنیم که در آن x_1 و v_1 متناظر با لحظهٔ t_1 و همچنین x_2 و v_2 متناظر با لحظهٔ t_2 هستند.

$$v_2^2 = v_1^2 + 2a(x_2 - x_1)$$

مثال ۱ــ۱۳

محیط‌بان یک بارک حفاظت شده هنگام گشت شبانه، با تندی $40/0\,km/h$ در جاده‌ای مستقیم در حرکت است که ناگهان گوزنی بدون حرکتی را در جلوی خود می‌بیند و ترمز می‌گیرد (شکل روبه‌رو). حرکت خودرو با شتابی به اندازهٔ $3/80\,m/s^2$ کُند می‌شود تا سرانجام متوقف شود. اگر لحظه‌ای که محیط‌بان ترمز می‌گیرد، گوزن در فاصلهٔ $22/0$ متری از خودرو باشد،

الف) خودرو در چه فاصله‌ای از گوزن متوقف می‌شود؟

ب) چه مدت طول می‌کشد تا خودرو متوقف شود؟

ادامهٔ راهنمای حل تمرین ۱ــ۹

$$x=\frac{۱}{۲}a+۲+v_{۰}t+x_{۰} \Rightarrow$$
$$۳۰۰\,\mathrm{m}=\frac{۱}{۲}(۱۰\,\mathrm{m/s^{۲}})t^{۲}+(۵۰\,\mathrm{m/s})t+۰$$

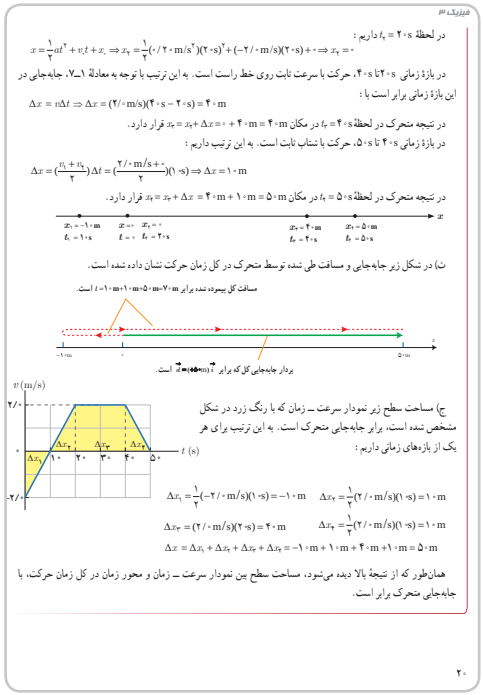
معادلهٔ مکان ــ زمان خودرو در SI به‌صورت زیر ساده می‌شود :

$$t^{۲}+۱۰t-۶۰=۰$$

پاسخ قابل قبول این معادلهٔ درجه دوم $t=۲۰\,\mathrm{s}$ است. به این ترتیب از معادله ۱ــ۸ داریم :

$$v=at+v_{۰}=(۱۰\,\mathrm{m/s^{۲}})(۲۰\,\mathrm{s})+۵۰\,\mathrm{m/s}$$
$$\Rightarrow v=۲۵۰\,\mathrm{m/s}$$

دانش‌آموزان در ادامه این بخش که با معادلهٔ سرعت ــ جابه‌جایی آشنا می‌شوند، خواهند دید که راه‌حل ساده‌تری برای این تمرین نیز وجود دارد.



فصل ۱: حرکت بر خط راست

پاسخ : الف) حرکت خودرو را در جهت مثبت محور x فرض می‌کنیم. همچنین برای سادگی، مبدأ زمان و مکان را جایی می‌گیریم که محیط‌بان ترمز گرفته و در نتیجه $x_{۰}=۰\,\mathrm{m}$ و $v_{۰}=۴۰\,\mathrm{km/h}=۱۱\,\mathrm{m/s}$ است. از طرفی، چون سرعت خودرو در جهت محور x به‌تدریج در حال کاهش است، شتاب آن بر خلاف جهت محور x و در نتیجه منفی خواهد شد. به این ترتیب از معادلهٔ ۱ــ۱۱ داریم :

$$v^{۲}-v_{۰}^{۲}=۲a(x-x_{۰}) \Rightarrow ۰-(۱۱\,\mathrm{m/s})^{۲}=۲(-۳/۸\,\mathrm{m/s^{۲}})(x-۰)$$

در نتیجه $x=۱۶/۲\,\mathrm{m}$ و خودرو در فاصلهٔ $۵/۸\,\mathrm{m}-(۲۲\,\mathrm{m}-۱۶/۲\,\mathrm{m})$ از گوزن متوقف می‌شود و خوشبختانه برخوردی بین خودرو و گوزن صورت نمی‌گیرد.

ب) از رابطهٔ ۱ــ۸ داریم :

$$v=at+v_{۰} \Rightarrow ۰=(-۳/۸\,\mathrm{m/s^{۲}})t+۱۱\,\mathrm{m/s} \Rightarrow t=۲/۹۲\,\mathrm{s}$$

مثال ۱ــ۱۴

متحرکی که در راستای محور x حرکت می‌کند در لحظهٔ $t=۰$ از مکان $x_{۰}=۰$ می‌گذرد. نمودار سرعت ــ زمان این متحرک مطابق شکل روبه‌رو است.

الف) متحرک در کدام بازهٔ زمانی، در جهت محور x و در کدام بازهٔ زمانی در خلاف جهت محور x حرکت کرده است؟

ب) در چه لحظه یا لحظه‌هایی جهت حرکت متحرک تغییر کرده است؟

پ) با توجه به نمودار سرعت ــ زمان توضیح دهید در کدام بازه‌های زمانی حرکت جسم تندشونده و یا کُندشونده است.

ت) مکان متحرک را در هر یک از لحظه‌های $t_{۱}=۱۰\,\mathrm{s}$، $t_{۲}=۲۰\,\mathrm{s}$، $t_{۳}=۴۰\,\mathrm{s}$ و $t_{۴}=۵۰\,\mathrm{s}$ پیدا کنید و روی محور x نشان دهید.

ث) مسیر حرکت متحرک را رسم کنید و با توجه به آن، جابه‌جایی و مسافت طی شده را در کل زمان حرکت پیدا کنید.

ج) مساحت سطح زیر نمودار $v-t$ را حساب کنید و مقدار آن را با جابه‌جایی متحرک در قسمت قبل مقایسه کنید. مساحت بخشی از سطح را که زیر محور است منفی بگیرید.

پاسخ : الف) با توجه به نمودار، در بازهٔ زمانی صفر تا $t_{۱}=۱۰\,\mathrm{s}$، سرعت متحرک منفی است و بنابراین در جهت منفی محور x حرکت کرده است. همچنین در بازهٔ زمانی $t_{۱}=۱۰\,\mathrm{s}$ تا $t_{۴}=۵۰\,\mathrm{s}$، سرعت متحرک مثبت است و بنابراین در جهت مثبت محور x حرکت کرده است.

ب) تنها در لحظهٔ $t_{۱}=۱۰\,\mathrm{s}$ علامت سرعت و در نتیجه جهت حرکت متحرک تغییر کرده است.

پ) در بازهٔ زمانی صفر تا $t_{۱}=۱۰\,\mathrm{s}$، تندی در حال کاهش و در نتیجه حرکت کُندشونده است.

در بازهٔ زمانی $t_{۱}=۱۰\,\mathrm{s}$ تا $t_{۲}=۲۰\,\mathrm{s}$، تندی در حال افزایش و در نتیجه حرکت تندشونده است.

در بازهٔ زمانی $t_{۲}=۲۰\,\mathrm{s}$ تا $t_{۳}=۴۰\,\mathrm{s}$، حرکت با سرعت ثابت است.

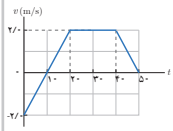
در بازهٔ زمانی $t_{۳}=۴۰\,\mathrm{s}$ تا $t_{۴}=۵۰\,\mathrm{s}$، تندی در حال کاهش و در نتیجه حرکت کُندشونده است.

ت) در بازهٔ زمانی صفر تا $t_{۲}=۲۰\,\mathrm{s}$ حرکت با شتاب ثابت است. به این ترتیب از معادلهٔ ۱ــ۸ داریم :

$$v=at+v_{۰} \Rightarrow (۲۰\,\mathrm{m/s})=a(۲۰\,\mathrm{s})+(-۲۰\,\mathrm{m/s}) \Rightarrow a=۰/۲۰\,\mathrm{m/s^{۲}}$$

در این صورت با توجه به معادلهٔ ۱ــ۱۰، در لحظهٔ $t_{۱}=۱۰\,\mathrm{s}$ داریم :

$$x=\frac{۱}{۲}at^{۲}+v_{۰}t+x_{۰} \Rightarrow x_{۱}=\frac{۱}{۲}(۰/۲۰\,\mathrm{m/s^{۲}})(۱۰\,\mathrm{s})^{۲}+(-۲۰\,\mathrm{m/s})(۱۰\,\mathrm{s})+۰ \Rightarrow x_{۱}=-۱۰\,\mathrm{m}$$



فیزیک ۳

در لحظهٔ $t_{۲}=۲۰\,\mathrm{s}$ داریم :

$$x=\frac{۱}{۲}at^{۲}+v_{۰}t+x_{۰} \Rightarrow x_{۲}=\frac{۱}{۲}(۰/۲۰\,\mathrm{m/s^{۲}})(۲۰\,\mathrm{s})^{۲}+(-۲۰\,\mathrm{m/s})(۲۰\,\mathrm{s})+۰ \Rightarrow x_{۲}=۰$$

در بازهٔ زمانی $۲۰\,\mathrm{s}$ تا $۴۰\,\mathrm{s}$، حرکت با سرعت ثابت روی خط راست است. به این ترتیب با توجه به معادلهٔ ۱ــ۷، جابه‌جایی در این بازهٔ زمانی برابر است با :

$$\Delta x=v\Delta t \Rightarrow \Delta x=(۲۰\,\mathrm{m/s})(۴۰\,\mathrm{s}-۲۰\,\mathrm{s})=۴۰\,\mathrm{m}$$

در نتیجه متحرک در لحظهٔ $t_{۳}=۴۰\,\mathrm{s}$ در مکان $x_{۳}=x_{۲}+\Delta x=۰+۴۰\,\mathrm{m}=۴۰\,\mathrm{m}$ قرار دارد.

در بازهٔ زمانی $۴۰\,\mathrm{s}$ تا $۵۰\,\mathrm{s}$، حرکت با شتاب ثابت است. به این ترتیب داریم :

$$\Delta x=\left(\frac{v_{۱}+v_{۲}}{۲}\right)\Delta t=\left(\frac{۲۰\,\mathrm{m/s}+۰}{۲}\right)(۱۰\,\mathrm{s}) \Rightarrow \Delta x=۱۰۰\,\mathrm{m}$$

در نتیجه متحرک در لحظهٔ $t_{۴}=۵۰\,\mathrm{s}$ در مکان $x_{۴}=x_{۳}+\Delta x=۴۰\,\mathrm{m}+۱۰۰\,\mathrm{m}=۵۰۰\,\mathrm{m}$ قرار دارد.

ت) در شکل زیر جابه‌جایی و مسافت طی شده توسط متحرک در کل زمان حرکت نشان داده شده است.

مسافت کل پیموده شده برابر $۷۰۰\,\mathrm{m}+۱۰۰\,\mathrm{m}+۵۰۰\,\mathrm{m}=۷۰۰\,\mathrm{m}$ است.

بردار جابه‌جایی کل که برابر $\vec{d}=(۵۰۰\,\mathrm{m})\vec{i}$ است.

ج) مساحت سطح زیر نمودار سرعت ــ زمان که با رنگ زرد در شکل مشخص شده است، برابر جابه‌جایی متحرک است. به این ترتیب برای هر یک از بازه‌های زمانی داریم :

$$\Delta x_{۱}=\frac{۱}{۲}(-۲۰\,\mathrm{m/s})(۱۰\,\mathrm{s})=-۱۰۰\,\mathrm{m} \qquad \Delta x_{۲}=\frac{۱}{۲}(۲۰\,\mathrm{m/s})(۱۰\,\mathrm{s})=۱۰۰\,\mathrm{m}$$
$$\Delta x_{۳}=(۲۰\,\mathrm{m/s})(۲۰\,\mathrm{s})=۴۰۰\,\mathrm{m} \qquad \Delta x_{۴}=\frac{۱}{۲}(۲۰\,\mathrm{m/s})(۱۰\,\mathrm{s})=۱۰۰\,\mathrm{m}$$
$$\Delta x=\Delta x_{۱}+\Delta x_{۲}+\Delta x_{۳}+\Delta x_{۴}=-۱۰۰\,\mathrm{m}+۱۰۰\,\mathrm{m}+۴۰۰\,\mathrm{m}+۱۰۰\,\mathrm{m}=۵۰۰\,\mathrm{m}$$

همان‌طور که از نتیجهٔ بالا دیده می‌شود، مساحت سطح بین نمودار سرعت ــ زمان و محور زمان در کل زمان حرکت، با جابه‌جایی متحرک برابر است.

ادامه راهنمای تدریس : هرچند معادلهٔ ۱ــ۱۱ به‌طور مستقیم با زمان رابطه‌ای ندارد و به همین دلیل در گذشته به آن معادلهٔ مستقل از زمان در حرکت با شتاب ثابت می‌گفتند ولی در تمامی منابع امروزی فیزیک، این معادله را، معادلهٔ سرعت ــ جابه‌جایی می‌نامند، تا بر اساس متغیرهای اصلی این معادله نام‌گذاری شده باشد.

مثال ۱ــ۱۴، یکی از جامع‌ترین مثال‌های این فصل است که به مرور تمامی مفاهیمی که از ابتدای فصل تا اینجا به آن پرداخته‌ایم در این مثال مورد بررسی قرار می‌گیرد. لذا توصیه می‌شود که وقت کافی برای بررسی این مثال در کلاس درس بگذارید.

فصل ۱: حرکت بر خط راست

پرسش ۱ــ۷

نمودار شتاب ــ زمان متحرکی که در امتداد محور x حرکت می‌کند مطابق شکل زیر است. توضیح دهید چگونه هر یک از نمودارهای سرعت ــ زمان شکل‌های الف، ب و پ می‌توانند متناظر با این نمودار شتاب ــ زمان باشند.

(الف) (ب) (پ)

تمرین ۱ــ۱۰

آهویی در مسیری مستقیم در امتداد محور x می‌دود. نمودار سرعت ــ زمان آهو در بازهٔ زمانی صفر تا ۱۲/۰s مطابق شکل است. در این بازهٔ زمانی

الف) مسافت کل پیموده شده توسط آهو را به‌دست آورید.

ب) جابه‌جایی آهو را پیدا کنید.

پ) نمودار شتاب ــ زمان آهو را رسم کنید.

تمرین ۱ــ۱۱

شکل مقابل نمودار شتاب ــ زمان یک ماشین اسباب بازی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x حرکت می‌کند. با فرض $x_0=0$ و $v_0=0$، در بازهٔ زمانی صفر تا ۲۵/۰s،

الف) نمودارهای سرعت ــ زمان و مکان ــ زمان این ماشین را رسم کنید.

ب) با توجه به نمودار سرعت ــ زمان، مشخص کنید در کدام یک از بازه‌های زمانی، حرکت ماشین تندشونده، کُندشونده یا با سرعت ثابت است.

پ) شتاب متوسط ماشین را پیدا کنید.

ت) جابه‌جایی ماشین را پیدا کنید.

۱ــ۴ سقوط آزاد

وقتی گلوله‌ای را رها می‌کنیم از مقاومت هوا هنگام حرکت آن ناچیز است، ولی وقتی برگهٔ کاغذی را رها می‌کنیم از مقاومت هوا را هنگام حرکت آن نمی‌توان نادیده گرفت. با مقایسهٔ زمان سقوط گلوله و برگهٔ کاغذ، به‌سادگی می‌توان تفاوت از مقاومت هوا را روی حرکت این دو جسم تجربه کرد (شکل ۱ــ۱۵ الف). حال اگر برگهٔ کاغذ را مچاله کنیم، از مقاومت هوا هنگام سقوط آن به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد (شکل ۱ــ۱۵ ب). جسمی که تحت تأثیر جاذبهٔ گرانشی، در نزدیکی سطح

۲۱

پرسش ۱ــ۷

هر سه نمودار سرعت ــ زمان شکل‌های (الف)، (ب) و (پ) می‌تواند متناظر با نمودار شتاب ــ زمان باشد. دانش‌آموزان باید بتوانند برای هر کدام یک مثال از جهان واقعی بزنند. برای مثال می‌توان گفت :

نمودار سرعت ــ زمان شکل (الف) : خودرویی با سرعت ثابت و در جهت مثبت محور x در حال حرکت است که مانعی را در دوردست می‌بیند و با شتاب ثابت، تندی خود را کاهش می‌دهد و سپس با تندی کمتری در همان جهت اولیه، به حرکت خود ادامه می‌دهد.

نمودار سرعت ــ زمان شکل (ب) : خودرویی در جهت منفی محور x و با سرعت ثابت در حرکت است که پس از مدتی، با شتاب ثابت تندی خود را افزایش می‌دهد. پس از رسیدن خودرو به تندی مورد نظر، در همان جهت به حرکت خود ادامه می‌دهد.

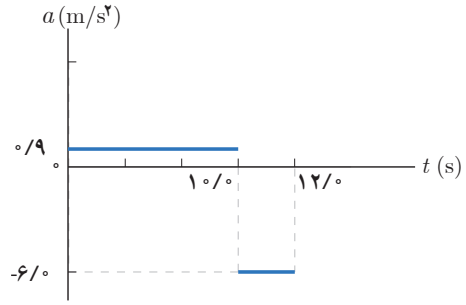
نمودار سرعت ــ زمان شکل (پ) : خودرویی در جهت مثبت محور x و با سرعت ثابت در حال حرکت است. پس از مدتی و با شتاب ثابت تندی خود را کاهش می‌دهد تا به صفر برسد. آنگاه با همان شتاب ولی در جهت منفی محور x، تندی خود را افزایش می‌دهد تا به مقدار مورد نظر برسد. سپس با همین تندی و در همان جهت (منفی محور x) به حرکت خود ادامه می‌دهد.

تمرین ۱ــ۱۰

همان‌طور که در مثال ۱ــ۱۲ اشاره شده است (جملهٔ آبی‌رنگ)، سطح بین نمودار سرعت ــ زمان و محور زمان در هر بازهٔ زمانی برابر جابه‌جایی در آن بازه است، دانش‌آموزان به سادگی می‌توانند قسمت‌های الف و ب را پاسخ دهند. دانش‌آموزان باید توجه کنند که با توجه به نمودار سرعت ــ زمان، در بازهٔ زمانی صفر تا ۱۲/۰s، سرعت متحرک مثبت است و مفهوم فیزیکی آن این است که آهو در این بازهٔ زمانی در جهت مثبت محور x حرکت کرده است. لذا چون آهو در یک جهت حرکت کرده است و در کل بازهٔ زمانی، جهت حرکت خود را تغییر نداده است، مسافت پیموده شده توسط آهو، با اندازهٔ بردار جابه‌جایی آهو برابر است.

(الف و ب) به این ترتیب با توجه به سطح زیر نمودار سرعت ــ زمان مسافت پیموده شده و جابه‌جایی آهو هر کدام برابر ۸۷m است.

پ) ابتدا شتاب آهو را در هر یک از بازه‌های زمانی ۰ تا ۱۰/۶ و همچنین ۱۰/۰s تا ۱۲s به‌دست می‌آوریم. اگر این شتاب‌ها را به ترتیب a_1 و a_2 نام‌گذاری کنیم، خواهیم داشت :



$$a_1 = \frac{(12/0 - 3/0)\,m/s}{10/0\,s} = 0/9\,m/s^2$$

$$a_2 = \frac{(0 - 12/0)\,m/s}{(12/0 - 10/0)\,s} = -6/0\,m/s^2$$

تمرین ۱ــ۱۱

الف) ابتدا سرعت متحرک را در هر یک از لحظه‌های $t = 5/0s$ و $t = 15/0s$ و همچنین $t = 25/0s$ به‌دست می‌آوریم. از معادلهٔ ۱ــ۷ دیدیم.

در لحظهٔ $t = 5/0s$:

$$v = at + v_0 = (2m/s^2)(5/0s) + 0 = 10/0m/s$$

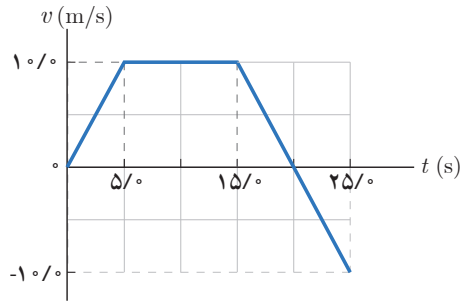
چون شتاب ماشین اسباب‌بازی در بازهٔ زمانی $5/0s$ تا $15/0s$ صفر است، در نتیجه، سرعت ماشین اسباب‌بازی در لحظهٔ $t=15/0s$ برابر سرعت آن در لحظهٔ $t = 5/0s$ است :

در لحظهٔ $t = 25/0s$:

$$v = at + v_0 = (-2/0m/s^2)(10/0s) + 10/0m/s = -10m/s$$

به این ترتیب نمودار سرعت ــ زمان متحرک مطابق شکل زیر است :

برای رسم نمودار مکان ــ زمان، مکان متحرک را در هر یک از لحظه‌های $t = 5/0s$، $t = 15/0s$، $t = 20/0s$ و $t = 25/0s$ پیدا می‌کنیم. از معادلهٔ $x = (\frac{v_1 + v_2}{2})\Delta t + x_0$ داریم :



در لحظهٔ $t = ۵/۰\,s$:
$$x = \left(\frac{۰ + ۱۰/۰\,m/s}{۲}\right)(۵/۰\,s) + ۰ = ۲۵/۰\,m$$

در لحظهٔ $t = ۱۵/۰\,s$: چون در بازهٔ زمانی $۵/۰\,s$ تا $۱۵/۰\,s$ متحرک با سرعت ثابت حرکت کرده است از معادلهٔ ۱ــ۷ داریم :

$$x = (۱۰/۰\,m/s)(۱۰/۰\,s) + ۲۵/۰\,m = ۱۲۵/۰\,m$$

اکنون باید ببینیم که در چه لحظه‌هایی از بازهٔ زمانی $۱۵/۰\,s$ تا $۲۵/۰\,s$ سرعت متحرک صفر می‌شود به این منظور از معادلهٔ سرعت و زمان (معادلهٔ ۱ــ۸) داریم :

$$v = at + v_۰ \Rightarrow ۰ = (-۲/۰\,m/s^۲)t + ۱۰/۰\,m/s \Rightarrow t = ۵/۰\,s$$

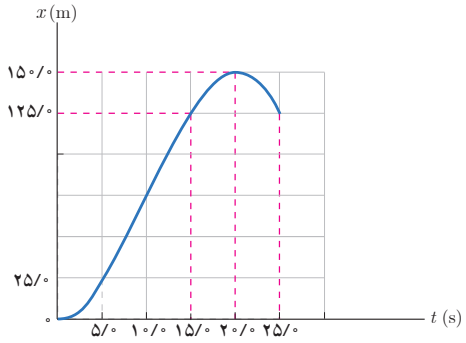
یعنی $۵/۰\,s$ پس از لحظهٔ $۱۵/۰\,s$ که متحرک با شتاب منفی به حرکت خود ادامه می‌دهد سرعت آن صفر می‌شود و باید شیب خط مماس بر منحنی مکان ــ زمان آن نیز صفر شود. به این ترتیب اکنون باید در لحظهٔ $t = (۵/۰ + ۱۵/۰)\,s = ۲۰/۰\,s$ مکان متحرک را پیدا کنیم.

$$x = \left(\frac{۱۰/۰\,m/s + ۰}{۲}\right)(۵/۰\,s) + ۱۲۵/۰\,m = ۱۵۰/۰\,m$$

همچنین در لحظه $t = ۲۵/۰\,s$ داریم :

$$x = \left(\frac{۰ - ۱۰/۰\,m/s}{۲}\right)(۵/۰\,s) + ۱۵۰/۰\,m = ۱۵۰/۰\,m = ۱۲۵/۰\,m$$

به این ترتیب با داشتن مکان متحرک در لحظه‌های مورد نظر و با توجه به اینکه در بازهٔ زمانی ۰ تا $۵/۰\,s$ حرکت تندشونده، در بازهٔ زمانی $۵/۰\,s$ تا $۱۵/۰\,s$ حرکت با سرعت ثابت، در بازهٔ زمانی $۱۵/۰\,s$ تا $۲۰/۰\,s$ حرکت کندشونده، در بازهٔ زمانی $۲۰/۰\,s$ تا $۲۵/۰\,s$ نیز حرکت کندشونده است، نمودار مکان ــ زمان متحرک مطابق شکل زیر خواهد بود.



ب) در قسمت (الف) اشاره شده است.

پ)
$$a_{av} = \frac{v_۲ - v_۱}{t_۲ - t_۱} = \frac{(-۱۰/۰ - ۰)\,m/s}{(۲۵/۰ - ۰)\,s} = -۰/۴\,m/s^۲$$

ت) با توجه به نمودار مکان ــ زمان که در قسمت الف رسم کردیم، مکان اولیه و پایانی متحرک را در اختیار داریم. به این ترتیب می‌توان نوشت :

جابه‌جایی کل $\Delta x = ۱۲۵/۰\,m - ۰ = ۱۲۵/۰\,m$

توجه

راهبردهای حل مسئله در حرکت با شتاب ثابت قبل از مسئله ۱۴ پایان فصل آمده است. این راهبردها را می‌توانید با دانش‌آموزان در میان بگذارید.

تمرین‌های پیشنهادی بخش ۱ــ۳

۱ متحرکی در مسیری مستقیم با شتاب ثابت حرکت می‌کند. سرعت اولیه و شتاب این متحرک به ترتیب ۴m/s و ۴m/s^2 است. سرعت متوسط متحرک در دو ثانیه اول حرکت چند m/s است؟

الف) ۸ ب) ۱۰ پ) ۱۲ ت) ۱۴

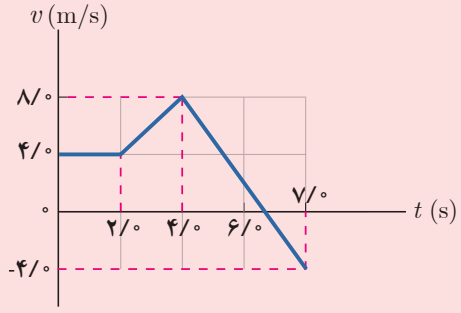
۲ دو متحرک به‌طور هم‌زمان، از حال سکون و از یک نقطه به حرکت درمی‌آیند. یکی با شتاب a و دیگری با شتاب $(a+2)$ در SI. پس از t ثانیه، سرعت آنها به ترتیب به ۱۰ و ۱۲ متر بر ثانیه می‌رسد. شتاب a چقدر است؟

۳ خودرویی از حال سکون و با شتاب ثابت در امتداد محور x شروع به حرکت می‌کند و پس از ۳ ثانیه سرعت آن به ۱۸km/h می‌رسد.

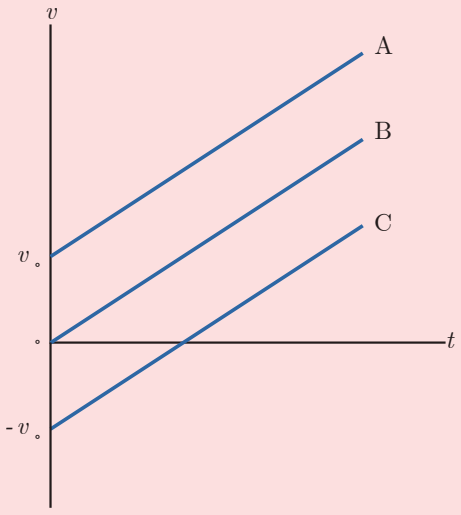
الف) معادلهٔ سرعت ــ زمان اتومبیل را بنویسید.

ب) نمودار سرعت ــ زمان اتومبیل را رسم و سرعت آن را ۱۰ ثانیه پس از شروع حرکت پیدا کنید.

۴ نمودار $v-t$ متحرکی که در امتداد خط راست حرکت می‌کند مطابق شکل روبه‌رو است. شتاب متحرک را در هر بازهٔ زمانی پیدا کنید.



۵ نمودار $v-t$ سه متحرک بر مسیر مستقیم مطابق شکل روبه‌رو است. معادلهٔ سرعت ــ زمان هر متحرک را بنویسید.



۶ معادلهٔ سرعت ــ زمان سه متحرک به ترتیب $v = a_A t + v_0$، $v = -a_B t$ و $v = -a_C t - v_0$ است، که در آن $a_A = a_B = a_C > 0$ و v_0 عددی مثبت است. نمودار سرعت ــ زمان این سه متحرک را در یک دستگاه مختصات رسم کنید.

۷ مارهای زنگی قادرند هنگام شکار، سر خود را با شتاب $50\,m/s^2$ به حرکت درآورند. اگر خودرویی می‌توانست این شتاب را بگیرد، چقدر طول می‌کشید تا با حرکت بر خط راست، از حال سکون به سرعت $108\,km/h$ برسد؟

۸ قطاری با سرعت $96\,km/h$ و در امتداد محور x حرکت می‌کند. چند ثانیه باید با شتاب $2\,m/s^2$ ترمز کند تا به سرعت $24\,km/h$ برسد؟

الف) ۵ ب) ۱۰ پ) ۱۵ ت) ۲۰

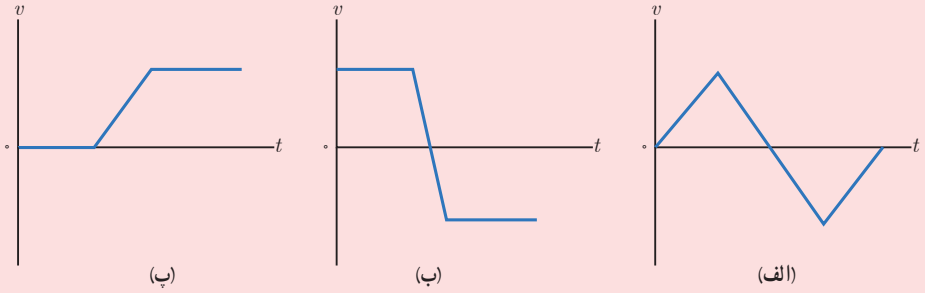
۹ سرعت متوسط خودرویی که از حال سکون با شتاب $1/6\,m/s^2$ در امتداد محور x به حرکت درمی‌آید در ۵ ثانیهٔ اول حرکت چند m/s است؟

الف) ۴ ب) ۸ پ) ۶ ت) ۱۰

۱۰ در شکل زیر سه نمودار سرعت ــ زمان سه متحرک که در امتداد محور x در حرکت‌اند رسم شده است. برای هر نمودار :

الف) نمودار شتاب ــ زمان نظیر آن را رسم کنید.

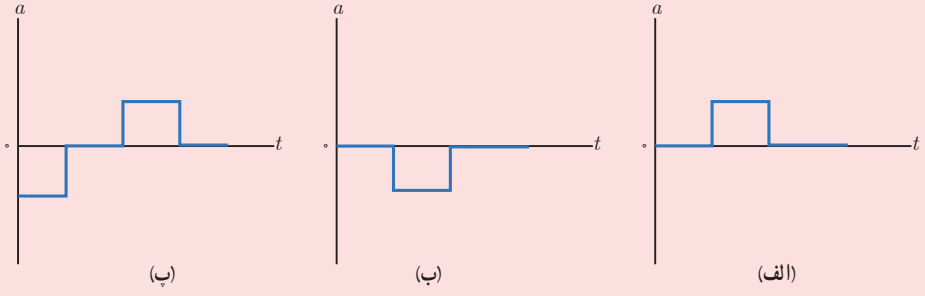
ب) شرح کوتاهی برای نوع حرکت هر یک بنویسید.



۱۱ در شکل زیر سه نمودار شتاب ــ زمان رسم شده است. برای هر کدام،

الف) نمودار سرعت ــ زمان نظیر آن را رسم کنید. فرض کنید حرکت جسم در امتداد محور x و $v_0 = 0$ است.

ب) شرح کوتاهی برای نوع حرکت هریک بنویسید.

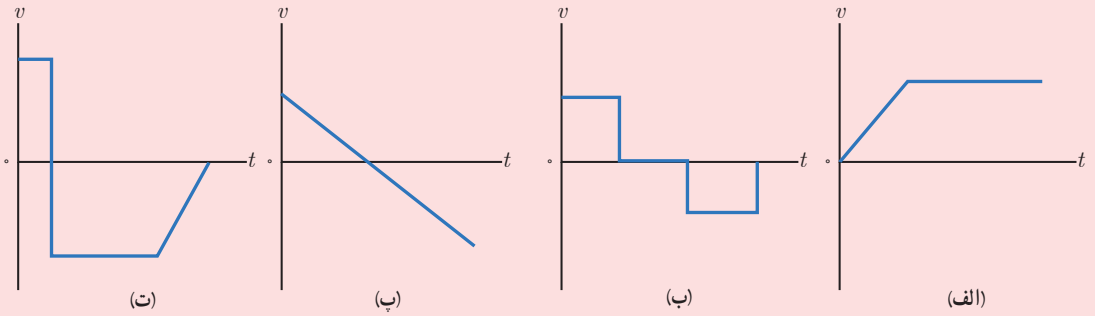


۱۲ در شکل زیر چهار نمودار سرعت ــ زمان رسم شده است. برای هر نمودار

الف) نمودار شتاب ــ زمان نظیر آن را رسم کنید.

ب) شرح کوتاهی برای نوع حرکت هر یک بنویسید.

فرض کنید حرکت جسم در امتداد محور x و $x_0 = 0$ است.

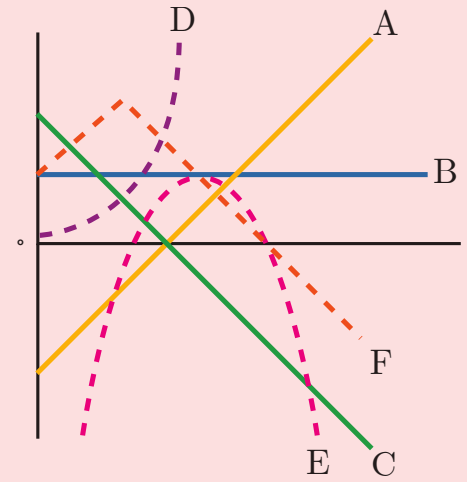


۱۳ شکل روبه‌رو چند نمودار را با محورهای بدون علامت نشان می‌دهد.

الف) کدام نمودار سرعت بر حسب زمان را برای جسمی که با سرعت ثابت و در امتداد محور x در حرکت است بهتر نشان می‌دهد.

ب) کدام نمودار مکان بر حسب زمان را برای جسمی که با شتاب منفی ثابت و در امتداد محور x در حرکت است بهتر نشان می‌دهد؟

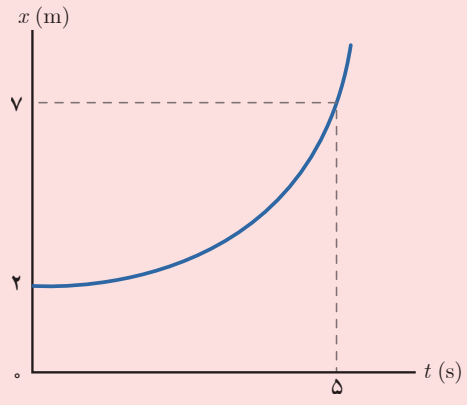
پ) اگر نمودار E مکان بر حسب زمان را نشان دهد، کدام نمودار سرعت بر حسب زمان آن را بهتر نشان می‌دهد؟



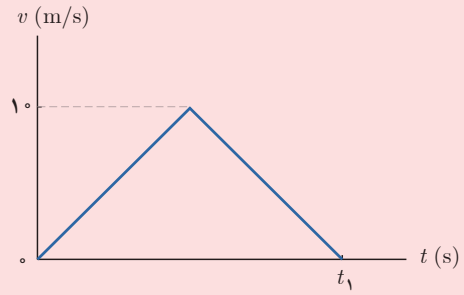
۱۴ نمودار مکان ــ زمان متحرکی که از حال سکون با شتاب ثابت بر خط راست به حرکت درمی‌آید مطابق شکل روبه‌رو است :

الف) سرعت متحرک را در لحظهٔ $t = 5s$ چقدر است؟

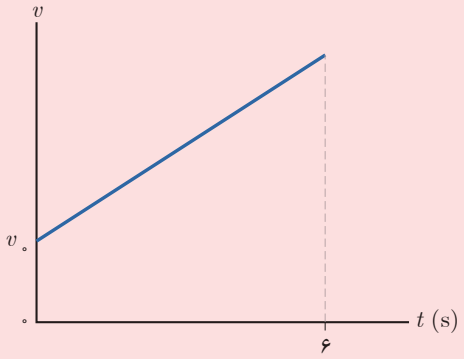
ب) نمودار سرعت ــ زمان این متحرک را رسم کنید.



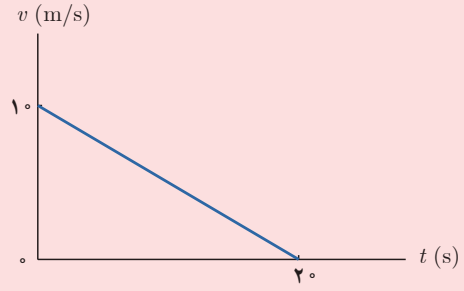
۱۵ نمودار سرعت ــ زمان متحرکی که بر خط راست حرکت می‌کند مطابق شکل روبه‌رو است : اگر مسافت پیموده شده توسط متحرک تا لحظهٔ t_1 برابر ۵۵m باشد، t_1 چقدر است؟



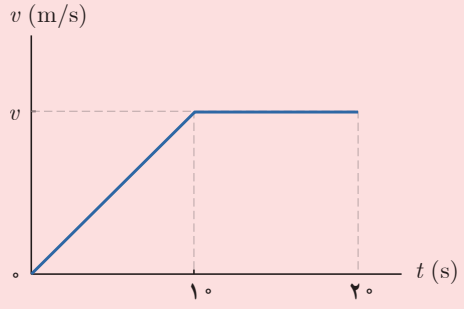
۱۶ نمودار سرعت ــ زمان متحرکی در مدت ۶ ثانیهٔ اول حرکت مطابق شکل روبه‌رو است : در چه لحظه‌ای سرعت آن با سرعت متوسط در کل زمان ۶ ثانیه برابر است؟



۱۷ نمودار t ــ v متحرکی که بر مسیری مستقیم در حرکت است مطابق شکل روبه‌رو است : معادلهٔ مکان ــ زمان این متحرک را پیدا کنید. در $t = ۰$ متحرک از مبدأ مکان عبور کرده است.



۱۸ نمودار t ــ v متحرکی که روی خط راست حرکت می‌کند مطابق شکل روبه‌رو است : اگر سرعت متوسط متحرک در مدت ۲۰ ثانیه برابر ۱۸m/s باشد، v چقدر است؟



۱۹ سرعت متحرکی در یک مسیر مستقیم در مکان $x_1 = ۴m$ برابر ۸m/s است. اگر شتاب حرکت $\frac{۹}{۴} m/s^۲$ باشد، در چه مکانی سرعت متحرک برابر ۱۰m/s است؟

۲۰ متحرکی با شتاب ثابت بر مسیر مستقیم حرکت می‌کند. اگر سرعت آن در مکان $x_1 = 8\,m$ برابر $2\,m/s$ و در مکان $x_2 = 18\,m$ برابر $4\,m/s$ باشد، شتاب حرکت چند m/s^2 است؟

۲۱ معادلهٔ مکان ــ زمان متحرکی در SI به‌صورت $x = -t^2 + 4t + 20$ است. حرکت آن از مبدأ زمان تا لحظهٔ $t = 8s$ چگونه است؟

الف) همواره کندشونده ب) همواره تندشونده پ) ابتدا کندشونده و سپس تندشونده ت) ابتدا تندشونده و سپس کندشونده

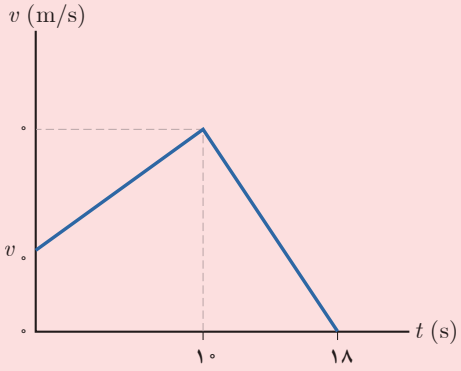
۲۲ جسمی با سرعت اولیهٔ $4\,m/s$ و شتاب ثابت $1\,m/s^2$ از مکان $x_0 = -8\,m$ در امتداد محور x به حرکت درمی‌آید. این متحرک پس از ۱۰ ثانیه در چند متری مبدأ مکان است؟

۲۳ خودوریی با شتاب ثابت و در امتداد محور x از سرعت خود می‌کاهد و پس از ۴ ثانیه و طی مسافت $50\,m$ می‌ایستد.

الف) سرعت آن درست در لحظه‌ای که از سرعت خود می‌کاهد چقدر است؟

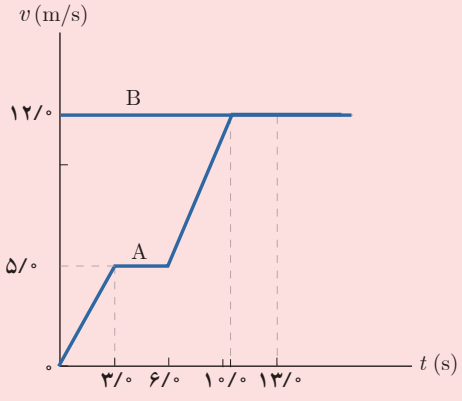
ب) نمودارهای مکان، سرعت، و شتاب ــ زمان خودرو را در ۴ ثانیهٔ آخر حرکت آن رسم کنید. فرض کنید درست در لحظه‌ای که خودرو از سرعت خود می‌کاهد، از مبدأ مکان می‌گذرد.

۲۴ شکل زیر نمودار v ــ t متحرکی را در مسیری مستقیم نشان می‌دهد. اگر سرعت متوسط متحرک در مدت ۱۸ ثانیه برابر $\frac{20}{3}\,m/s$ باشد، v_0 چقدر است؟



۲۵ اتوبوسی در ایستگاه ایستاده است. شخصی با سرعت ثابت v می‌دود تا به اتوبوس برسد. وقتی فاصلهٔ این شخص تا اتوبوس $8\,m$ است، اتوبوس با شتاب $1\,m/s^2$ شروع به حرکت می‌کند. اگر سرعت شخص تغییر نکند، سرعت او دست کم چقدر باید باشد تا به اتوبوس برسد؟

۲۶ دو متحرک A و B روی یک خط راست و در یک جهت حرکت می‌کنند. نمودار سرعت ــ زمان این دو متحرک که در لحظهٔ $t = 0$ در یک مبدأ بوده‌اند مطابق شکل روبه‌رو است. این دو متحرک :



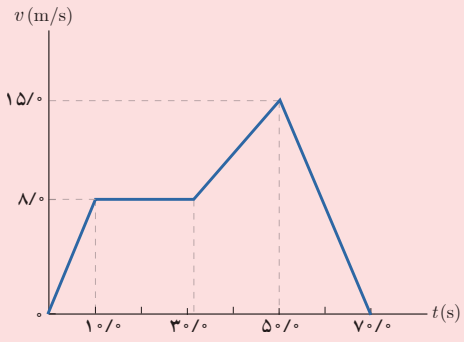
الف) در ۱۵۶ متری مبدأ به هم می‌رسند.

ب) پس از ۱۰ ثانیه به هم می‌رسند.

پ) پس از ۱۳ ثانیه به هم می‌رسند.

ت) اصلاً به هم نمی‌رسند.

۲۷ نمودار سرعت ــ زمان موتورسواری که در امتداد محور x حرکت می‌کند مطابق شکل روبه‌رو است :



الف) نوع حرکت و شتاب موتورسوار را در هر بازهٔ زمانی تعیین کنید.

ب) سرعت موتورسوار در لحظهٔ $t = ۲۰\,s$ چقدر است؟

پ) مسافت طی شده در کل مسیر چقدر است؟

۲۸ معادلهٔ مکان ــ زمان متحرکی در SI که در امتداد محور x حرکت می‌کند به‌صورت $x = -۵t^۲ + ۶t + ۱۲$ است. در مورد جهت و نوع حرکت کدام مطلب درست است؟

الف) همواره در جهت محور و کندشونده

ب) همواره در خلاف جهت محور و کندشونده

پ) همواره در جهت محور و تندشونده

ت) همواره در خلاف جهت محور و تندشونده

ث) ابتدا در جهت محور و کندشونده

ج) ابتدا در خلاف جهت محور و کندشونده

۱ـ۴ـ سقوط آزاد

راهنمای تدریس : همان‌طور که در کتاب درسی نیز اشاره شده است، حرکت سقوط آزاد را با نادیده گرفتن عواملی، می‌توان به‌صورت نوعی حرکت با شتاب ثابت در نظر گرفت، که در امتداد قائم (محور y) انجام می‌شود. ابتدا به اندازهٔ کافی روی چگونگی مدل‌سازی حرکت سقوط آزاد بحث کنید و سپس به استخراج معادله‌های سقوط آزاد برای حالت خاصی که صرفاً جسم از نقطه‌ای معین نسبت به سطح زمین رها شده است بپردازید. به‌طور کلی سقوط آزاد و معادله‌های آن را، برای حرکت هر جسمی که روبه بالا یا روبه‌پایین به‌طور آزادانه و صرفاً تحت تأثیر گرانش زمین در حرکت است می‌توان در نظر گرفت. همان‌طور که اشاره شد آموزش و ارزشیابی این کتاب برای حالت خاصی از سقوط آزاد است و حالت‌های دیگر جزء برنامهٔ آموزشی و ارزشیابی این کتاب نیستند. بنابراین توصیه جدی می‌شود تا همکاران محترم به محدودهٔ بحث سقوط آزاد و مسائلی که باید مورد بحث قرار گیرند توجه کافی داشته باشند.

انتخاب جهت مثبت برای حرکت سقوط آزاد اختیاری است ولی در کتاب درسی، برای هماهنگی با آموخته‌های قبلی دانش‌آموزان و همچنین آشنایی با بحث سقوط آزاد که سال‌های بعد در کتاب‌های درسی دانشگاهی فیزیک پایه دانشجویان با آن مواجه می‌شوند جهت روبه‌بالا را مثبت در نظر گرفته‌ایم.

$$y=-\frac{1}{2}gt^2+y_0 \Rightarrow y=-\frac{1}{2}(9/8\,\mathrm{m/s^2})(1/0\,\mathrm{s})^2+0 \Rightarrow y\approx -4/9\,\mathrm{m}$$

جابه‌جایی گلوله در این مدت $-4/9\,\mathrm{m}$ و مسافت طی شده $4/9\,\mathrm{m}$ است.

همچنین با استفاده از معادلهٔ ۱ـ۱۲ سرعت گلوله پس از $1/0\,\mathrm{s}$ برابر است با :

$$v=-gt=-(9/8\,\mathrm{m/s^2})(1/0\,\mathrm{s})=-9/8\,\mathrm{m/s}$$

حرکت سقوط آزاد، حرکتی با شتاب ثابت $g=9/8\,\mathrm{m/s^2}$ است، لذا با توجه به مفهوم شتاب، تندی گلوله در هر ثانیه $9/8\,\mathrm{m/s}$ افزایش می‌یابد. به‌طوری که تندی گلوله در پایان ثانیهٔ اول به $9/8\,\mathrm{m/s}$ می‌رسد.

ب) برای پیدا کردن سرعت برخورد گلوله با زمین از معادلهٔ ۱ـ۱۴ داریم :

$$v^2=-2g(y-y_0)=-2(9/8\,\mathrm{m/s^2})(-10/0\,\mathrm{m}-0)=196\,\mathrm{m^2/s^2} \Rightarrow v=\pm 14\,\mathrm{m/s}$$

چون جهت بالا را مثبت فرض کردیم، علامت منفی برای سرعت برخورد گلوله با سطح زمین قابل قبول است، یعنی $v=-14\,\mathrm{m/s}$.

به دو روش می‌توان زمان کل را به‌دست آورد. از معادله‌های ۱ـ۱۲ و ۱ـ۱۳ داریم :

$$v=-gt \Rightarrow -14/0\,\mathrm{m/s}=-(9/8\,\mathrm{m/s^2})t \Rightarrow t=1/4\,\mathrm{s}$$

$$y=-\frac{1}{2}gt^2+y_0=-10\,\mathrm{m}=-\frac{1}{2}(9/8\,\mathrm{m/s^2})t^2+0 \Rightarrow t^2=2/0 \Rightarrow t=1/4\,\mathrm{s}$$

مثال ۱ـ ۱۶

سنگی از صخره‌ای به ارتفاع $122/5\,\mathrm{m}$ نسبت به سطح زمین آزادانه سقوط می‌کند.

الف) زمان سقوط آزاد سنگ را به‌دست آورید.

ب) سرعت متوسط سنگ را در حین سقوط آزاد پیدا کنید.

پ) جابه‌جایی سنگ را بین دو لحظهٔ $t_1=3/0\,\mathrm{s}$ و $t_2=4/0\,\mathrm{s}$ به‌دست آورید.

ت) نمودارهای مکان ـ زمان، سرعت ـ زمان و شتاب ـ زمان سنگ را رسم کنید.

پاسخ : الف) جهت بالا را مثبت و مبدأ مکان را محل رها شدن سنگ فرض می‌کنیم. به این ترتیب از معادلهٔ ۱ـ۱۳ داریم :

$$y=-\frac{1}{2}gt^2+y_0 \Rightarrow -122/5\,\mathrm{m}=-\frac{1}{2}(9/8\,\mathrm{m/s^2})t^2+0 \Rightarrow t=5/0\,\mathrm{s}$$

ب) رابطهٔ ۱ـ۴ را برای امتداد قائم می‌توان به‌صورت $v_{av}=\Delta y/\Delta t$ در نظر گرفت. به این ترتیب داریم :

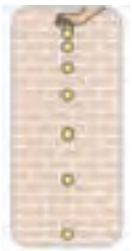
$$v_{av}=\frac{\Delta y}{\Delta t}=\frac{-122/5\,\mathrm{m}}{5/0\,\mathrm{s}}=-24\,\mathrm{m/s}$$

پ) ابتدا با استفاده از رابطهٔ ۱ـ۱۳ جابه‌جایی سنگ را تا هر یک از لحظه‌های $t_1=3/0\,\mathrm{s}$ و $t_2=4/0\,\mathrm{s}$ پیدا می‌کنیم. سپس با کم کردن این دو جابه‌جایی از یکدیگر، جابه‌جایی سنگ بین این دو لحظه به‌دست می‌آید.

$$y=-\frac{1}{2}gt^2+y_0 \Rightarrow y_1=-\frac{1}{2}(9/8\,\mathrm{m/s^2})(3/0\,\mathrm{s})^2+0 \Rightarrow y_1=-44\,\mathrm{m}$$

$$y=-\frac{1}{2}gt^2+y_0 \Rightarrow y_2=-\frac{1}{2}(9/8\,\mathrm{m/s^2})(4/0\,\mathrm{s})^2+0 \Rightarrow y_2=-78\,\mathrm{m}$$

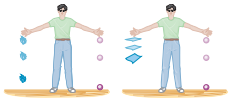
$$\Delta y=y_2-y_1=-78\,\mathrm{m}-(-44\,\mathrm{m})=-34\,\mathrm{m}$$



شکل ۱ـ۱۷ تصویری از یک توپ در حال سقوط آزاد، که در بازه‌های زمانی مساوی و متوالی رسم شده است.

زمین سقوط می‌کند و اثر مقاومت هوا را بتوان برای آن نادیده گرفت، آشناترین مثال برای حرکت با شتاب ثابت است. این حرکت آرمانی، **سقوط آزاد** نامیده می‌شود. شکل ۱ـ۱۶ تصویری بی‌دررپی از یک توپ در حال سقوط آزاد را نشان می‌دهد که برای بازه‌های زمانی مساوی رسم شده است. فاصلهٔ رو به افزایش بین تصویرها نشان می‌دهد که سرعت توپ به‌طور پیوسته در حال افزایش است؛ یعنی توپ به طرف پایین شتاب می‌گیرد.

حرکت سقوط آزاد، افزون بر رها کردن جسم، شامل پرتاب کردن جسم رو به پایین یا رو به بالا نیز می‌شود. در هر سه حالت یاد شده، جهت شتاب رو به پایین و اندازهٔ آن ثابت است و معمولاً $g=9/8\,\mathrm{m/s^2}$ فرض می‌شود. در اینجا تنها حرکت سقوط آزاد اجسام بدون سرعت اولیه بررسی می‌شود[1].



شکل ۱ـ۱۵ تجربه‌ای ساده برای مقایسهٔ اثر مقاومت هوا روی حرکت سقوط آزاد گلوله، برگهٔ کاغذ و برگهٔ کاغذ مچاله شده

سقوط آزاد بدون سرعت اولیه : با توجه به اینکه در این کتاب تنها سقوط آزاد بدون سرعت اولیه بررسی می‌شود، معادله‌های مورد استفاده برای حل مسئله‌های این حرکت، با فرض اینکه جهت رو به بالا را مثبت بگیریم، با قرار دادن $v_0=0$، y به‌جای x و $-g$ به‌جای a در معادله‌های حرکت با شتاب ثابت بر مسیر مستقیم به‌دست می‌آید. به این ترتیب معادله‌های سقوط آزاد بدون سرعت اولیه به‌صورت زیر است :

$$v=-gt \qquad (۱۲ـ۱)$$

$$y=-\frac{1}{2}gt^2+y_0 \qquad (۱۳ـ۱)$$

$$v^2=-2g(y-y_0) \qquad (۱۴ـ۱)$$

اگر در $t=0$ جسم در مبدأ مکان باشد ($y_0=0$) معادله‌ها را به شکل ساده‌تری نیز می‌توان نوشت.

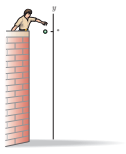
مثال ۱ـ ۱۵

شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که از بالای دیواری بلند، گلوله‌ای را رها می‌کند.

الف) پس از $1/0\,\mathrm{s}$ گلوله چه مسافتی را طی می‌کند و سرعت آن به چقدر می‌رسد؟

ب) اگر ارتفاع دیوار $10/0\,\mathrm{m}$ باشد سرعت برخورد گلوله به سطح زمین و مدت زمان کل حرکت آن را پیدا کنید.

پاسخ : الف) جهت بالا را مثبت و مبدأ مکان را محل رها شدن جسم فرض می‌کنیم. به این ترتیب از معادلهٔ ۱ـ۱۳ داریم :



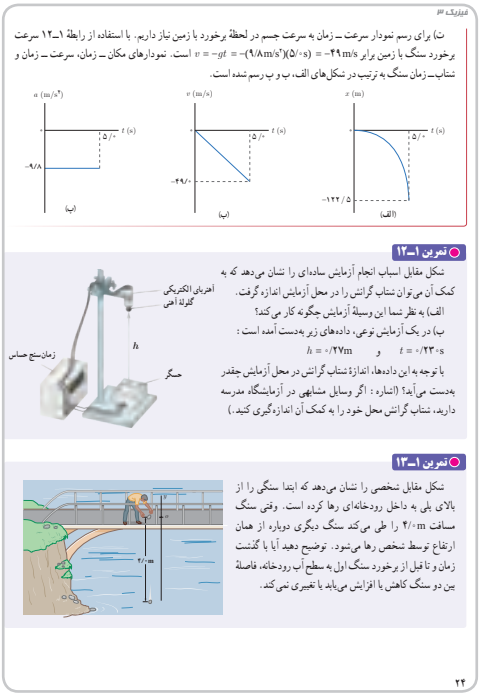
[1] ـ آموزش سایر حالت‌های سقوط آزاد خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

تمرین ۱ــ ۱۲

الف) لحظهٔ قطع جریان در آهنربای الکتریکی و رها شدن گلوله، تا لحظهٔ برخورد آن به حسگر، توسط زمان‌سنج حساس اندازه‌گیری می‌شود. با خواندن t از روی زمان‌سنج و اندازه‌گیری h، به سادگی می‌توان g را در محل انجام آزمایش اندازه‌گیری کرد.

ب) از رابطهٔ ۱ــ ۱۳ و با فرض $y_0 = 0$ داریم :

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 \Rightarrow -0/27\,\text{m} = \frac{1}{2}g(0/23\,\text{s})^2 + 0 \Rightarrow g = 10/02\,\text{m/s}^2$$



فیزیک ۳

ت) برای رسم نمودار سرعت ــ زمان به سرعت جسم در لحظهٔ برخورد با زمین نیاز داریم. با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۱۲ سرعت برخورد سنگ با زمین برابر $v = -gt = -(9/8\,\text{m/s}^2)(5/0\,\text{s}) = -49\,\text{m/s}$ است. نمودارهای مکان ــ زمان، سرعت ــ زمان و شتاب ــ زمان سنگ به ترتیب در شکل‌های الف، ب و پ رسم شده است.

$a\ (\text{m/s}^2)$ $v\ (\text{m/s})$ $x\ (\text{m})$ $t\ (\text{s})$ $5/0$ $-9/8$ $-49/0$ $-122/5$ (پ) (ب) (الف)

تمرین ۱ــ ۱۲

شکل مقابل اسباب انجام آزمایش ساده‌ای را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان شتاب گرانش را در محل آزمایش اندازه گرفت.

الف) به نظر شما این وسیلهٔ آزمایش چگونه کار می‌کند؟

ب) در یک آزمایش نوعی، داده‌های زیر به‌دست آمده است :

$t = 0/23\,\text{s}$ و $h = 0/27\,\text{m}$

با توجه به این داده‌ها، اندازهٔ شتاب گرانش در محل آزمایش چقدر به‌دست می‌آید؟ (اشاره : اگر وسایل مشابهی در آزمایشگاه مدرسه دارید، شتاب گرانش محل خود را به کمک آن اندازه‌گیری کنید.)

آهربای الکتریکی گلولهٔ آهنی h زمان‌سنج حساس حسگر

تمرین ۱ــ ۱۳

شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که ابتدا سنگی را از بالای پلی به داخل رودخانه‌ای رها کرده است. وقتی سنگ مسافت $2/0\,\text{m}$ را طی می‌کند سنگ دیگری دوباره از همان ارتفاع توسط شخص رها می‌شود. توضیح دهید آیا با گذشت زمان و تا قبل از برخورد سنگ اول به سطح آب رودخانه، فاصلهٔ بین دو سنگ کاهش یا افزایش می‌یابد یا تغییری نمی‌کند.

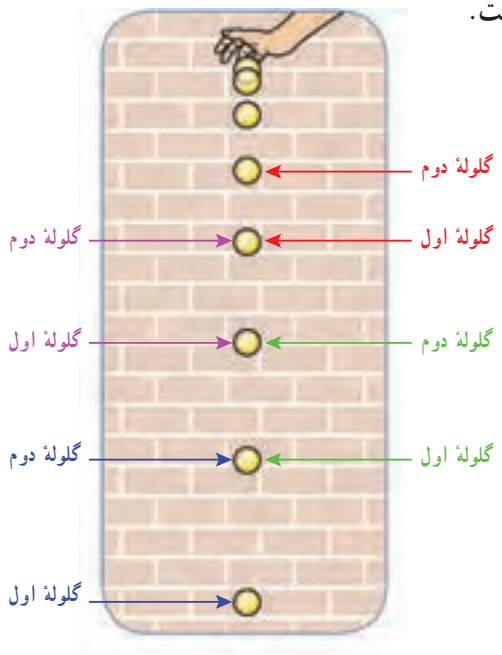
$2/0\,\text{m}$

۲۲

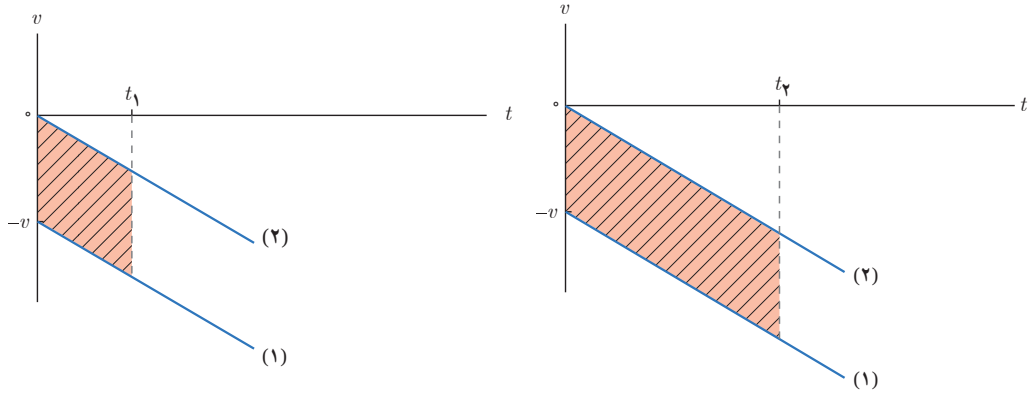
تمرین ۱ــ ۱۳

به چندین روش می‌توان این تمرین را بررسی و پاسخ داد.

به کمک شکل ۱ــ۱۶ : هر دو گلولهٔ متوالی در این شکل، نمایندهٔ گلولهٔ دوم و اول هستند که در پی هم رها شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود (با شمارش تعداد آجرها در امتداد قائم)، هرچه دو گلولهٔ متوالی انتخاب شده پایین‌تر باشند، فاصلهٔ آنها از یکدیگر بیشتر است.



به کمک نمودار سرعت ــ زمان : اگر لحظهٔ $t=0$ را، لحظه‌ای در نظر بگیریم که گلولهٔ دوم رها می‌شود، در این صورت وقتی گلولهٔ دوم رها می‌شود، گلولهٔ اول، به سرعت v رسیده است. لذا اختلاف سطح زیر نمودار سرعت ــ زمان این دو گلوله برای هر لحظهٔ دلخواه نسبت به لحظهٔ دلخواه ماقبل آن افزایش یافته است.



قسمت‌های هاشور خورده اختلاف جابه‌جایی بین دو سنگ را در دو لحظهٔ t_1 و t_2 نشان می‌دهد $(t_2 > t_1)$. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش t، تفاوت سطح زیر نمودار $v-t$ دو سنگ افزایش می‌یابد و این بدان‌معناست که با گذشت زمان، فاصلهٔ بین دو سنگ افزایش می‌یابد.

به کمک رابطهٔ ۱ــ۱۳ : با نوشتن معادلهٔ حرکت دو گلوله داریم $(y_0 = 0)$

$$y_1 = -\frac{1}{2}gt^2$$

$$y_2 = -\frac{1}{2}g(t-t')^2$$

توجه کنید که گلولهٔ دوم چون بعد از گلولهٔ اول رها شده است، زمان کمتری در راه بوده است. بنابراین

$$y_1 - y_2 = -\frac{1}{2}gt^2 + \frac{1}{2}g(t^2 + t'^2 - 2tt') = -gt't + \frac{1}{2}gt'^2$$
$$= At + B$$

از آنجا که g و t' (و در نتیجه A و B) مقادیر ثابتی هستند، لذا همان‌طور که دیده می‌شود اختلاف ارتفاع بین دو گلوله، تابعی از زمان t است و با افزایش t، روبه افزایش است.

تمرین‌های پیشنهادی بخش ۱ــ۴

۱ گلوله‌ای را از ارتفاع ۸۰ متری سطح زمین رها می‌کنیم.
الف) گلوله پس از چه مدت به زمین می‌رسد؟
ب) سرعت آن در لحظهٔ برخورد به زمین چقدر است؟
پ) سرعت متوسط گلوله در مدت این حرکت چقدر است؟
ت) مسافتی که گلوله در ثانیهٔ آخر حرکت خود طی می‌کند چقدر است؟

۲ گلوله‌ای را باید از چه ارتفاعی رها کنیم تا پس از ۱۰s به زمین برسد؟ سرعت گلوله در نیمهٔ راه و همچنین در لحظهٔ برخورد به زمین چقدر است؟

۳ سنگی از ارتفاع ۵۰ متری بام ساختمانی رها می‌شود.
الف) سرعت متوسط سنگ در طول مسیر چقدر است؟
ب) نمودار سرعت ــ زمان سنگ را رسم کنید.
پ) با محاسبهٔ سطح زیر نمودار سرعت ــ زمان سنگ، ارتفاعی را که سنگ سقوط کرده است پیدا و با ارتفاع ساختمان مقایسه کنید.

۴ جسمی را در شرایط خلأ از یک بلندی رها می‌کنیم و پس از مدتی با سرعت ۳۰m/s به زمین برخورد می‌کند. ارتفاع بلندی چند متر است؟

۵ گلوله‌ای در شرایط خلأ و بدون سرعت اولیه از ارتفاعی رها می‌شود و در ثانیهٔ اول حرکت مسافتی به اندازهٔ h_1 و در ثانیهٔ دوم مسافت h_2 را طی می‌کند. نسبت $\frac{h_2}{h_1}$ را پیدا کنید.

۶ دو گلوله به فاصلهٔ زمانی یک ثانیه از نقطه‌ای به ارتفاع h در شرایط خلأ رها می‌شوند. اگر بیشترین فاصلهٔ بین آنها در طول حرکت ۴۵m باشد، ارتفاع h چند متر است؟

۷ گلولهٔ A را در شرایط خلأ از ارتفاع h بدون سرعت اولیه رها می‌کنیم. سه ثانیه بعد گلولهٔ B را از ارتفاع $\frac{h}{4}$ بدون سرعت اولیه رها می‌کنیم. نسبت سرعت گلولهٔ A به سرعت گلولهٔ B در لحظهٔ رسیدن به زمین کدام است؟

الف) $\frac{2}{3}$ ب) ۱ پ) ۲ ت) $\frac{9}{4}$

۸ گلولهٔ کوچکی از ارتفاعی بالای سطح زمین بدون سرعت اولیه رها می‌شود و ۸۰ متر آخر سقوط را در مدت ۲ ثانیه می‌پیماید. ارتفاع کل سقوط گلوله چند متر است؟

۹ سنگی از بام ساختمانی بدون سرعت اولیه و در شرایط خلأ به طرف زمین رها می‌شود.
الف) اگر سنگ در ۲ ثانیهٔ آخر حرکت خود ۶۰ متر را طی کند، ارتفاع ساختمان چند متر است؟
ب) سرعت سنگ درست پیش از برخورد به زمین چقدر است؟

۱۰ گلوله‌ای از ارتفاع ۸۰ متری بدون سرعت اولیه و در شرایط خلأ از بالای برجی به طرف زمین رها می‌شود. در لحظه‌ای که گلوله به ۲۰ متری سطح زمین می‌رسد، سرعت آن چه کسری از سرعت آن در لحظهٔ رسیدن به زمین است؟

راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱

۱ــ۱ شناخت حرکت

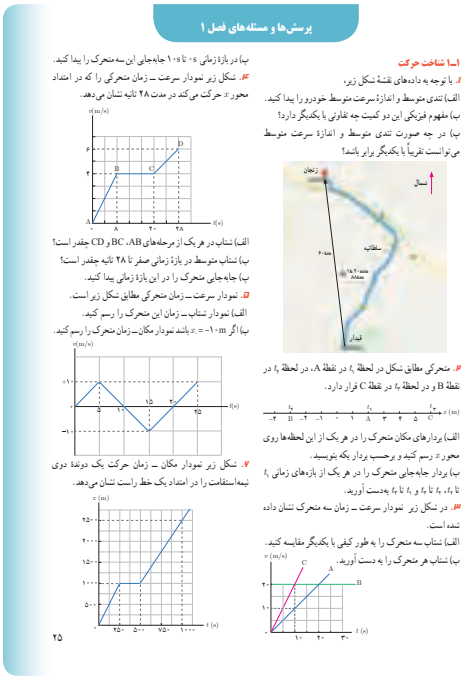
۱ الف)

$$s_{av} = \frac{l}{\Delta t} = \frac{۸۸\text{km}}{\frac{۴}{۳}h} = ۶۶\text{km/h}$$

$$v_{av} = \frac{d}{\Delta d} = \frac{۶۰\text{km}}{\frac{۴}{۳}h} = ۴۵\text{km/h}$$

ب) مفهوم فیزیکی تندی متوسط اشاره بر این دارد که خودرو به‌طور میانگین در هر ساعت چه مسافتی از مسیر را پیموده است. در حالی که مفهوم فیزیکی سرعت متوسط، اشاره بر این نکته دارد که خودرو به‌طور میانگین در هر ساعت چقدر به مقصد خود نزدیک‌تر شده است. (یعنی در جهت بردار جابه‌جایی حرکت کرده است.)

پ) اگر مسیر جاده بین مبدأ و مقصد تقریباً مستقیم باشد در این صورت تندی متوسط با اندازهٔ سرعت متوسط تقریباً برابر خواهد شد. در ادامهٔ این مسئله می‌توانید از دانش‌آموزان بخواهید تا مسیرهای دسترسی بین شهرهای استان محل اقامت خود را از این منظر بررسی کنند.


پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱

۱ــ۱ شناخت حرکت

۱. با توجه به داده‌های نقشهٔ شکل زیر،
الف) تندی متوسط و اندازهٔ سرعت متوسط خودرو را پیدا کنید.
ب) مفهوم فیزیکی این دو کمیت چه تفاوتی با یکدیگر دارد؟
پ) در چه صورت تندی متوسط و اندازهٔ سرعت متوسط می‌توانند تقریباً با یکدیگر برابر باشند؟

۲. متحرکی مطابق شکل در لحظهٔ t_1 در نقطهٔ A، در لحظهٔ t_2 در نقطهٔ B و در لحظهٔ t_3 در نقطهٔ C قرار دارد.
الف) بردارهای مکان متحرک را در هر یک از این لحظه‌ها روی محور x رسم کنید و برحسب بردار یکه بنویسید.
ب) بردار جابه‌جایی متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی t_1 تا t_2، t_2 تا t_3 و t_1 تا t_3 به‌دست آورید.

۳. در شکل زیر نمودار سرعت ــ زمان سه متحرک نشان داده شده است.
الف) شتاب سه متحرک را به طور کیفی با یکدیگر مقایسه کنید.
ب) شتاب هر متحرک را به دست آورید.

۴. شکل زیر نمودار سرعت ــ زمان متحرکی را که در امتداد محور x حرکت می‌کند در مدت ۲۸ ثانیه نشان می‌دهد.
الف) شتاب در هر یک از مرحله‌های AB، BC و CD چقدر است؟
ب) شتاب متوسط در بازهٔ زمانی صفر تا ۲۸ ثانیه چقدر است؟
پ) جابه‌جایی متحرک را در این بازهٔ زمانی پیدا کنید.

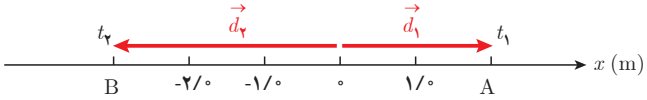
۵. نمودار سرعت ــ زمان متحرکی مطابق شکل زیر است.
الف) نمودار شتاب ــ زمان این متحرک را رسم کنید.
ب) اگر $x = -۱۰\text{m}$ باشد نمودار مکان ــ زمان متحرک را رسم کنید.

۶. شکل زیر نمودار مکان ــ زمان حرکت یک دونده دوی نیمه‌استقامت را در امتداد یک خط راست نشان می‌دهد.

ب) در بازهٔ زمانی ۰ تا ۱۰ جابه‌جایی این سه متحرک را پیدا کنید.

۲۵

۲ الف) بردارهای مکان متحرک برای لحظه‌های t_1 و t_2 روی شکل زیر نشان داده شده است. (برای لحظهٔ t_3 نیز به طور مشابه می‌توانید رسم کنید.)



$$\vec{d}_1 = ۲\vec{i} \quad , \quad \vec{d}_2 = -۳\vec{i}$$ (در SI)

ب) بردار جابه‌جایی در بازهٔ زمانی t_1 تا t_2 برابر است با

$$\vec{d} = \vec{d}_2 - \vec{d}_1 = -۳\vec{i} - ۲\vec{i} = -۵\vec{i}$$ (در SI)

۳ الف) متحرک B دارای حرکت با سرعت ثابت و در نتیجه بدون شتاب است. متحرک‌های A و C دارای حرکت شتابدار ثابت‌اند و با توجه به بیشتر بودن شیب نمودار سرعت ــ زمان متحرک C، شتاب این متحرک از شتاب متحرک A بزرگ‌تر است.

ب) مشابه مثال ۱ــ۹ و نتیجه‌گیری این مثال که در پایان اشاره شده است دانش‌آموزان به سادگی می‌توانند شتاب هر متحرک را به‌دست آورند.

پ) با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۴ به سادگی می‌توان جابه‌جایی این سه متحرک را در بازهٔ زمانی داده شده پیدا کرد.

$$\Delta x_B = (v_{av})_B \Delta t = (۲۰\text{m/s})(۱۰\text{s}) = ۲۰۰\text{m}$$

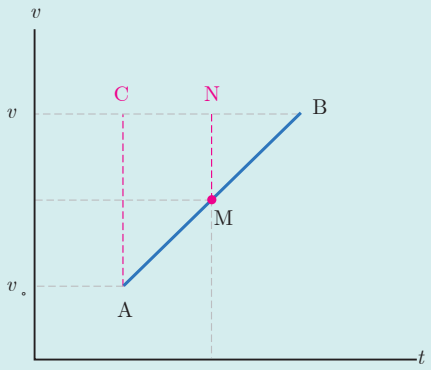
از آنجا که دانش‌آموزان در درس ریاضی پایهٔ یازدهم با پیدا کردن نقطه وسط یک پاره خط آشنا شده‌اند به سادگی می‌توانند برای

متحرک‌های A و C، از رابطهٔ $v_{av}=\frac{v_{\circ}+v}{۲}$ استفاده کنند. به این ترتیب داریم :

$$\Delta x_A=(v_{av})_A\Delta t=\left(\frac{\circ+۱\circ \mathrm{m/s}}{۲}\right)(۱\circ \mathrm{s})=۵\circ \mathrm{m}$$

$$\Delta x_c=(v_{av})_e\Delta t=\left(\frac{\circ+۲\circ \mathrm{m/s}}{۲}\right)(۱\circ \mathrm{s})=۱\circ\circ \mathrm{m}$$

اثبات رابطهٔ ۱ـ ۹



نقطهٔ M وسط پارهٔ خط AB قرار دارد.

مثلث‌های BNM و BCA با یکدیگر متشابه‌اند. به این ترتیب داریم :

$$\frac{NM}{AC}=\frac{BM}{BA}=\frac{BM}{۲BM}\Rightarrow\frac{NM}{v+v_{\circ}}=\frac{۱}{۲}$$

$$\Rightarrow NM=\frac{v+v_{\circ}}{۲}$$

از طرفی NM برابر میانگین $v_{\circ}$ تا v است.

۴ الف) مشابه مثال ۱ـ۹ است.

ب) با استفاده از رابطهٔ ۱ـ۶ داریم :

$$a_{av}=\frac{v_۲-v_۱}{t_۲-t_۱}=\frac{۶\mathrm{m/s}-\circ}{۲۸\mathrm{s}-\circ}=\circ/۲\mathrm{m/s^۲}$$

پ) مشابه مثال قبل قسمت (پ).

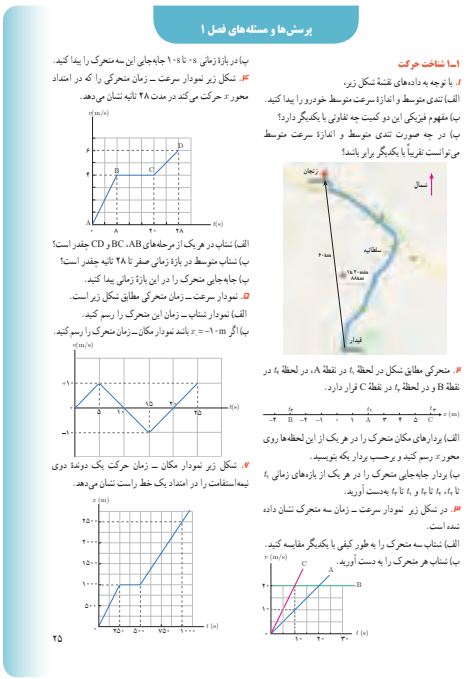
۵ الف) با توجه به نمودار سرعت ـ زمان، شتاب متحرک را در بازه‌های متفاوت پیدا می‌کنیم. دانش‌آموزان باید توجه کنند که در لحظه‌هایی که شتاب متحرک تغییر کرده است مورد بررسی قرار نمی‌گیرند.

دربازهٔ زمانی ۰ تا ۵s

$$a=\frac{(۱\circ-\circ)\mathrm{m/s}}{۵\mathrm{s}}=۲\mathrm{m/s^۲}$$

دربازهٔ زمانی ۵s تا ۱۵s

$$a=\frac{(-۱\circ-۱\circ)\mathrm{m/s}}{۱\circ\mathrm{s}}=-۲\mathrm{m/s^۲}$$


پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱

۱ـ۱ شناخت حرکت

۱. با توجه به داده‌های نقشهٔ شکل زیر،
الف) تندی متوسط و اندازهٔ سرعت متوسط خودرو را پیدا کنید.
ب) مفهوم فیزیکی این دو کمیت چه تفاوتی با یکدیگر دارد؟
پ) در چه صورت تندی متوسط و اندازهٔ سرعت متوسط می‌توانند تقریباً با یکدیگر برابر باشند؟

۲. متحرکی مطابق شکل در لحظهٔ $t_۱$ در نقطهٔ A، در لحظهٔ $t_۲$ در نقطهٔ B و در لحظهٔ $t_۳$ در نقطهٔ C قرار دارد.

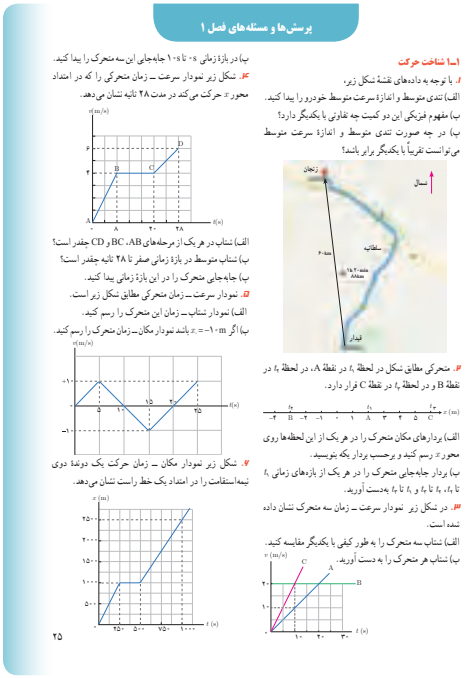
الف) بردارهای مکان متحرک را در هر یک از این لحظه‌ها روی محور x رسم کنید و برحسب بردار یکه بنویسید.
ب) بردار جابه‌جایی متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی $t_۱$ تا $t_۲$، $t_۲$ تا $t_۳$ و $t_۱$ تا $t_۳$ به‌دست آورید.

۳. در شکل زیر نمودار سرعت ـ زمان سه متحرک نشان داده شده است.
الف) شتاب سه متحرک را به طور کیفی با یکدیگر مقایسه کنید.
ب) شتاب هر متحرک را به دست آورید.

۴. شکل زیر نمودار سرعت ـ زمان متحرکی را که در امتداد محور x حرکت می‌کند در مدت ۲۸ ثانیه نشان می‌دهد.
الف) شتاب در هر یک از مرحله‌های AB، BC و CD چقدر است؟
ب) شتاب متوسط در بازهٔ زمانی صفر تا ۲۸ ثانیه چقدر است؟
ب) جابه‌جایی متحرک را در این بازهٔ زمانی پیدا کنید.

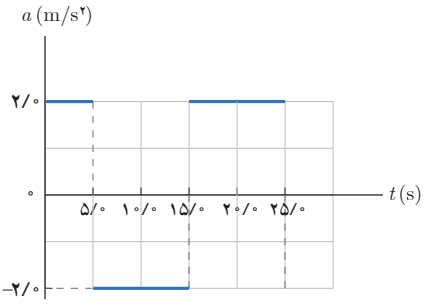
۵. نمودار سرعت ـ زمان متحرکی مطابق شکل زیر است.
الف) نمودار شتاب ـ زمان این متحرک را رسم کنید.
ب) اگر $x=-۱\circ$ m باشد نمودار مکان ـ زمان متحرک را رسم کنید.

۶. شکل زیر نمودار مکان ـ زمان حرکت یک دوندهٔ دوی نیمه‌استقامت را در امتداد یک خط راست نشان می‌دهد.
ب) در بازهٔ زمانی ۰ تا ۱۰s جابه‌جایی این سه متحرک را پیدا کنید.



در بازهٔ زمانی ۱۵s تا ۲۵s

$$a=\frac{(۱۰+۱۰)\mathrm{m/s^{۲}}}{۱۰\mathrm{s}}=۲\mathrm{m/s^{۲}}$$



ب) از رابطهٔ ۱ــ ۴ و مشابه مسئله ۳ قسمت (پ)، جابه‌جایی متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی پیدا می‌کنیم.

در بازهٔ صفر تا 5s

$$\Delta x=v_{av}\Delta t=\left(\frac{۰+۱۰\mathrm{m/s}}{۲}\right)(۵\mathrm{s})=۲۵\mathrm{m}$$

چون $x_{۰}=-۱۰\mathrm{m}$ فرض شده است، در پایان این بازهٔ زمانی، یعنی در لحظهٔ $t=۵\mathrm{s}$، مکان متحرک در $x=۱۵\mathrm{m}$ قرار دارد.

دربازهٔ 5s تا ۱۰s

$$\Delta x=\left(\frac{۱۰\mathrm{m/s}+۰}{۲}\right)(۵\mathrm{s})=۲۵\mathrm{m}$$

به این ترتیب در لحظهٔ $t=۱۰\mathrm{s}$، مکان متحرک در $x=۴۰\mathrm{m}$ قرار دارد.

دربازهٔ ۱۰s تا ۱۵s

$$\Delta x=\left(\frac{۰-۱۰\mathrm{m/s}}{۲}\right)(۵\mathrm{s})=-۲۵\mathrm{m}$$

به این ترتیب در لحظه $t=۱۵\mathrm{s}$، مکان متحرک در $x=۱۵\mathrm{m}$ قرار دارد.

دربازهٔ ۱۵s تا ۲۰s

$$\Delta x=\left(\frac{-۱۰\mathrm{m/s}+۰}{۲}\right)(۵\mathrm{s})=-۲۵\mathrm{m}$$

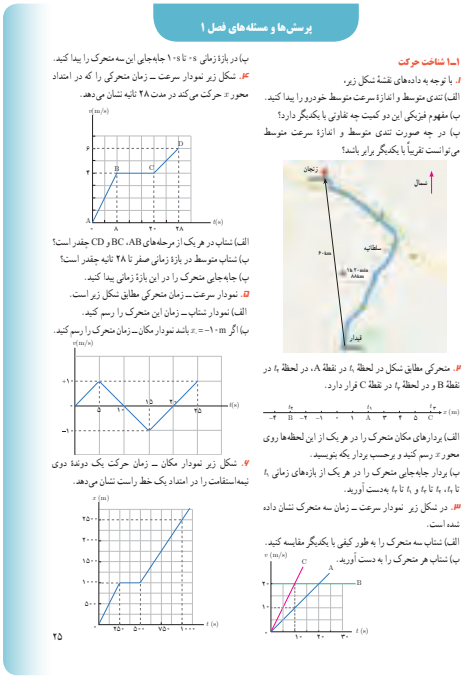
به این ترتیب در لحظهٔ $t=۲۰\mathrm{s}$، مکان متحرک در $x=-۱۰\mathrm{m}$ قرار دارد.

دربازهٔ ۲۰s تا ۲۵s

$$\Delta x=\left(\frac{۰+۱۰\mathrm{m/s}}{۲}\right)(۵\mathrm{s})=۲۵\mathrm{m}$$

به این ترتیب در لحظهٔ $t=۲۵\mathrm{s}$، مکان متحرک در $x=۱۵\mathrm{m}$ قرار دارد.

چون در تمامی بازه‌های ذکر شده، حرکت با شتاب است، لذا نمودار مکان ــ زمان آن مطابق شکل صفحهٔ بعد است.


پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱

۱ـ۱ شناخت حرکت

۱. با توجه به داده‌های نقشهٔ شکل زیر،
الف) تندی متوسط و اندازهٔ سرعت متوسط حرکت را پیدا کنید.
ب) مفهوم فیزیکی این دو کمیت چه تفاوتی با یکدیگر دارد؟
پ) در چه صورت تندی متوسط و اندازهٔ سرعت متوسط می‌توانند تقریباً با یکدیگر برابر باشند؟

۲. متحرکی مطابق شکل در لحظهٔ t_1 در نقطهٔ A، در لحظهٔ t_2 در نقطهٔ B و در لحظهٔ t_3 در نقطهٔ C قرار دارد.

الف) بردارهای مکان متحرک را در هر یک از این لحظه‌ها روی محور x رسم کنید و برحسب بردار یکه بنویسید.
ب) بردار جابه‌جایی متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی t_1 تا t_2، t_2 تا t_3 و t_1 تا t_3 به‌دست آورید.

۳. در شکل زیر نمودار سرعت ـ زمان سه متحرک نشان داده شده است.
الف) شتاب سه متحرک را به طور کیفی با یکدیگر مقایسه کنید.
ب) شتاب هر متحرک را به دست آورید.

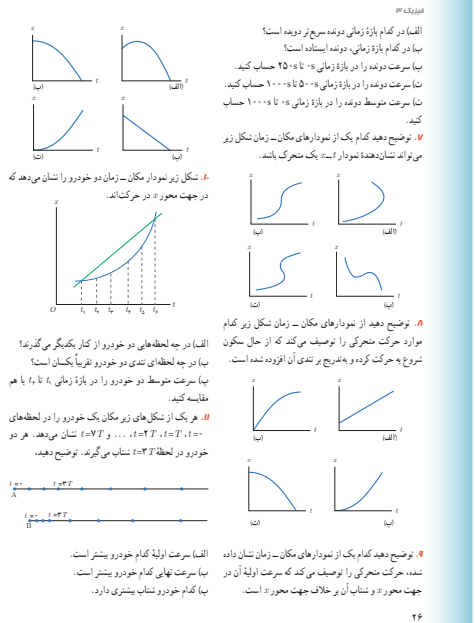
ب) در بازهٔ زمانی ۰ s تا ۱۰ s جابه‌جایی این سه متحرک را پیدا کنید.

۴. شکل زیر نمودار سرعت ـ زمان متحرکی را که در امتداد محور x حرکت می‌کند در مدت ۲۸ ثانیه نشان می‌دهد.

الف) شتاب در هر یک از مرحله‌های AB، BC و CD چقدر است؟
ب) شتاب متوسط در بازهٔ زمانی صفر تا ۲۸ ثانیه چقدر است؟
ب) جابه‌جایی متحرک را در این بازهٔ زمانی پیدا کنید.

۵. نمودار سرعت ـ زمان متحرکی مطابق شکل زیر است.
الف) نمودار شتاب ـ زمان این متحرک را رسم کنید.
ب) اگر $x=-۱۰\,m$ باشد نمودار مکان ـ زمان متحرک را رسم کنید.

۶. شکل زیر نمودار مکان ـ زمان حرکت یک دوندهٔ دوی نیمه‌استقامت را در امتداد یک خط راست نشان می‌دهد.


فیزیک ۳

الف) در کدام بازهٔ زمانی دونده سریع‌تر دویده است؟
ب) در کدام بازهٔ زمانی، دونده ایستاده است؟
ب) سرعت دونده را در بازهٔ زمانی ۰ s تا ۲۵۰ s حساب کنید.
ت) سرعت دونده را در بازهٔ زمانی ۵۰۰ s تا ۱۰۰۰ s حساب کنید.
ث) سرعت متوسط دونده را در بازهٔ زمانی ۰ s تا ۱۰۰۰ s حساب کنید.

۷. توضیح دهید کدام یک از نمودارهای مکان ـ زمان شکل زیر می‌تواند نشان‌دهندهٔ نمودار $x-t$ یک متحرک باشد.

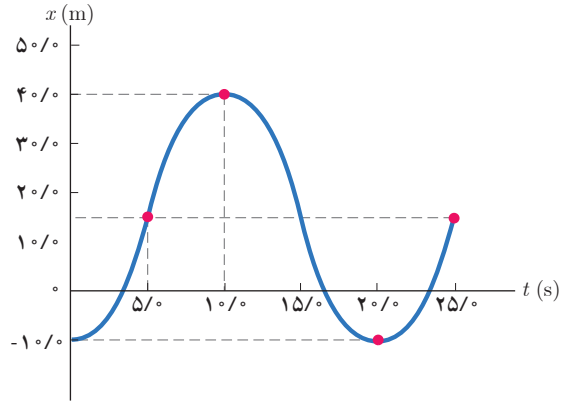
۸. شکل زیر نمودار مکان ـ زمان دو خودرو را نشان می‌دهد که در جهت محور x در حرکت‌اند.

الف) در چه لحظه‌هایی دو خودرو از کنار یکدیگر می‌گذرند؟
ب) در چه لحظه‌ای تندی دو خودرو تقریباً یکسان است؟
ب) سرعت متوسط دو خودرو را در بازهٔ زمانی t_1 تا t_4 با هم مقایسه کنید.

۹. هر یک از شکل‌های زیر مکان یک خودرو را در لحظه‌های $t=۰$، $t=T$، $t=۲T$، ... و $t=۷T$ نشان می‌دهد. هر دو خودرو در لحظهٔ $t=۳T$ شتاب می‌گیرند. توضیح دهید،

الف) سرعت اولیهٔ کدام خودرو بیشتر است.
ب) سرعت نهایی کدام خودرو بیشتر است.
پ) کدام خودرو شتاب بیشتری دارد.

۱۰. توضیح دهید کدام یک از نمودارهای مکان ـ زمان نشان داده شده، حرکت متحرکی را توصیف می‌کند که سرعت اولیهٔ آن در جهت محور x و شتاب آن بر خلاف جهت محور x است.



۶ الف) در بازه‌ای که شیب نمودار سرعت ـ زمان بیشتر است؛ یعنی بازهٔ صفر تا ۲۵۰ s.

ب) در بازه‌ای که شیب نمودار سرعت ـ زمان صفر است؛ یعنی بازهٔ ۲۵۰ s تا ۵۰۰ s.

پ) مشابه مثال ۱ـ۵

ت) مشابه مثال ۱ـ۵

۷ دانش‌آموزان باید توجه کنند که متحرک در هر لحظه از زمان صرفاً در یک مکان می‌تواند باشد. لذا نمودارهای مکان ـ زمان شکل‌های الف، ب و ث نمی‌توانند نشان‌دهندهٔ نمودار $x-t$ یک متحرک باشند. نکتهٔ دیگری که دانش‌آموزان باید دقت کنند این است که در هیچ لحظه، مماس بر منحنی $x-t$ نباید موازی محور x شود، زیرا در این حالت سرعت متحرک بی‌نهایت می‌شود که از نظر فیزیکی بی‌معنا و قابل قبول نیست.

۸ در نمودار شکل (ب) شیب مماس بر منحنی $x-t$، با گذشت زمان کاهش می‌یابد و در نمودار شکل (الف) با گذشت زمان شیب منحنی $x-t$ ثابت مانده است. لذا نمودار $x-t$ شکل‌های (پ) و (ت) حرکت متحرکی را توصیف می‌کند که به‌تدریج بر تندی آن افزوده شده است.

۹ برای آنکه سرعت اولیهٔ متحرک در جهت محور x باشد، دانش‌آموزان باید به زاویه‌ای که خط مماس بر منحنی مکان ـ زمان در لحظهٔ $t=۰$ با محور زمان می‌سازد توجه کنند. اگر این زاویه مثبت باشد (مانند شکل الف) در این صورت، سرعت اولیهٔ متحرک در جهت محور x است.

همچنین برای آنکه شتاب متحرک در خلاف جهت محور x باشد، با توجه به توضیحی که درخصوص شکل ۱ـ۱۴ داده شد، باید گودی یا تقعر منحنی رو به پایین باشد (مانند شکل الف). البته دانش‌آموزان می‌توانند به چگونگی تغییرات سرعت متحرک در بازهٔ زمانی مورد نظر نیز توجه کنند.

۱۰ الف) در لحظه‌های t_1 و t_4

ب) شیب خط مماس بر منحنی خودروی شتابدار در لحظهٔ t_4، تقریباً موازای نمودار خودرویی است که با سرعت ثابت در حرکت است.

پ) چون دربازهٔ زمانی t_1 تا t_4 برای دو خودرو $\Delta x = x_4 - x_1$ یکسان است، لذا سرعت متوسط آنها نیز برابر است.

۱۱ ابتدا باید دانش‌آموزان توجه کنند که نمودارهای نشان داده شده، حرکت دو خودروی A و B را در جهت محور x نشان می‌دهد.

اگر مبدأ حرکت را در $t=0$ محلی در نظر بگیریم که خودرو A شروع به حرکت کرده است، در این صورت همان‌طور که دیده می‌شود خودروی B، در فاصلهٔ دورتری از مبدأ شروع به حرکت کرده است.

الف) حرکت هر دو خودرو در بازهٔ زمانی $t=0$ تا $t=3T$ با سرعت ثابت است. از آنجا که خودروی A در این بازهٔ زمانی مسافت بیشتری را طی کرده است، در نتیجه سرعت اولیهٔ خودروی A بیشتر از خودروی B است.

ب) دربازهٔ زمانی $t=3T$ تا $t=7T$، خودروی B مسافت بیشتری را طی کرده‌است. یعنی

$$\Delta x_A = (v_{av})_A(4T) = \left(\frac{v_{3A}+v_{vA}}{2}\right)(4T)$$

$$\Delta x_B = (v_{av})_B(4T) = \left(\frac{v_{3B}+v_{vB}}{2}\right)(4T)$$

چون $\Delta x_A < \Delta x_B$ است داریم :

$$v_{3A} + v_{vA} < v_{3B} + v_{vB}$$

از طرفی چون $v_{3A} > v_{3B}$ است (به قسمت الف توجه شود)، در این صورت باید $v_{vB} > v_{vA}$ باشد.

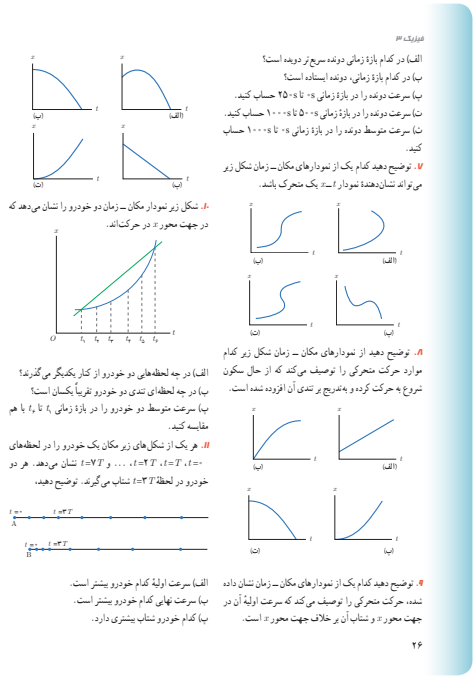
پ) چون تغییرات سرعت خودروی B بیشتر بوده است، لذا دارای شتاب بیشتری نیز هست.

۱۲ الف) با جای‌گذاری لحظه‌های داده شده در معادلهٔ مکان ــ زمان، به سادگی مکان متحرک $x_0 = 4\,m$ و $x=0$ به‌دست می‌آید.

ب) از رابطهٔ ۱ــ ۴ استفاده شود.

همان‌طور که در کتاب درسی نیز تأکید شده است لازم است توجه شود که مشتق‌گیری از رابطهٔ مکان ــ زمان به دست آمده. و پیدا کردن سرعت در یک لحظهٔ خاص، جزو برنامهٔ درسی این کتاب و همچنین ارزشیابی آن نیست. این موضوع درخصوص دوبار مشتق‌گیری از معادلهٔ مکان ــ زمان یا یک بار مشتق‌گیری از معادلهٔ سرعت ــ زمان و پیدا کردن شتاب در هر لحظهٔ دلخواه نیز صادق است.

۱۳ مشابه پرسش ۱ــ ۶ است. کافی است دانش‌آموزان به شیب مماس بر منحنی سرعت ــ زمان در هر بازهٔ دلخواه توجه کنند. برای مثال در بازهٔ t_2 تا t_3، شیب منفی و در نتیجه شتاب در خلاف جهت محور x است.



فیزیک ۳

الف) در کدام بازهٔ زمانی دونده سریع‌تر دویده است؟

ب) در کدام بازهٔ زمانی، دونده ایستاده است؟

پ) سرعت دونده را در بازهٔ زمانی ۰s تا ۲۵۰s حساب کنید.

ت) سرعت دونده را در بازهٔ زمانی ۵۰۰s تا ۱۰۰۰s حساب کنید.

ث) سرعت متوسط دونده را در بازهٔ زمانی ۰s تا ۱۰۰۰s حساب کنید.

۷. توضیح دهید کدام یک از نمودارهای مکان ــ زمان شکل زیر می‌تواند نشان‌دهندهٔ نمودار $v-t$ یک متحرک باشد.

۸. شکل زیر نمودار مکان ــ زمان دو خودرو را نشان می‌دهد که در جهت محور x در حرکت‌اند.

الف) در چه لحظه‌هایی دو خودرو از کنار یکدیگر می‌گذرند؟

ب) در چه لحظه‌ای تندی دو خودرو تقریباً یکسان است؟

پ) سرعت متوسط دو خودرو را در بازهٔ زمانی t_1 تا t_4 با هم مقایسه کنید.

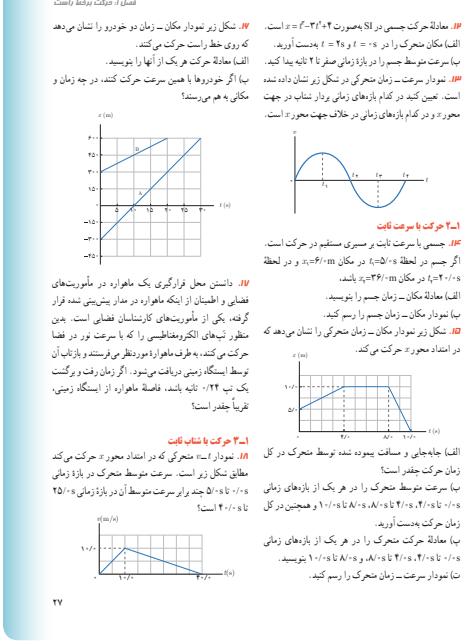
۹. هر یک از شکل‌های زیر مکان یک خودرو را در لحظه‌های $t=0$، $t=T$، $t=2T$، ... و $t=7T$ نشان می‌دهد. هر دو خودرو در لحظهٔ $t=3T$ شتاب می‌گیرند. توضیح دهید،

الف) سرعت اولیهٔ کدام خودرو بیشتر است.

ب) سرعت نهایی کدام خودرو بیشتر است.

پ) کدام خودرو شتاب بیشتری دارد.

۲۶



فصل ۱: حرکت برخط راست

۱۴. معادلهٔ حرکت جسمی در SI به‌صورت $x = t^2 - 3t + 4$ است.

الف) مکان متحرک را در $t = 0\,s$ و $t = 2\,s$ به‌دست آورید.

ب) سرعت متوسط جسم را در بازهٔ زمانی صفر تا ۲ ثانیه پیدا کنید.

۱۵. نمودار سرعت ــ زمان متحرکی در شکل زیر نشان داده شده است. تعیین کنید در کدام بازه‌های زمانی بردار شتاب در جهت محور x و در کدام بازه‌های زمانی در خلاف جهت محور x است.

۱ــ۳ حرکت با سرعت ثابت

۱۶. جسمی با سرعت ثابت بر سیری مستقیم در حرکت است. اگر جسم در لحظهٔ $t_1 = 5/0\,s$ در مکان $x_1 = -6/0\,m$ و در لحظهٔ $t_2 = 2/0\,s$ در مکان $x_2 = 36/0\,m$ باشد،

الف) معادلهٔ مکان ــ زمان جسم را بنویسید.

ب) نمودار مکان ــ زمان جسم را رسم کنید.

۱۷. شکل زیر نمودار مکان ــ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x حرکت می‌کند.

الف) جابه‌جایی و مسافت پیموده شده توسط متحرک در کل زمان حرکت چقدر است؟

ب) سرعت متوسط متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی $0/0\,s$ تا $1/0\,s$، $1/0\,s$ تا $2/0\,s$، $2/0\,s$ تا $4/0\,s$، $4/0\,s$ تا $8/0\,s$ و $8/0\,s$ تا $10/0\,s$ و همچنین در کل زمان به‌دست آورید.

پ) معادلهٔ حرکت متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی $0/0\,s$ تا $1/0\,s$، $1/0\,s$ تا $2/0\,s$، $2/0\,s$ تا $4/0\,s$، $4/0\,s$ تا $8/0\,s$ و $8/0\,s$ تا $10/0\,s$ بنویسید.

ت) نمودار سرعت ــ زمان متحرک را رسم کنید.

۱۸. شکل زیر نمودار مکان ــ زمان دو خودرو را نشان می‌دهد که روی خط راست حرکت می‌کنند.

الف) معادلهٔ حرکت هر یک از آنها را بنویسید.

ب) اگر خودروها با همین سرعت حرکت کنند، در چه زمان و مکانی به هم می‌رسند؟

۱۹. دانستن محل قرارگیری یک ماهواره در مأموریت‌های فضایی و اطمینان از اینکه ماهواره در مدار پیش‌بینی شده قرار گرفته، یکی از مأموریت‌های کارشناسان فضایی است. بدین منظور ثب‌های الکترومغناطیسی را که با سرعت نور در فضا حرکت می‌کنند، به طرف ماهوارهٔ موردنظر می‌فرستند و بازتاب آن توسط ایستگاه زمینی دریافت می‌شود. اگر زمان رفت و برگشت یک تپ ۰/۲۴ ثانیه باشد، فاصلهٔ ماهواره از ایستگاه زمینی، تقریباً چقدر است؟

۱ــ۳ حرکت با شتاب ثابت

۲۰. نمودار $v-t$ متحرکی که در امتداد محور x حرکت می‌کند مطابق شکل زیر است. سرعت متوسط متحرک در بازهٔ زمانی $0/0\,s$ تا $5/0\,s$ چند برابر سرعت متوسط آن در بازهٔ زمانی $25/0\,s$ تا $40/0\,s$ است؟

۲۷

۱ـ۲ حرکت با سرعت ثابت

۱۴ معادلهٔ حرکت جسمی که با سرعت ثابت در امتداد محور x حرکت می‌کند در رابطهٔ ۱ـ۷ داده شده است.

$$x=vt+x_0$$

در هر یک از لحظه‌های t_1 و t_2 داریم :

$$x_1=vt_1+x_0 \Rightarrow ۶/۰\,m=v(۵/۰\,s)+x_0$$

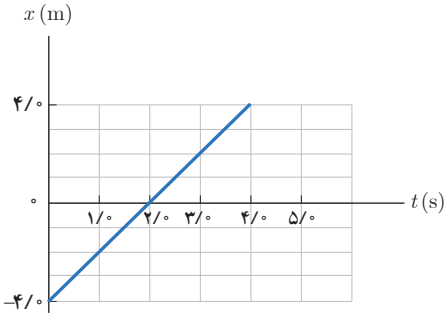
$$x_2+vt_2+x_0 \Rightarrow ۳۶/۰\,m=v(۲۰/۰\,s)+x_0$$

با حل دو معادلهٔ بالا داریم :

$$x_0=-۴/۰\,m \quad , \quad v=۲/۰\,m/s$$

$$\Rightarrow x=۲t-۴$$

به این ترتیب معادلهٔ حرکت متحرک در SI به صورت زیر است :



۱۵ الف) در بازهٔ صفر تا ۴/۰ s

$$\Delta x_1=۱۰/۰\,m-۵/۰\,m=۵/۰\,m$$

در بازهٔ ۴/۰ s تا ۸/۰ s

$$\Delta x_2=۱۰/۰\,m-۱۰/۰\,m=۰$$

در بازهٔ ۸/۰ s تا ۱۰/۰ s

$$\Delta x_3=۰-۱۰/۰\,m=-۱۰/۰\,m$$

به این ترتیب جابه‌جایی کل برابر است با

$$\Delta x=۵/۰\,m+۰+(-۱۰/۰\,m)=-۵/۰\,m$$

به جای این کار می‌توانستیم به‌طور ساده، مکان متحرک را در لحظهٔ $t=۱۰/۰\,s$ از مکان متحرک در شروع حرکت ($t=۰$) کم کنیم در این صورت

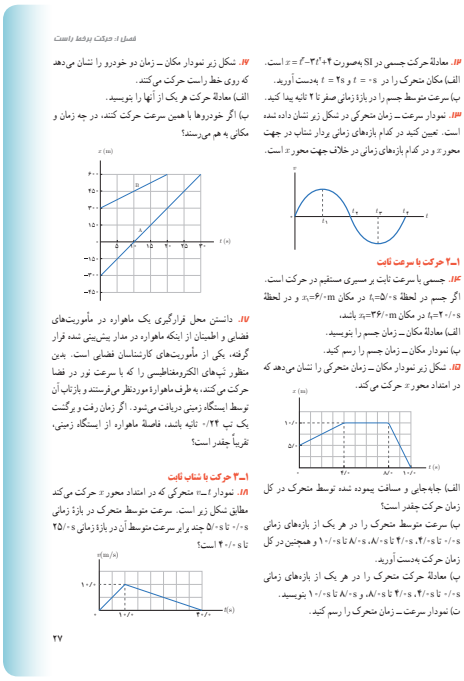
$$\Delta x = ۰-۵/۰\,m = -۵/۰\,m$$

مسافت پیموده شده برای مجموع اندازهٔ جابه‌جایی‌های متحرک در هر بازهٔ زمانی است. به این ترتیب داریم :

$$l=|\Delta x_1|+|\Delta x_2|+|\Delta x_3|=|۵/۰\,m|+۰+|-۱۰/۰\,m| = ۱۵/۰\,m$$

ب) از رابطهٔ ۱ـ۴ استفاده شود. برای مثال در بازهٔ ۸/۰ s تا ۱۰/۰ s داریم :

$$v_{av} = \frac{-۱۰/۰\,m}{۱۰/۰-۸/۰\,s} = -۵m/s$$



فصل ۱: حرکت برخط راست

۱۲. معادلهٔ حرکت جسمی در SI به‌صورت $x=t^2-۳t^2+۴$ است.
الف) مکان متحرک را در $t=۰$ s و $t=۲$ s به‌دست آورید.
ب) سرعت متوسط جسم را در بازهٔ زمانی صفر تا ۲ ثانیه پیدا کنید.

۱۳. نمودار سرعت ـ زمان متحرکی در شکل زیر نشان داده شده است. تعیین کنید در کدام بازه‌های زمانی بردار شتاب در جهت محور x و در کدام بازه‌های زمانی در خلاف جهت محور x است.

۱ـ۲ حرکت با سرعت ثابت

۱۴. جسمی با سرعت ثابت بر مسیری مستقیم در حرکت است. اگر جسم در لحظهٔ $t_1=۵/۰\,s$ در مکان $x_1=۶/۰\,m$ و در لحظهٔ $t_2=۲۰/۰\,s$ در مکان $x_2=۳۶/۰\,m$ باشد،
الف) معادلهٔ مکان ـ زمان جسم را بنویسید.
ب) نمودار مکان ـ زمان جسم را رسم کنید.

۱۵. شکل زیر نمودار مکان ـ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x حرکت می‌کند.

الف) جابه‌جایی و مسافت پیموده شده توسط متحرک در کل زمان حرکت چقدر است؟
ب) سرعت متوسط متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی $۰/۰\,s$ تا $۴/۰\,s$، $۴/۰\,s$ تا $۸/۰\,s$، $۸/۰\,s$ تا $۱۰/۰\,s$ و همچنین در کل زمان حرکت به‌دست آورید.
پ) معادلهٔ حرکت متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی $۰/۰\,s$ تا $۴/۰\,s$، $۴/۰\,s$ تا $۸/۰\,s$، و $۸/۰\,s$ تا $۱۰/۰\,s$ بنویسید.
ت) نمودار سرعت ـ زمان متحرک را رسم کنید.

۱۶. شکل زیر نمودار مکان ـ زمان دو خودرو را نشان می‌دهد که روی خط راست حرکت می‌کنند.

الف) معادلهٔ حرکت هر یک از آن‌ها را بنویسید.
ب) اگر خودروها با همین سرعت حرکت کنند، در چه زمان و مکانی به هم می‌رسند؟

۱۷. داشتن محل قرارگیری یک ماهواره در مأموریت‌های فضایی و اطمینان از اینکه ماهواره در مدار پیش‌بینی شده قرار گرفته، یکی از مأموریت‌های کارشناسان فضایی است. بدین منظور تپ‌های الکترومغناطیسی را که با سرعت نور در فضا حرکت می‌کنند، به طرف ماهواره مورد نظر می‌فرستند و بازتاب آن توسط ایستگاه زمینی دریافت می‌شود. اگر زمان رفت و برگشت یک تپ ۰/۲۴ ثانیه باشد، فاصلهٔ ماهواره از ایستگاه زمینی، تقریباً چقدر است؟

۱ـ۳ حرکت با شتاب ثابت

۱۸. نمودار vـt متحرکی که در امتداد محور x حرکت می‌کند مطابق شکل زیر است. سرعت متوسط متحرک در بازهٔ زمانی $۰/۰\,s$ تا $۵/۰\,s$ چند برابر سرعت متوسط آن در بازهٔ زمانی $۲۵/۰\,s$ تا $۴۰/۰\,s$ است؟

۲۷

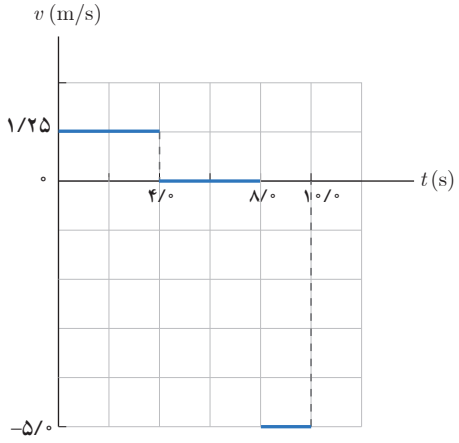
پ) مشابه قسمت الف تمرین ۱۴ است. برای مثال در بازهٔ صفر تا ۴/۰s داریم :

$$۱۰/۰\text{m} = v(۴/۰\text{s})+۵/۰\text{m} \Rightarrow v = ۱/۲\text{m/s}$$

از آنجا که هنگام آموزش و ارزشیابی، توجه به تعداد ارقام با معنا جزو اهداف کتاب نیست، لذا می‌توانیم $v=۱/۲۵\text{m/s}$ بگیریم. همچنین به‌طور مشابه در بازهٔ ۸/۰s تا ۱۰/۰s ، داریم : $v=-۵/۰\text{m/s}$. به این ترتیب معادلهٔ حرکت جسم در بازه‌های زمانی داده شده عبارت است از (در SI) :

ت)

$$\begin{cases} x = ۱/۲۵t + ۵ \\ x = ۱۰ \\ x = -۵t + ۱۰ \end{cases}$$



۱۶ الف) مشابه قسمت پ مسئله ۱۵ است. معادلهٔ حرکت این دو متحرک در SI به صورت زیر است

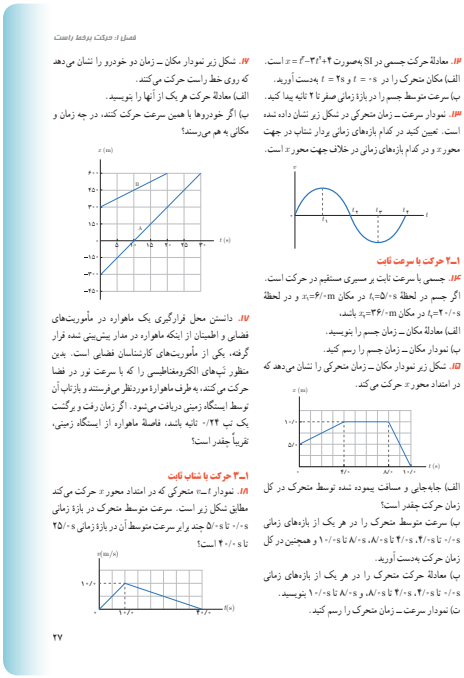
$$x_A = ۳۰t - ۳۰۰$$

$$x_B = ۱۵t + ۳۰۰$$

ب) با توجه به شرط $x_A = x_B$، زمان هم رسی در متحرک را به سادگی می‌توان به دست آورد ($t=۴۰\text{s}$). با قراردادن زمان هم رسی در یکی از معادله‌های حرکت، مکان هم‌رسی به دست می‌آید ($x=۹۰۰\text{m}$).

۱۷ اگر تندی نور را $۳\times۱۰^۸\text{m/s}$ در نظر بگیریم، در این صورت با توجه به اینکه زمان رفت ۰/۱۲s است، داریم :

$$\Delta x = v\Delta t = (۳\times۱۰^۸\text{m/s})(۰/۱۲\text{s}) = ۳/۶\times۱۰^۷\text{m}$$


فصل ۱: حرکت برخط راست

۱۴. معادلهٔ حرکت جسمی در SI به‌صورت $x = t^۲ - ۳t + ۴$ است.
الف) مکان متحرک را در $t = ۰\text{s}$ و $t = ۲\text{s}$ به‌دست آورید.
ب) سرعت متوسط جسم را در بازهٔ زمانی صفر تا ۲ ثانیه پیدا کنید.

۱۵. نمودار سرعت ــ زمان متحرکی در شکل زیر نشان داده شده است. تعیین کنید در کدام بازه‌های زمانی بردار شتاب در جهت محور x و در کدام بازه‌های زمانی در خلاف جهت محور x است.

۱ــ۳ حرکت با سرعت ثابت

۱۶. جسمی با سرعت ثابت بر مسیری مستقیم در حرکت است. اگر جسم در لحظهٔ $t_۱=۵/۰\text{s}$، در مکان $x_۱=۶/۰\text{m}$ و در لحظهٔ $t_۲=۲۰/۰\text{s}$، در مکان $x_۲=۳۶/۰\text{m}$ باشد،
الف) معادلهٔ مکان ــ زمان جسم را بنویسید.
ب) نمودار مکان ــ زمان جسم را رسم کنید.

۱۵. شکل زیر نمودار مکان ــ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x حرکت می‌کند.

الف) جابه‌جایی و مسافت پیموده شده توسط متحرک در کل زمان حرکت چقدر است؟
ب) سرعت متوسط متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی ۰/۰s تا ۴/۰s، ۴/۰s تا ۸/۰s، ۸/۰s تا ۱۰/۰s و همچنین در کل زمان حرکت به‌دست آورید.
پ) معادلهٔ حرکت متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی ۰/۰s تا ۴/۰s، ۴/۰s تا ۸/۰s، و ۸/۰s تا ۱۰/۰s بنویسید.
ت) نمودار سرعت ــ زمان متحرک را رسم کنید.

۱۷. شکل زیر نمودار مکان ــ زمان دو خودرو را نشان می‌دهد که روی خط راست حرکت می‌کنند.
الف) معادلهٔ حرکت هر یک از آن‌ها را بنویسید.
ب) اگر خودروها با همین سرعت حرکت کنند، در چه زمان و مکانی به هم می‌رسند؟

۱۸. دانستن محل قرارگیری یک ماهواره در مأموریت‌های فضایی و اطمینان از اینکه ماهواره در مدار پیش‌بینی شده قرار گرفته، یکی از مأموریت‌های کارشناسان فضایی است. بدین منظور تپ‌های الکترومغناطیسی را که با سرعت نور در فضا حرکت می‌کنند، به طرف ماهواره موردنظر می‌فرستند و بازتاب آن توسط ایستگاه زمینی دریافت می‌شود. اگر زمان رفت و برگشت یک تپ ۰/۲۴ ثانیه باشد، فاصلهٔ ماهواره از ایستگاه زمینی، تقریباً چقدر است؟

۱ــ۴ حرکت با شتاب ثابت

۱۸. نمودار vــt متحرکی که در امتداد محور x حرکت می‌کند مطابق شکل زیر است. سرعت متوسط متحرک در بازهٔ زمانی ۰/۰s تا ۵/۰s چند برابر سرعت متوسط آن در بازهٔ زمانی ۲۵/۰s تا ۳۰/۰s است؟

۱ـ۳ـ حرکت با شتاب ثابت

قبل از بررسی مسئله‌های این بخش، خوب است راهبردهای حل مسئله در حرکت با شتاب ثابت را با دانش‌آموزان در میان بگذارید.

راهبردهای حل مسئله در حرکت با شتاب ثابت

۱ نخست تصمیم بگیرید که مبدأ مختصات کجاست و جهت مثبت محور کدام است. ساده‌ترین گزینه اغلب آن است که ذره را در زمان $t=0$ در مبدأ بگذارید. آنگاه $x_0=0$ است. رسم نمودار حرکت که مختصات و بعضی از مکان‌های بعدی متحرک را نشان می‌دهد سودمند است.

۲ به خاطر آورید که گزینش جهت مثبت محور خود به خود جهت‌های مثبت سرعت و شتاب را نیز تعیین می‌کند. اگر x در طرف راست مبدأ مثبت باشد، در این صورت اگر v و x به سوی راست باشند، مثبت‌اند.

۳ فهرستی از کمیت‌هایی نظیر x_0، x، v_0، v، a و t بنویسید. به‌طور کلی بعضی از این کمیت‌ها معلوم و بعضی‌ها نامعلوم‌اند. کمیت‌های معلوم را بنویسید و کمیت‌های نامعلوم را مشخص کنید.

۴ یکی از معادله‌های ۱ـ۸ تا ۱ـ۱۱ را که فقط شامل یکی از کمیت‌های نامعلوم است را انتخاب کنید. این معادله را برای پیدا کردن کمیت نامعلوم حل کنید. گاهی مجبورید که دو معادلهٔ هم‌زمان را برای دو کمیت نامعلوم حل کنید.

۵ در پایان نتیجه کمیت‌های نامعلوم را که به‌دست آوردید وارسی کنید که آیا منطقی‌اند یا خیر. آیا آنها در گسترهٔ کلی مقدارهایی که شما انتظار دارید قرار دارند؟

۱۸ در هر یک از بازه‌های زمانی صفر تا ۱۰/۰s و همچنین ۱۰/۰s تا ۴۰/۰s حرکت دارای شتاب ثابت است. لذا با استفاده از معادلهٔ ۱ـ۹ داریم.

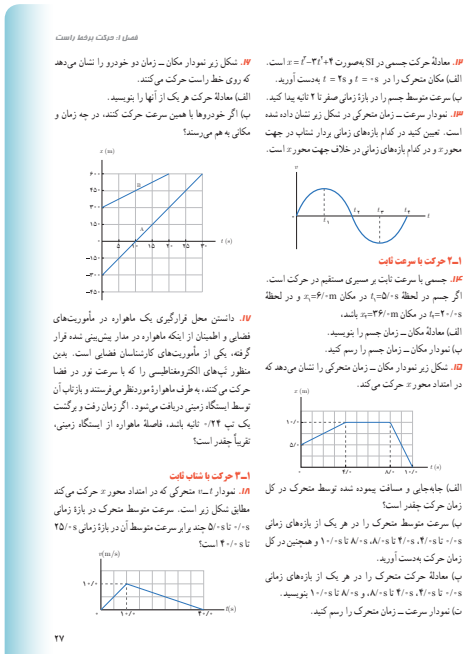
در بازهٔ صفر تا ۵/۰s

$$v_{av}=\frac{0+5/0\,m/s}{2}=2/5\,m/s$$

در بازهٔ ۲۵/۰s تا ۴۰/۰s

$$v_{av}=\frac{5/0\,m/s+0}{2}=2/5\,m/s$$

به این ترتیب نسبت سرعت متوسط متحرک در بازه‌های داده شده برابر ۱ است.



۱۹ الف) از رابطهٔ ۱ــ۴ داریم :

$$v_{av}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{(۶/۰-۰)\text{m}}{۳/۰\text{s}}=۲/۰\text{m/s}$$

ب) با توجه به اینکه در $t=۱/۰\text{s}$ شیب خط مماس بر منحنی صفر است، لذا سرعت متحرک در این لحظه برابر صفر است. در نتیجه داریم :

$$v=at+v_۰\Rightarrow ۰=a(۱/۰\text{s})+v_۰\Rightarrow v_۰=-a$$

از طرفی در همین لحظه داریم $x=-۲/۰\text{m}$ و $t=۱/۰\text{s}$. با جای‌گذاری در معادله مکان زمان داریم (در SI) :

$$x=\frac{۱}{۲}at^۲+v_۰t+x_۰$$

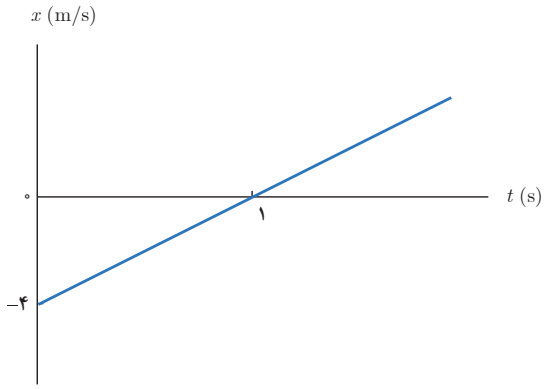
$$-۲/۰m=\frac{۱}{۲}a(۱/۰\text{s})-a(۱/۰\text{s})+۰\Rightarrow a=۴/۰\text{m/s}^۲$$

$$x=۲t^۲-۴t$$

پ) از رابطهٔ $v=۴t-۴$ ، داریم (در SI) :

$$v=۴\times۳-۴=۸\text{m/s}$$

ت)



۲۰ الف) با توجه به داده‌های مسئله، مناسب‌ترین معادله برای حل این قسمت، استفاده از رابطهٔ ۱ــ۱۱ است ($a=۰/۵\text{m/s}^۲$).

ب) با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۸، مدت ۲s پس از شروع حرکت، سرعت متحرک به $۱۸\text{km/h}+$ می‌رسد.

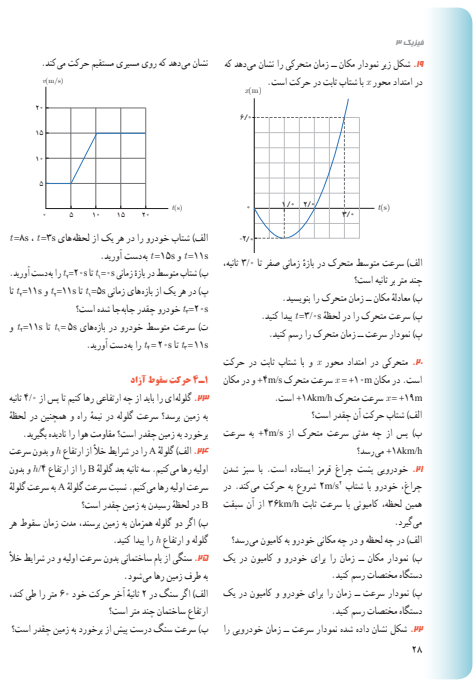
۲۱ الف) حرکت خودرو با شتاب ثابت و حرکت کامیون با سرعت ثابت است. با نوشتن معادله‌های حرکت خودرو و کامیون داریم (در SI) :

خودرو $x_۱=\frac{۱}{۲}at^۲+v_۰t+x_۰=t^۲$

کامیون $x_۲=vt+x_۰=۱۰t$

(مبدأ حرکت را، محل چراغ قرمز در نظر گرفته‌ایم $x_۰=۰$.)

زمان هم‌رسی $x_۱=x_۲\Rightarrow t=۱۰\text{s}$



فیزیک ۳

۱۹. شکل زیر نمودار مکان ــ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x با شتاب ثابت در حرکت است.

الف) سرعت متوسط متحرک در بازهٔ زمانی صفر تا ۳/۰ ثانیه، چند متر بر ثانیه است؟

ب) معادلهٔ مکان ــ زمان متحرک را بنویسید.

پ) سرعت متحرک را در لحظهٔ $t=۳/۰\text{s}$ پیدا کنید.

ت) نمودار سرعت ــ زمان متحرک را رسم کنید.

۲۰. متحرکی در امتداد محور x و با شتاب ثابت در حرکت است. در مکان $x=+۱۰\text{m}$ سرعت متحرک $+۴\text{m/s}$ و در مکان $x=+۱۹\text{m}$ سرعت متحرک $+۱۸\text{km/h}$ است.

الف) شتاب حرکت آن چقدر است؟

ب) پس از چه مدتی سرعت متحرک از $+۴\text{m/s}$ به سرعت $+۱۸\text{km/h}$ می‌رسد؟

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

الف) در چه لحظه و در چه مکانی خودرو به کامیون می‌رسد؟

ب) نمودار مکان ــ زمان را برای خودرو و کامیون در یک دستگاه مختصات رسم کنید.

۲۲. شکل نشان داده شده نمودار سرعت ــ زمان خودرویی را نشان می‌دهد که روی مسیری مستقیم حرکت می‌کند.

الف) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه‌های $t=۳\text{s}$ ، $t=۸\text{s}$ ، $t=۱۱\text{s}$ و $t=۱۵\text{s}$ به‌دست آورید.

ب) شتاب متوسط در بازهٔ زمانی $t_۱=۰\text{s}$ تا $t_۲=۳۰\text{s}$ را به‌دست آورید.

پ) در هر یک از بازه‌های زمانی $t_۱=۵\text{s}$ تا $t_۲=۱۱\text{s}$ و $t_۱=۱۱\text{s}$ تا $t_۲=۲۰\text{s}$ خودرو جلفدر جابه‌جا شده است؟

ت) سرعت متوسط خودرو در بازه‌های $t_۱=۵\text{s}$ تا $t_۲=۱۱\text{s}$ و $t_۱=۱۱\text{s}$ تا $t_۲=۲۰\text{s}$ را به‌دست آورید.

۱ــ۴ حرکت سقوط آزاد

۲۳. گلوله‌ای را باید از چه ارتفاعی رها کنیم تا پس از ۲/۰ ثانیه به زمین برسد؟ سرعت گلوله در نیمهٔ راه و همچنین در لحظهٔ برخورد به زمین چقدر است؟ مقاومت هوا را نادیده بگیرید.

۲۴. الف) گلولهٔ A را در شرایط خلأ از ارتفاع h و بدون سرعت اولیه رها می‌کنیم. سه ثانیه بعد گلولهٔ B را از ارتفاع $h/۴$ و بدون سرعت اولیه رها می‌کنیم. نسبت سرعت گلولهٔ A به سرعت گلولهٔ B در لحظهٔ رسیدن به زمین چقدر است؟

ب) اگر دو گلوله همزمان به زمین برسند، مدت زمان سقوط هر گلوله و ارتفاع h را پیدا کنید.

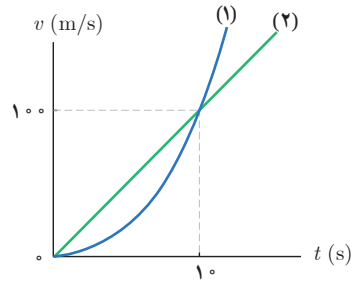
۲۵. سنگی از بام ساختمانی بدون سرعت اولیه و در شرایط خلأ به طرف زمین رها می‌شود.

الف) اگر سنگ در ۲ ثانیهٔ آخر حرکت خود ۶۰ متر را طی کند، ارتفاع ساختمان چند متر است؟

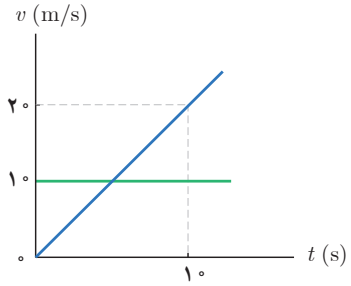
ب) سرعت سنگ درست پیش از برخورد به زمین چقدر است؟

مکان هم‌رسی $x_۲=۱۰\times۱۰=۱۰۰\,m$

ب)



پ)



۲۲ شتاب متحرک در لحظه‌های $t=۳s$، $t=۱۱s$ و $t=۱۵s$ به دلیل ثابت بودن سرعت متحرک، صفر است. شتاب متحرک در لحظهٔ $t=۸s$ با شتاب متوسط متحرک در بازهٔ زمانی ۵s تا ۱۰s برابر است. به این ترتیب داریم :

$$a_{av}=\frac{\Delta v}{\Delta t}=\frac{(۱۵-۵)m/s}{۵s}=۲m/s^۲$$

ب)

$$a_{av}=\frac{\Delta v}{\Delta t}=\frac{(۱۵-۵)m/s}{۲۰s}=۰/۵m/s^۲$$

پ) با توجه به آنچه در مثال ۱ــ۱۲ اشاره شد، سطح بین نمودار سرعت ــ زمان و محور زمان در هر بازهٔ زمانی برابر جابه‌جایی در آن بازه است. لذا

در بازهٔ ۵s تا ۱۱s $\quad \Delta x=۶۵m$

در بازهٔ ۱۱s تا ۲۰s $\quad \Delta x=۱۳۵m$

ت) با توجه به نتایج قسمت پ و رابطهٔ ۱ــ۴، سرعت متوسط به دست می‌آید.

۱ــ۴ حرکت سقوط آزاد

۲۳ $$y=-\frac{۱}{۲}gt^۲=-\frac{۱}{۲}(۹/۸m/s^۲)(۴/۰s)^۲=-۷۸/۴m$$

مبدأ حرکت، محل رها شدن جسم و جهت رو به بالا مثبت انتخاب شده است.

در نیمه راه :

$$v^۲ = -۲gy = -۲(۹/۸\,\mathrm{m/s^۲})(-۳۴/۲\,\mathrm{m})$$

دانش‌آموزان باید توجه کنند چون

$$\Rightarrow v = -۲۵/۹\,\mathrm{m/s}$$

جهت رو به بالا مثبت انتخاب شده است، لذا وقتی جسم رو به پایین می‌آید، جهت سرعت آن خلاف محور y است و علامت منفی در سرعت نشان‌دهندهٔ همین موضوع است.

لحظه برخورد به زمین :

$$v^۲ = -۲gy = -۲(۹/۸\,\mathrm{m/s^۲})(-۷۸/۴\,\mathrm{m}) \Rightarrow v = -۳۹/۲\,\mathrm{m/s}$$

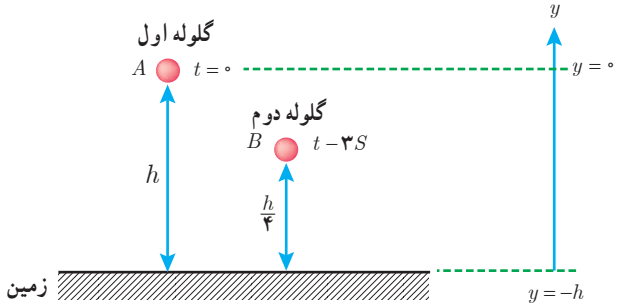
۳۴ مختصات دو گلوله را در معادلهٔ مکان ــ زمان قرار می‌دهیم :

$$y = -\frac{۱}{۲}gt^۲ + v_۰t + y_۰$$

گلولهٔ اول :

$$h = -\frac{۱}{۲}gt^۲$$

گلولهٔ دوم :



از رابطه ۱ــ۴ داریم :

$$v^۲ = -۲g(y - y_۰)$$

$$\begin{cases} v_A^۲ = -۲g(-h - ۰) = ۲gh \\ v_B^۲ = -۲g\left[-h - (\frac{۳}{۴}h)\right] = \frac{۲gh}{۴} \end{cases}$$

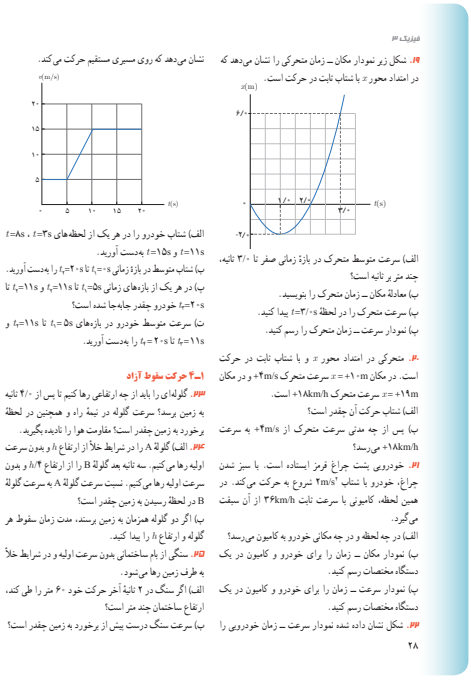
$$\Rightarrow \frac{v_A}{v_B} = \frac{\sqrt{۲gh}}{\sqrt{۲gh/۴}} = ۲$$

ب) معادلهٔ مکان ــ زمان هر دو گلوله به ترتیب برابر است با

$$y_A = -\frac{۱}{۲}gt^۲ \Rightarrow -h = \frac{-۱}{۲}gt^۲$$

$$y_B = -\frac{۱}{۲}g(t-۳\mathrm{s})^۲ - \frac{۳}{۴}h \Rightarrow -h = -\frac{۱}{۲}g(t-۳)^۲ - \frac{۳}{۴}h$$

$$\Rightarrow \frac{-h}{۴} = -\frac{۱}{۲}g(t-۳)^۲ \Rightarrow -h = -۲g(t-۳)^۲$$


فیزیک ۳

۱۹. شکل زیر نمودار مکان ــ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x با شتاب ثابت در حرکت است.

الف) سرعت متوسط متحرک در بازهٔ زمانی صفر تا ۳/۰ ثانیه، چند متر بر ثانیه است؟

ب) معادلهٔ مکان ــ زمان متحرک را بنویسید.

پ) سرعت متحرک را در لحظهٔ $t=۳/۰s$ پیدا کنید.

ت) نمودار سرعت ــ زمان متحرک را رسم کنید.

۲۰. متحرکی در امتداد محور x و با شتاب ثابت در حرکت است. در مکان $x=+۱۰\,\mathrm{m}$ سرعت متحرک $+۴\,\mathrm{m/s}$ و در مکان $x=+۱۹\,\mathrm{m}$ سرعت متحرک $+۱۸\,\mathrm{km/h}$ است.

الف) شتاب حرکت آن چقدر است؟

ب) پس از چه مدتی سرعت متحرک از $+۴\,\mathrm{m/s}$ به سرعت $+۱۸\,\mathrm{km/h}$ می‌رسد؟

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

الف) در چه لحظه و در چه مکانی خودرو به کامیون می‌رسد؟

ب) نمودار مکان ــ زمان را برای خودرو و کامیون در یک دستگاه مختصات رسم کنید.

۲۲. شکل نشان داده شده نمودار سرعت ــ زمان خودرویی را نشان می‌دهد که روی مسیری مستقیم حرکت می‌کند.

الف) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه‌های $t=۸s$ ، $t=۱۱s$ و $t=۱۵s$ به‌دست آورید.

ب) شتاب متوسط در بازهٔ زمانی $t_۱=۰s$ تا $t_۲=۲۰s$ را به‌دست آورید.

پ) در هر یک از بازه‌های زمانی $t_۱=۵s$ تا $t_۲=۱۱s$ و $t_۱=۱۱s$ تا $t_۲=۲۰s$ خودرو چقدر جابه‌جا شده است؟

ت) سرعت متوسط خودرو در بازه‌های $t_۱=۵s$ تا $t_۲=۱۱s$ و $t_۱=۱۱s$ تا $t_۲=۲۰s$ را به‌دست آورید.

۱ــ۴ حرکت سقوط آزاد

۲۳. گلوله‌ای را باید از چه ارتفاعی رها کنیم تا پس از ۲/۰ ثانیه به زمین برسد؟ سرعت گلوله در نیمهٔ راه و همچنین در لحظهٔ برخورد به زمین چقدر است؟ مقاومت هوا را نادیده بگیرید.

۲۴. الف) گلولهٔ A را در شرایط خلأ از ارتفاع h و بدون سرعت اولیه رها می‌کنیم. سه ثانیه بعد گلولهٔ B را از ارتفاع $h/۴$ و بدون سرعت اولیه رها می‌کنیم. نسبت سرعت گلولهٔ A به سرعت گلولهٔ B در لحظهٔ رسیدن به زمین چقدر است؟

ب) اگر دو گلوله همزمان به زمین برسند، مدت زمان سقوط هر گلوله و ارتفاع h را پیدا کنید.

۲۵. سنگی از بام ساختمانی بدون سرعت اولیه و در شرایط خلأ به طرف زمین رها می‌شود.

الف) اگر سنگ در ۲ ثانیهٔ آخر حرکت خود ۶۰ متر را طی کند، ارتفاع ساختمان چند متر است؟

ب) سرعت سنگ درست پیش از برخورد به زمین چقدر است؟

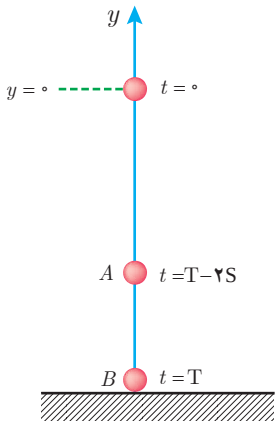
به این ترتیب مدت زمانی که گلولهٔ A در راه بوده است برابر است با

$$-\frac{۱}{۲}gt^۲ = -۲g(t-۳)^۲ \Rightarrow t = ۶\text{s}$$

چون گلولهٔ B با ۳ ثانیه تأخیر رها شده است، به این ترتیب این گلوله پس از ۳ ثانیه به زمین می‌رسد.

$$h = \frac{۱}{۲}gt^۲ = \frac{۱}{۲}(۹/۸\text{m}/\text{s}^۲)(۶\text{s})^۲ = ۱۷۶/۴\text{m}$$

۲۵ الف) ارتفاع ساختمان را h و زمان کل حرکت سنگ را T فرض می‌کنیم. اگر مبدأ مختصات را محل رها شدن سنگ بگیریم($y_۰=۰$) در این صورت معادله حرکت ۱ــ۱۳ را برای هر یک از نقاط A و B به‌طور جداگانه می‌نویسیم.



مختصات مکان و زمان نقطهٔ A عبارت است از

$$y_A = -h + ۶۰\text{m}\ ,\ t = T - ۲\text{s}$$

همچنین مختصات مکان و زمان سنگ در نقطهٔ B عبارت است از

$$y_B = -h\ ,\ t = T$$

به این ترتیب با جای‌گذاری در معادلهٔ ۱ــ۱۳ داریم :

$$\begin{cases} -h + ۶۰ = -\frac{۱}{۲}g(T-۲)^۲ & (۱) \\ -h = -\frac{۱}{۲}gT^۲ & (۲) \end{cases}$$

با جای‌گذاری (۲) در (۱) داریم

$$-h + ۶۰ = -h - ۲g + ۲g\sqrt{\frac{۲h}{g}}$$

$$۶۰ + g = ۲g\sqrt{\frac{۲h}{g}}$$

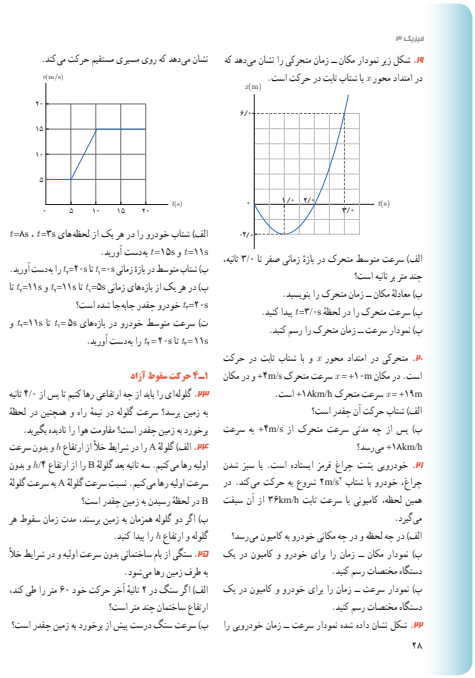
$$(۶۰+g)^۲ = ۸gh$$

$$h = \frac{(۶۰+۹/۸)^۲}{۸\times ۹/۸} \approx ۸۰/۸\text{m}$$

ب) از رابطهٔ ۱ــ۱۴ داریم :

$$v_B^۲ = -۲\times ۹/۸(-۸۰/۸ - ۰) = ۱۵۸۴$$

$$v_B \simeq -۳۹/۸\,\text{m}/\text{s}$$



فیزیک ۳

۱۴. شکل زیر نمودار مکان ــ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x با شتاب ثابت در حرکت است.

الف) سرعت متوسط متحرک در بازهٔ زمانی صفر تا ۳/۰ ثانیه، چند متر بر ثانیه است؟

ب) معادلهٔ مکان ــ زمان متحرک را بنویسید.

پ) سرعت متحرک را در لحظهٔ $t=۳/۰\text{s}$ پیدا کنید.

ت) نمودار سرعت ــ زمان متحرک را رسم کنید.

۱۵. متحرکی در امتداد محور x و با شتاب ثابت در حرکت است. در مکان $x=+۱۰\text{m}$ سرعت متحرک $v=+۴\text{m/s}$ و در مکان $x=+۱۹\text{m}$ سرعت متحرک $+۱۸\text{km/h}$ است.

الف) شتاب حرکت آن چقدر است؟

ب) پس از چه مدتی سرعت متحرک از $+۴\text{m/s}$ به سرعت $+۱۸\text{km/h}$ می‌رسد؟

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

الف) در چه لحظه و در چه مکانی خودرو به کامیون می‌رسد؟

ب) نمودار مکان ــ زمان را برای خودرو و کامیون در یک دستگاه مختصات رسم کنید.

پ) نمودار سرعت ــ زمان را برای خودرو و کامیون در یک دستگاه مختصات رسم کنید.

۱۷. شکل نشان داده شده نمودار سرعت ــ زمان خودرویی را نشان می‌دهد که روی مسیری مستقیم حرکت می‌کند.

الف) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه‌های $t=۸\text{s}$ ، $t=۱۱\text{s}$ و $t=۱۵\text{s}$ به‌دست آورید.

ب) شتاب متوسط در بازهٔ زمانی $t_۱=۰$ تا $t_۲=۲۰\text{s}$ را به‌دست آورید.

پ) در هر یک از بازه‌های زمانی $t_۱=۵\text{s}$ تا $t_۲=۱۱\text{s}$ و $t_۱=۱۱\text{s}$ تا $t_۲=۲۰\text{s}$ خودرو جلفدر جابه‌جا شده است؟

ت) سرعت متوسط خودرو در بازه‌های $t_۱=۵\text{s}$ تا $t_۲=۱۱\text{s}$ و $t_۱=۱۱\text{s}$ تا $t_۲=۲۰\text{s}$ را به‌دست آورید.

۱ــ۴ حرکت سقوط آزاد

۱۸. گلوله‌ای را باید از چه ارتفاعی رها کنیم تا پس از ۲/۰ ثانیه به زمین برسد؟ سرعت گلوله در نیمهٔ راه و همچنین در لحظهٔ برخورد به زمین چقدر است؟ مقاومت هوا را نادیده بگیرید.

۱۹. الف) گلولهٔ A را در شرایط خلأ از ارتفاع h و بدون سرعت اولیه رها می‌کنیم. سه ثانیه بعد گلولهٔ B را از ارتفاع $h/۴$ و بدون سرعت اولیه رها می‌کنیم. نسبت سرعت گلولهٔ A به سرعت گلولهٔ B در لحظهٔ رسیدن به زمین چقدر است؟

ب) اگر دو گلوله همزمان به زمین برسند، مدت زمان سقوط هر گلوله و ارتفاع h را پیدا کنید.

۲۰. سنگی از بام ساختمانی بدون سرعت اولیه و در شرایط خلأ به طرف زمین رها می‌شود.

الف) اگر سنگ در ۲ ثانیهٔ آخر حرکت خود ۶۰ متر را طی کند، ارتفاع ساختمان چند متر است؟

ب) سرعت سنگ درست پیش از برخورد به زمین چقدر است؟

فصل دوم

دینامیک و حرکت دایره‌ای

۲ـ۱ـ قوانین حرکت نیوتون
۲ـ۲ـ معرفی برخی از نیروهای خاص
۲ـ۳ـتکانه و قانون دوم نیوتون
۲ـ۴ـ حرکت دایره‌ای یکنواخت
۲ـ۵ـ نیروی گرانشی
راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

پیامدها

دانش‌آموزان با درک مفاهیم این فصل :

- اثر نیرو بر یک جسم را می‌شناسند.
- با مرکز جرم جسم آشنا می‌شوند.
- قوانین حرکت نیوتون را می‌شناسند.
- با حالت متوازن بودن نیروها آشنا می‌شوند.
- با ویژگی لختی یک جسم آشنا می‌شوند.
- با رابطهٔ نیرو و شتاب آشنا می‌شوند.
- با برخی از نیروها مانند وزن، مقاومت شاره، نیروی عمودی سطح، نیروی کشش نخ، نیروی اصطکاک و کشسانی آشنا می‌شوند.
- نیروهای وارد بر یک جسم را رسم کرده و نیروی خالص وارد بر جسم را محاسبه می‌کنند.
- با کمک قانون دوّم نیوتون، شتاب یک جسم را محاسبه می‌کنند.
- با تکانه و قانون دوم نیوتون برحسب تکانه آشنا می‌شوند.
- با کمک نمودار نیرو ــ زمان، تغییر تکانهٔ یک جسم را تعیین می‌کنند.
- با حرکت دایره‌ای یکنواخت و نیروی مرکزگرا و شتاب مرکزگرا آشنا می‌شوند.
- با نیروی گرانشی و قانون گرانش آشنا می‌شوند.
- وزن را براساس نیروی گرانش می‌شناسند.
- شتاب گرانشی یک جسم را در اطراف زمین تعیین می‌کنند.

چه شناختی مطلوب است؟

- اثر نیرو را که به‌صورت شروع به حرکت کردن، توقف، کم و زیاد شدن اندازه سرعت (تندی)، تغییر جهت سرعت و تغییر شکل آن جسم، خود را نشان می‌دهد را می‌توان به مفهوم سرعت ربط داد و آن را به صورت خلاصه نشان داد که نیروی وارد بر یک جسم می‌تواند سبب تغییر سرعت جسم یا تغییر شکل آن شود.
- مفهوم متوازن بودن نیروهای وارد بر جسم را درک کند و بداند وقتی نیروهای وارد بر جسم متوازن‌اند، تغییری در سرعت جسم ایجاد نمی‌شود.
- براساس قانون اول نیوتون حالت سکون و سرعت ثابت معادل یکدیگر هستند و یک جسم حالت سکون یا حرکت با سرعت ثابت خود را حفظ می‌کند مگر آنکه نیروی خالصی (غیرصفر) برآن وارد شود.
- مفهوم لختی و نقش کمربند ایمنی را درک کند و به ایمنی خود و دیگران اهمیت دهد.
- شتاب همواره در جهت نیروی خالص وارد برجسم است نه در جهت حرکت جسم.
- $m\vec{a}$ نیرو نیست بلکه نیروی خالص وارد برجسم برابر با حاصل‌ضرب جرم جسم در شتاب آن است.

- به کمک قانون دوم نیوتون می‌توان شتاب یک جسم را به‌دست آورد و سپس به کمک روابط حرکت می‌توان، سرعت، جابه‌جایی و ... را تعیین کرد.
- نیروی کنش و واکنش همنوع، هم‌اندازه و در خلاف جهت یکدیگرند و ممکن است منجر به اثرات متفاوتی شوند.
- نیروی کنش و واکنش ممکن است منجر به شتاب‌های متفاوتی بر جسم‌های اثرگذارشوند.
- با تشخیص نیروهای وارد بر جسم، نیروی خالص وارد بر جسم را تعیین کرده و از قانون دوم نیوتون شتاب جسم را تعیین کند.
- بر یک سیب هنگام آویزان بودن از درخت، هنگام سقوط و هنگام برخورد با زمین نیروی گرانشی (وزن) وارد می‌شود.
- نمودار تندی برحسب زمان یک چترباز، بستگی به زمان بازکردن چتر، به شکل‌های متفاوتی رسم می‌شود.
- با درنظر گرفتن مقاومت هوا، دو جسم هم‌اندازه ولی با جرم‌های متفاوت، با شتاب‌های متفاوت سقوط می‌کنند. امّا اگر از مقاومت هوا صرف‌نظر شود، شتاب سقوط همهٔ اجسام یکسان خواهد بود.
- نیروی عمودی سطح، ناشی از تغییر شکل سطح تماس دو جسم است.
- ترازوی فنری در آسانسور که شخص روی آن ایستاده است، در حالت‌های مختلف حرکت آسانسور، اعداد متفاوتی را برحسب نیوتون نشان می‌دهد.
- نیروی اصطکاک جنبشی و ایستایی را از هم تمیز می‌دهد و بسته به شرایط مسئله و براساس نیروهای وارد بر جسم، حرکت جسم را تحلیل و شتاب آن را تعیین می‌کند.
- آزمایش‌هایی برای تعیین ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی طراحی می‌کند.
- در نمودار نیروی کشسانی برحسب تغییر طول فنر، شیب نمودار برابر با ثابت فنر است و هرچه فنر سخت‌تر باشد، شیب نمودار بیشتر است.
- نیروی سطح از برایند نیروی عمودی سطح و نیروی اصطکاک که عمود بر هم هستند، تعیین می‌شود.
- از روی نمودار نیرو ــ زمان، تغییر تکانه یک جسم و نیروی خالص متوسط وارد بر آن را تعیین کند.
- در حرکت دایره‌ای یکنواخت، با دانستن دورهٔ حرکت و شعاع دایره، تندی و شتاب مرکزگرا را تعیین می‌کند.
- نیروی مرکزگرا، نوع جدیدی از نیرو نیست؛ مثلاً درحرکت ماهواره‌ها به دور زمین، نیروی گرانشی بین زمین و ماهواره، نیروی مرکزگرا را تأمین می‌کند.
- در حرکت خودرو در یک میدان، نیروی اصطکاک ایستایی بین لاستیک‌ها و سطح، نیروی مرکزگرای لازم برای دور زدن خودرو را تأمین می‌کند.
- منشأ نیروی مرکزگرایی که سبب چرخش ماه به دور زمین می‌شود و نیرویی که سبب سقوط سیب از درخت به طرف زمین می‌شود، یکی است.
- نیروی گرانشی بین دو ذره، از یک رابطهٔ نسبتاً ساده تعیین می‌شود و نیروی گرانشی همواره ربایشی است و مقدار آن برای حالتی که جرم یکی از اجسام یا هر دو جسم زیاد باشد، قابل ملاحظه است.
- دوره و فاصلهٔ مدار همگام با زمین را تعیین کند.
- وزن و شتاب گرانشی را برحسب نیروی گرانشی تعیین کند.

چه پرسش‌هایی اساسی است و باید درنظر گرفته شود؟

- اگر بر جسمی نیرویی وارد نشود یا نیروهای وارد برجسم متوازن باشد، حرکت جسم چگونه است؟
- شتاب یک جسم در چه جهتی است؟
- آیا نیروی کنش و واکنش اثر هم را خنثی می‌کنند؟
- آیا نیروی کنش و واکنش منجر به شتاب‌های یکسانی می‌شوند؟
- آیا وزن یک جسم در زمین و ماه یکسان است؟ جرم آن چطور؟
- حرکت یک چترباز چگونه است؟ نمودار تندی ــ زمان آن چگونه است؟ و در چه حالتی به تندی حدی می‌رسد؟
- اگر دو جسم هم‌اندازه با جرم‌های متفاوت را از ارتفاعی رها کنیم، شتاب سقوط کدام یک بیشتر است؟ اگر از مقاومت هوا صرف نظر شود شتاب سقوط آنها چگونه است؟
- شخصی روی ترازوی فنری در آسانسور ایستاده است. در چه حالت‌هایی، عددی که ترازو نشان می‌دهد، یکسان است؟
- ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی را چگونه تعیین می‌کنند؟ (با آزمایش)
- وقتی بر جسمی چند نیرو اثر می‌کند، شتاب آن را چگونه تعیین می‌کنند؟
- چگونه می‌توان ثابت فنر را تعیین کرد؟ (با آزمایش)
- چگونه می‌توان از روی تغییر تکانه، نیروی خالص متوسط وارد بر جسم را تعیین کرد؟
- چگونه می‌توان به کمک شعاع و دورهٔ حرکت یک جسم، تندی و شتابِ مرکزگرای آن را تعیین کرد؟
- چگونه با مشخصهٔ rpm می‌توان دورهٔ یک جسم را تعیین کرد؟
- ماهواره‌ها تحت تأثیر چه نیرویی به دور زمین می‌چرخند و اگر این نیرو وجود نداشته باشد، حرکت آنها چگونه خواهد بود؟ دورهٔ ماهواره و تندی آن چگونه تعیین می‌شود؟
- وزن یک جسم و شتاب آن را در ارتفاع مشخصی از سطح زمین چگونه تعیین می‌کنند؟

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

دانشی

با مفاهیم نیرو، مرکز جرم، متوازن بودن نیروها، لختی، قانون اول نیوتون، نیروی خالص، قانون دوم نیوتون، نیروهای کنش و واکنش، قانون سوم نیوتون، وزن، نیروی مقاومت شاره، نیروی مقاومت هوا، تندی حدی، نیروی عمودی سطح، نیروی اصطکاک، ضریب اصطکاک، نیروی کشسانی فنر، قانون هوک، نیروی کشش طناب، تکانه، رابطهٔ تکانه با قانون دوم نیوتون، رابطهٔ تکانه با انرژی جنبشی، حرکت دایره‌ای یکنواخت، شتاب و نیروی مرکزگرا در حرکت دایره‌ای یکنواخت، نیروی گرانشی، قانون گرانش عمومی، مدار همگام با زمین، وزن و نیروی گرانشی و شتاب گرانشی آشنا می‌شوند.

مهارتی

تعیین تغییرات حرکت یک جسم برحسب نیروهای وارد برجسم، محاسبهٔ شتاب یک جسم برحسب نیروهای وارد برجسم، تعیین جهت شتاب یک جسم برحسب نیروهای وارد بر جسم، محاسبه وزن جسم، محاسبهٔ نیروی عمودی سطح و نیروی سطح، محاسبهٔ

نیروی اصطکاک، محاسبهٔ نیروی کشسانی، تعیین ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی به کمک آزمایش، تعیین ثابت فنر به کمک آزمایشگاه، تعیین نیروی اصطکاک به کمک آزمایش، تحقیق بستگی یا عدم بستگی نیروی اصطکاک به مساحت سطح تماس دو جسم، محاسبهٔ ثابت فنر از روی نمودار نیروی کشسانی ــ تغییر طول، تعیین مساحت زیر نمودار نیروی خالص ــ زمان، تعیین دوره و تندی و شتاب مرکزگرا، محاسبه نیروی گرانش بین دو جسم، تعیین فاصلهٔ مدار همگام با زمین، محاسبهٔ وزن و شتاب گرانشی یک جسم در یک ارتفاع مشخص از سطح زمین یا روی سطح سیارات دیگر.

بودجه‌بندی پیشنهادی

براساس حجم و تعداد مفاهیم موجود در این فصل می‌توان ۲۰/۵ درصد از زمان آموزش کل کتاب را به آموزش این فصل اختصاص داد.

تصویر ابتدای هر فصل برای ایجاد انگیزه و سؤال استفاده می‌شود. معمولاً این تصویر یک کاربرد امروزی از موضوع فصل را ارائه می‌دهد. در متنِ زیرِ تصویر، چندین مطلب و سؤال ارائه شده است.

۱ چگونه یک ماهواره در زمان‌هایی طولانی می‌تواند بدون سوخت به دور زمین بچرخد؟
۲ نیروی مرکزگرای لازم برای چرخش ماهواره چگونه تأمین می‌شود؟
۳ اگر نیروی مرکزگرا وجود نداشت حرکت ماهواره چگونه بود؟
۴ نیروی گرانشی وارد بر ماهواره چگونه به‌دست می‌آید؟
۵ زمان یک دور چرخش ماهواره چگونه محاسبه می‌شود؟
۶ تندی یک ماهواره در یک مدار چگونه محاسبه می‌شود؟

در پایان این فصل دانش‌آموزان به دانش و توانایی لازم برای پاسخ دادن به این سؤالات خواهند رسید.

این فصل در ۵ بخش ارائه شده است. تا قبل از آموزش بخش ۲، یعنی معرفی برخی از نیروهای خاص، هر مثال یا تمرینی که به دانش‌آموز داده می‌شود باید نیروهای وارد بر جسم رسم شده باشد، زیرا هنوز دانش‌آموزان توانایی لازم برای رسم نیروها را ندارند.

دانش‌آموزان در علوم ششم ابتدایی، دو فصل در مورد نیرو خوانده‌اند. همچنین در علوم نهم یک فصل در مورد نیرو و یک فصل در مورد ماشین‌ها خوانده‌اند. در فصل نیرو و ماشین‌های نهم با اثرات نیرو (شروع به حرکت، توقف حرکت، تند و کُند شدن حرکت، تغییر جهت حرکت و تغییر شکل) آشنا شدند.

با توجه به آنچه در فصل ۱ این کتاب در مورد سرعت خوانده‌اند این اثرات را می‌توانند به‌صورت خلاصه بیان کنند. یعنی اثر نیروی وارد بر یک جسم می‌تواند سبب تغییر سرعت جسم یا تغییر شکل آن شود. در این صفحه از کتاب سعی می‌شود پلی بین آنچه دانش‌آموزان پیش از این در مورد نیرو خوانده‌اند و مطالب جدیدتر برقرار کنیم. به همین دلیل این صفحه از اهمیت زیادی برخوردار است و سبب یادآوری مطالب سال‌های گذشته در مورد نیرو می‌شود؛ مثلاً : نیرو اثر متقابل دو جسم بر یکدیگر است یا نیرو، حاصل بر هم‌کنش دو جسم بر یکدیگر است یا وقتی جسمی‌را هُل می‌دهیم یا می‌کشیم بر آن نیرو وارد می‌کنیم.

در حاشیهٔ کتاب مرکز جرم جسم معرفی شده است که به دانش‌آموزان کمک می‌کند تا بفهمند چرا معمولاً نیروی وارد بر جسم را از مرکز جرم جسم می‌کشیم.

فیزیک ۳۱

در تمام فعالیت‌های روزانه با نیرو سروکار داریم. راه رفتن، باز و بسته کردن در و پنجره، نوشتن، کار با گوشی همراه، شنا کردن و دوچرخه‌سواری نمونه‌هایی از این دست هستند و همچنین حرکت قطار، هواپیما، خودرو و . . . بدون اعمال نیرو انجام نمی‌شوند.

در فصل اول با کمیت‌های مکان، تندی، سرعت و شتاب آشنا شدیم و حرکت یک جسم را به کمک آنها توصیف کردیم اما از علت انواع حرکت، پرسشی مطرح نشد، مثلاً در چه صورت حرکت جسم با سرعت ثابت است؟ در چه صورت جسم دارای حرکت با شتاب ثابت روی خط راست است؟ در چه صورت جسم ساکن می‌ماند؟ و . . .

وقتی جسمی را می‌کشیم یا آن را هل می‌دهیم، به آن نیرو وارد می‌کنیم. نیرو، حاصل برهم‌کنش یا اثر متقابل دو جسم بر یکدیگر است. نیرو کمیتی برداری است که علاوه بر اندازه، جهت نیز دارد (شکل ۲ـ۱). معمولاً نیرو را با $\vec{F}$ نشان می‌دهند[۱]. در رسم نیرو از یک پاره‌خط جهت‌دار با مقیاس مناسب استفاده می‌شود؛ مثلاً در شکل ۲ـ۲، بردار وزن دو گلدان را مشاهده می‌کنید که با مقیاس مناسب رسم شده‌اند.

نیرو را به کمک نیروسنج اندازه‌گیری می‌کنیم و یکای آن، نیوتون است که با نماد N نشان داده می‌شود. اثر نیرو بر یک جسم به شکل‌های مختلف مانند شروع به حرکت کردن، توقف، کم و زیاد شدن اندازهٔ سرعت (تندی)، تغییر جهت سرعت و تغییر شکل آن جسم، خود را نشان می‌دهد. با توجه به آنچه در مورد سرعت فراگرفتیم، می‌توان به‌طور خلاصه نشان داد که نیروی وارد بر یک جسم می‌تواند سبب تغییر سرعت جسم یا تغییر شکل آن شود.

به‌طور کلی در این فصل می‌خواهیم دربارهٔ نیروها، که نقش اساسی در تغییر سرعت یک جسم یا تغییر شکل جسم دارند، قوانین حرکت و حرکت دایره‌ای بحث کنیم. در کتاب علوم نهم با مفهوم نیرو و قوانین نیوتون دربارهٔ حرکت آشنا شدیم. در اینجا ضمن مرور و یادآوری آنها، مفاهیم فراگرفته شده را گسترش می‌دهیم تا توانایی و درک شما در رابطه با مفهوم نیرو، عمق بیشتری پیدا کند و بتوانید براساس نیروهای وارد شده به یک جسم، حرکت آن را بررسی و تحلیل کنید.

شکل ۲ـ۱ هنگام وارد کردن نیرو به توپ، باید جهت و اندازهٔ نیروی وارد بر توپ به گونه‌ای باشد که توپ به مکان مناسب و موردنظر بازیکنان برخورد کند.

شکل ۲ـ۲ گاهی برای سادگی فرض می‌شود که همهٔ جرم یک جسم در یک نقطه به نام مرکز جرم جسم متمرکز شده است و بجای اینکه نیرو به قسمت‌های مختلف جسم وارد شود به این نقطه وارد می‌شود.

۲ـ۱ قوانین حرکت نیوتون

اسحاق نیوتون (۱۷۲۷ـ۱۶۴۳ م) نخستین کسی بود که به رابطهٔ میان نیرو و شتاب پی برد. این رابطه همراه با دیگر قانون‌های نیوتون، اساس مکانیک نیوتونی را تشکیل می‌دهند. در این بخش به بررسی سه قانون اصلی حرکت می‌پردازیم.

قانون اول نیوتون: در علوم نهم دیدیم که اگر به جسمی به‌طور هم‌زمان چند نیرو اثر کند و این نیروها اثر یکدیگر را خنثی کنند، به عبارت دیگر برایند نیروهای وارد بر جسم صفر شود، می‌گوییم نیروهای وارد بر جسم متوازن هستند.

۱ـ F سرواژهٔ انگلیسی Force به معنای نیرو است.

۳۰

۲ـ۱ـ قوانین حرکت نیوتون

در این صفحه همچنین به بردار بودن نیرو و وسیله‌ای که با آن می‌توان نیرو را اندازه‌گیری کرد، اشاره شده است. توجه کنید در این کتاب سعی شده است از آخرین استانداردهای آموزش فیزیک در انتخاب تعاریف، قوانین، اصل‌ها، نمادگذاری‌ها و... استفاده شود. علت متفاوت بودن برخی قوانین یا تعاریف آورده شده در این کتاب با کتاب‌های قبلی، همین استانداردسازی‌های جدید است؛ مثلاً نمادگذاری نیروی عمودی سطح در کتاب‌های جدید به‌صورت F_N، نیروی مقاومت شاره و هوا به‌صورت F_D، نیروی کشسانی F_e، نیروی خالص F_{net} و... است.

تحقیقات آموزشی نشان می‌دهد قبل از آنکه وارد بحث قوانین حرکت شویم بهتر است حالتی که بر یک جسم هم‌زمان چند نیرو اثر می‌کنند و این نیروها اثر همدیگر را خنثی می‌کنند به عبارت دیگر نیروها متوازن‌اند، بحث شود. در مورد حالت نیروهای متوازن در علوم نهم به اندازهٔ کافی دانش‌آموزان مطالبی را خوانده‌اند : کافی است در اینجا فقط یادآوری‌هایی صورت گیرد.

پاسخ پرسش۲ــ۱

این پرسش برای یادآوری حالت متوازن در نیروهاست؛ چون نیروها هم‌راستا و عمود بر هم هستند، پاسخ به آن بسیار ساده است.

نیروی شناوری اثر نیروی وزن را و نیروی مقاومت اثر نیروی پیشران را خنثی می‌کنند.

تعریف ارائه شده برای قانون اول نیوتون براساس استانداردهای جدید ارائه شده است. بهتر است همکاران محترم در ارائه تعاریف، اصل‌ها، نظریه‌ها و قانون‌های فیزیکی کاملاً به کتاب‌درسی پایبند باشند تا خدای نکرده حقی از دانش‌آموزان در آزمون‌های رسمی‌مانند امتحانات نهایی و کنکور ضایع نشود.

در آموزش قانون اول نیوتون به نقش اساسی گالیله در این قانون اشاره شود. این نقش آن‌قدر مهم است که در برخی از کتاب‌های دنیا به قانون اول حرکت نیوتون قانون گالیله نیز می‌گویند. آزمایش‌های فکری ــ عملی گالیله نقش بسیار جدّی برای رسیدن به این قانون داشتند. از قانون اوّل نیوتون نتیجه می‌گیریم : از نظر فیزیک؛ حالت سکون و حالت با سرعت ثابت معادل یکدیگر هستند.

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

پرسش ۲ــ۱

در شکل روبه‌رو یک کشتی در حال حرکت را می‌بینید که نیروهای وارد بر آن متوازن‌اند. کدام نیروها از یکدیگر را خنثی کرده‌اند؟

قبل از سال ۱۶۰۰ میلادی دیدگاه رایج این بود که هر جسمِ در حال حرکتی برای ادامهٔ حرکت حتماً نیاز به نیرو دارد، ولی گالیله با طراحی آزمایش‌هایی ذهنی نتیجه گرفت که در نبود نیرو، حرکت جسم متحرک ادامه می‌یابد. نیوتون نظر گالیله را به‌صورت یک قانون بیان کرد که به نام قانون اول نیوتون شهرت دارد : «یک جسم، حالت سکون یا حرکت با سرعت ثابت خود را حفظ می‌کند مگر آنکه نیروی خالص غیرصفری به آن وارد شود». به عبارت دیگر وقتی نیروهای وارد بر جسمی متوازن باشند، اگر جسم ساکن باشد، همچنان ساکن باقی می‌ماند و اگر در حال حرکت باشد، سرعت جسم تغییر نمی‌کند و ثابت می‌ماند.

پرسش ۲ــ۲

در فیلمی علمی ــ تخیلی، موتور یک کشتی فضایی که در فضای تهی خارج از جو زمین و دور از هر سیاره و خورشید در حرکت است، از کار می‌افتد. در نتیجه حرکت کشتی فضایی کُند می‌شود و می‌ایستد. آیا امکان وقوع چنین رویدادی وجود دارد؟ توضیح دهید.

فعالیت۲ــ۱

دربارهٔ آزمایش ذهنی گالیله تحقیق کنید و به کلاس گزارش دهید.

فرض کنید در اتوبوسی نشسته‌اید و اتوبوس در یک جادهٔ مستقیم حرکت می‌کند. اگر راننده ترمز کند و شما کمربند خود را نبسته باشید، ممکن است به جلو پرتاب شوید (متمایل شوید)، یا اگر اتوبوس ساکن باشد و ناگهان شروع به حرکت کند، به طرف عقب به صندلی خود فشرده می‌شوید. آیا علت آن را می‌دانید؟ بر اساس قانون اول نیوتون، اگر بر جسم نیروی خالصی وارد نشود، جسم ساکن می‌ماند و یا با سرعت ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهد. به این خاصیت اجسام که میل دارند وضعیت حرکت خود را هنگامی که نیروی خالص وارد بر آنها صفر است حفظ کنند، لختی[۱] گویند.

۱ــ Inertia

۳۱

پاسخ پرسش ۲ــ۲

هدف از این پرسش گسترش آموخته‌های دانش‌آموزان به دنیای واقعی آنهاست. دانش‌آموزان حتّی وقتی یک کارتون را می‌بینند، باید با نگاهی علمی‌آن را تجزیه و تحلیل کنند و بتوانند تشخیص دهند که آنچه می‌بینند می‌تواند واقعی باشد یا نه؟

در صورت این پرسش به «فضای تهی خارج از جو» و همچنین «دور از هر سیاره و خورشید» اشاره شده است، با توجه به این مطالب باید دانش‌آموز نتیجه بگیرد که نیروی مقاومت هوا که بخواهد در خلاف جهت حرکت بر سفینه وارد شود، وجود ندارد. همچنین دور بودن از هر سیاره و خورشید معادل (تقریبی) صفر بودن نیروی گرانشی وارد بر سفینه است. پس این سفینه با خاموش شدن موتورش، به راه خودش با همان سرعت هنگام خاموش شدن موتور ادامه می‌دهد، زیرا بر سفینه نیرویی وارد نمی‌شود.

پاسخ فعالیت ۲ـ۱

این آزمایش ذهنی، کمک زیادی کرد تا نیوتون قانون اوّل را بیان کند. دانستنی زیر کمک می‌کند تا در مورد آنچه دانش‌آموزان قرار است تحقیق کنند، بیشتر بدانیم.

گالیله طبق شکل‌های زیر، گوی‌ها را در ارتفاع معینی روی سطح شیب‌دار صافی قرار داد و آنها را رها کرد تا به پایین بلغزند و از سطح شیب‌دار روبه‌رویی بالا روند. او تا حد امکان سطوح تماس را صاف و صیقلی کرد. وی دریافت که گوی تا نزدیکی همان ارتفاع روی سطح شیب‌دار مقابل بالا می‌رود. گالیله شیب‌های مختلفی را برای سطح شیب‌دار دوم اختیار کرد و همان نتیجه را به‌دست آورد. بدیهی است که هر چه شیب‌سطح شیب‌دار دوم کمتر باشد، جسم برای رسیدن به همان ارتفاع مسافت بیشتری را روی سطح شیب‌دار می‌پیماید. وی استدلال کرد که اگر بتوان از اصطکاک صرف‌نظر کرد، جسم روی سطح شیب‌دار دوم تا همان ارتفاع اوّلیه بالا می‌رود. حال اگر شیب سطح دوم صفر شود یعنی سطح افقی باشد جسم باید برای همیشه روی آن با سرعت ثابت حرکت کند.

گالیله از این آزمایش فکری ــ عملی نتیجه گرفت که برای حرکت یکنواخت جسم روی خط راست نیازی به وارد کردن نیرو به جسم نیست.

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

پرسش ۲ـ۱

در شکل روبه‌رو یک کشتی در حال حرکت را می‌بینید که نیروهای وارد بر آن متوازن‌اند. کدام نیروها از یکدیگر را خنثی کرده‌اند؟

قبل از سال ۱۶۰۰ میلادی دیدگاه رایج این بود که هر جسم در حال حرکتی برای ادامهٔ حرکت حتماً نیاز به نیرو دارد، ولی گالیله با طراحی آزمایش‌هایی ذهنی نتیجه گرفت که در نبود نیرو، حرکت جسم متحرک ادامه می‌یابد. نیوتون نظر گالیله را به‌صورت یک قانون بیان کرد که به نام قانون اول نیوتون شهرت دارد: «یک جسم، حالت سکون یا حرکت با سرعت ثابت خود را حفظ می‌کند مگر آنکه نیروی خالص غیرصفری به آن وارد شود». به عبارت دیگر وقتی نیروهای وارد بر جسمی متوازن باشند، اگر جسم ساکن باشد، همچنان ساکن باقی می‌ماند و اگر در حال حرکت باشد، سرعت جسم تغییر نمی‌کند و ثابت می‌ماند.

پرسش ۲ـ۲

در فیلمی علمی ــ تخیلی، موتور یک کشتی فضایی که در فضای تهی خارج از جو زمین و دور از هر سیاره و خورشید در حرکت است، از کار می‌افتد. در نتیجه حرکت کشتی فضایی کُند می‌شود و می‌ایستد. آیا امکان وقوع چنین رویدادی وجود دارد؟ توضیح دهید.

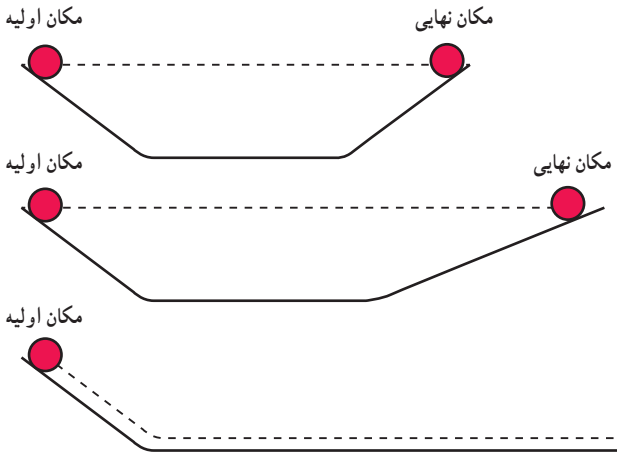
فعالیت ۲ـ۱

دربارهٔ آزمایش ذهنی گالیله تحقیق کنید و به کلاس گزارش دهید.

فرض کنید در اتوبوسی نشسته‌اید و اتوبوس در یک جادهٔ مستقیم حرکت می‌کند. اگر راننده ترمز کند و شما کمربند خود را نبسته باشید، ممکن است به جلو پرتاب شوید (متمایل شوید)، یا اگر اتوبوس ساکن باشد و ناگهان شروع به حرکت کند، به طرف عقب به صندلی خود فشرده می‌شوید. آیا علت آن را می‌دانید؟ بر اساس قانون اول نیوتون، اگر بر جسم نیروی خالصی وارد نشود، جسم ساکن می‌ماند و یا با سرعت ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهد. به این خاصیت اجسام که میل دارند وضعیت حرکت خود را هنگامی که نیروی خالص وارد بر آنها صفر است حفظ کنند، لختی[1] گویند.

۱ـ Inertia

۳۱



دانستنی در مورد لختی

جرم یک جسم معیاری از مقدار لختی جسم در برابر تغییر حرکت است. هر چه جرم یک جسم بیشتر باشد، بر اثر اعمال نیروی ثابت و معین شتاب کمتری می‌گیرد. همان‌طور که می‌دانیم یکای جرم جسم در SI، کیلوگرم (kg) است و جرم کمیتی نرده‌ای که از قواعد حساب معمولی پیروی می‌کند.

پاراگراف آخر این صفحه (صفحهٔ ۳۱ کتاب درسی) از اهمیت خاصی برخوردار است. این بحث را می‌توان کمی گسترش داد و به اهداف نگرشی در مورد بستن کمربند ایمنی و نقش آن در کاهش خسارت‌های جانی ناشی از تصادفات اشاره کرد. در پایان این بحث دانش‌آموزان به این نتیجه برسند که بستن کمربند ایمنی یک انتخاب نیست بلکه یک ضرورت است.

برای لختی مثال خیلی مرسوم ظرف سُس است که سس آن بسیار کم شده است و آن را با سرعت زیاد به طرف پائین حرکت داده و ناگهان آن را متوقف می‌کنیم و محتویات داخل ظرف به علت لختی به طرف دهانه ظرف سس حرکت می‌کنند.

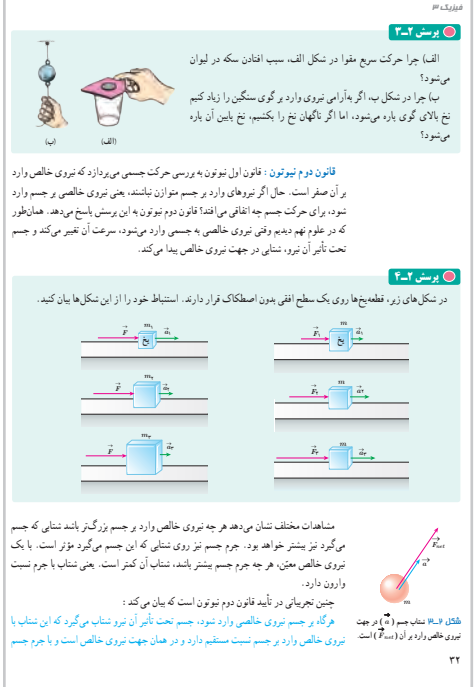
یا کشاورزان و کارگران با ضربه‌زدن به انتهای دستهٔ بیل یا کلنگ به زمین سبب سفت‌شدن بیل به دسته یا کلنگ می‌شوند.

پاسخ پرسش ۲ــ۳

هدف این پرسش ارائه چند مثال از پدیدهٔ لختی است.

الف) سکه تمایل دارد حالت سکون خود را براساس لختی حفظ کند. بنابراین وقتی مقوا سریع کشیده می‌شود (تغییر تکانهٔ وارد به سکه نیز کم بوده $F\Delta t=\Delta P$) سکه در لیوان می‌افتد.

ب) کشش نخ در بالای گوی هم‌اندازه با وزن گوی و نیرویی است که دست وارد می‌کند امّا کشش نخ در پایین گوی هم‌اندازه با نیرویی است که دست وارد می‌کند. پس در حالت معمولی کشش در بالای گوی بیشتر از پایین گوی است. حال فرض کنید ناگهان نخ را با نیروی زیادی بکشیم، قبل از آنکه تأثیر نیروی دست به علت وجود گوی به نخ بالای گوی برسد، قسمت پایین نخ این کشش را پیدا می‌کند و اگر این نیرو بیشتر از حدی باشد که نخ می‌تواند تحمل کند، نخ از پایین پاره می‌شود. بنابراین نقش لختی گوی را در این مثال می‌توان ملاحظه کرد.



فیزیک ۳

پرسش ۲ــ۳

الف) چرا حرکت سریع مقوا در شکل الف، سبب افتادن سکه در لیوان می‌شود؟

ب) چرا در شکل ب، اگر به‌آرامی نیروی وارد بر گوی سنگین را زیاد کنیم نخ بالای گوی پاره می‌شود، اما اگر ناگهان نخ را بکشیم، نخ پایین آن پاره می‌شود؟

(ب) (الف)

قانون دوم نیوتون : قانون اول نیوتون به بررسی حرکت جسمی می‌پردازد که نیروی خالص وارد بر آن صفر است. حال اگر نیروهای وارد بر جسم متوازن نباشند، یعنی نیروی خالصی بر جسم وارد شود، برای حرکت جسم چه اتفاقی می‌افتد؟ قانون دوم نیوتون به این پرسش پاسخ می‌دهد. همان‌طور که در علوم تهم دیدیم وقتی نیروی خالصی به جسمی وارد می‌شود، سرعت آن تغییر می‌کند و جسم تحت تأثیر آن نیرو، شتابی در جهت نیروی خالص پیدا می‌کند.

پرسش ۲ــ۴

در شکل‌های زیر، قطعه‌یخ‌ها روی یک سطح افقی بدون اصطکاک قرار دارند. استنباط خود را از این شکل‌ها بیان کنید.

مشاهدات مختلف نشان می‌دهد هر چه نیروی خالص وارد بر جسم بزرگ‌تر باشد شتابی که جسم می‌گیرد نیز بیشتر خواهد بود. جرم جسم نیز روی شتابی که این جسم می‌گیرد مؤثر است. با یک نیروی خالص معین، هر چه جرم جسم بیشتر باشد، شتاب آن کمتر است. یعنی شتاب با جرم نسبت وارون دارد.

شکل ۶ــ۳۱ شتاب جسم ($\vec{a}$) در جهت نیروی خالص وارد بر آن ($\vec{F}_{net}$) است.

چنین تجربیاتی در تأیید قانون دوم نیوتون است که بیان می‌کند :

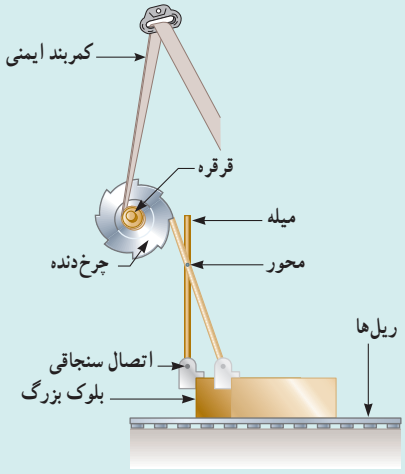
هرگاه بر جسم نیروی خالصی وارد شود، جسم تحت تأثیر آن نیرو شتاب می‌گیرد که این شتاب با نیروی خالص وارد بر جسم نسبت مستقیم دارد و در همان جهت نیروی خالص است و با جرم جسم

۳۲

دانستنی

کاربرد لختی در طراحی و ساخت دستگاه کمربند ایمنی

می‌توان از لختی برای توصیف عملکرد یک نوع از سازوکار کمربندهای ایمنی خودروها استفاده کرد. در صورت وقوع تصادف، هدف کمربند ایمنی محکم نگه‌داشتن مسافر در جای خود نسبت به خودرو است تا مانع از جراحت جدی شود. شکل روبه‌رو نشان می‌دهد کمربندی که از روی شانه گذرد چگونه کار می‌کند. در شرایط عادی، چرخ‌دنده آزادانه می‌چرخد تا با حرکت مسافر کمربند دور قرقره بپیچ بخورد یا باز شود. هنگام تصادف خودرو با شتاب زیاد متوقف می‌شود. بلوک بزرگ زیر صندلی به واسطهٔ لختی، به حرکت رو به جلو در امتداد ریل‌ها ادامه می‌دهد. اتصال سنجاقی بین این بلوک و میله باعث می‌شود که میله دور مرکزش بچرخد و چرخ‌دنده را درگیر کند. در این مرحله، چرخ‌دنده در جای خود قفل شده و کمربند دیگر باز نمی‌شود.



آرایش مکانیکی برای کمربند ایمنی خودرو

تا اینجا در مورد حالت‌هایی بحث شد که نیروهای وارد بر جسم متوازن بوده‌اند. از اینجا به بعد به حالت‌هایی می‌پردازیم که نیروهای وارد بر جسم متوازن نیستند و بر جسم نیروی خالصی وارد می‌شود.

توجه داریم دانش‌آموزان در علوم نهم با قانون دوم نیوتون آشنا شده‌اند. دراینجا به کمک پرسش ۲ــ۴ می‌توان فرصتی دوباره به دانش‌آموزان داد تا خودشان بتوانند قانون دوم را کشف کنند.

پاسخ پرسش ۲ــ۴

از این شکل‌ها می‌توان استنباط کرد که: ۱ــ در همهٔ حالت‌ها که بر جسم نیرو وارد شده، جسم نیز شتاب پیدا کرده است. ۲ــ در همهٔ حالت‌ها، شتاب در جهت نیروی وارد بر جسم است ۳ــ از شکل‌های ستون اول نتیجه می‌گیریم که وقتی جرم ثابت است، با افزایش نیرو، شتاب نیز به همان نسبت افزایش پیدا می‌کند. ۴ــ از شکل‌های ستون دوم نتیجه می‌گیریم که وقتی نیرو ثابت است؛ با افزایش جرم، شتاب جسم کاهش پیدا می‌کند.

با جمع‌بندی این نتایج می‌توان دانش‌آموزان را به بیان قانون دوم نیوتون راهنمایی کرد. توجه شود که قانون دوم نیوتون براساس نیروی **خالص** بیان شده است نه براساس نیروی برایند (هر چند این دو معادل یکدیگر هستند امّا نیروی خالص برای دانش‌آموزان قابل فهم‌تر است).

فیزیک ۳

پرسش ۲ــ۳

الف) چرا حرکت سریع مقوا در شکل الف، سبب افتادن سکه در لیوان می‌شود؟

ب) چرا در شکل ب، اگر به‌آرامی نیروی وارد بر گوی سنگین را زیاد کنیم نخ بالای گوی پاره می‌شود، اما اگر ناگهان نخ را بکشیم، نخ پایین آن پاره می‌شود؟

(ب) (الف)

قانون دوم نیوتون: قانون اول نیوتون به بررسی حرکت جسمی می‌پردازد که نیروی خالص وارد بر آن صفر است. حال اگر نیروهای وارد بر جسم متوازن نباشند، یعنی نیروی خالصی بر جسم وارد شود، برای حرکت جسم چه اتفاقی می‌افتد؟ قانون دوم نیوتون به این پرسش پاسخ می‌دهد. همان‌طور که در علوم نهم دیدیم وقتی نیروی خالصی به جسمی وارد می‌شود، سرعت آن تغییر می‌کند و جسم تحت تأثیر آن نیرو، شتابی در جهت نیروی خالص پیدا می‌کند.

پرسش ۲ــ۴

در شکل‌های زیر، قطعه‌یخ‌ها روی یک سطح افقی بدون اصطکاک قرار دارند. استنباط خود را از این شکل‌ها بیان کنید.

مشاهدات مختلف نشان می‌دهد هر چه نیروی خالص وارد بر جسم بزرگ‌تر باشد شتابی که جسم می‌گیرد نیز بیشتر خواهد بود. جرم جسم نیز روی شتابی که این جسم می‌گیرد مؤثر است. با یک نیروی خالص معیّن، هر چه جرم جسم بیشتر باشد، شتاب آن کمتر است. یعنی شتاب با جرم نسبت وارون دارد.

چنین تجربیاتی در تأیید قانون دوم نیوتون است که بیان می‌کند:

هرگاه بر جسم نیروی خالصی وارد شود، جسم تحت تأثیر آن نیرو شتاب می‌گیرد که این شتاب با نیروی خالص وارد بر جسم نسبت مستقیم دارد و در همان جهت نیروی خالص است و با جرم جسم

شکل ۲ــ۱۱ شتاب جسم ($\vec{a}$) در جهت نیروی خالص وارد بر آن ($\vec{F}_{net}$) است.

۳۲

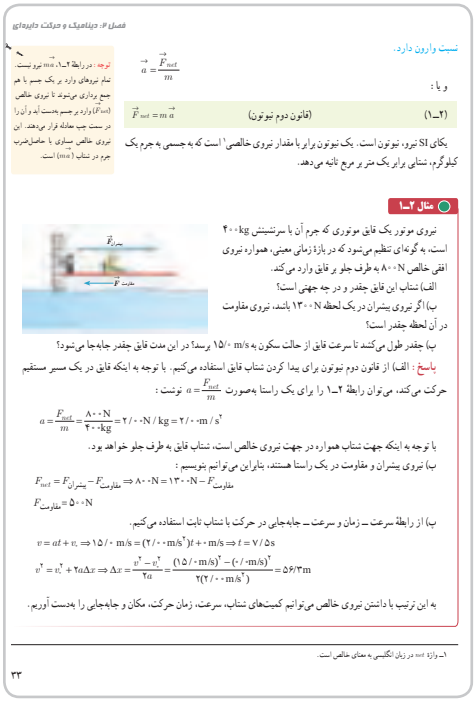
در این کتاب سعی شده است؛ هر رابطهٔ شماره داری داده می‌شود در جلوی رابطه توضیحی در مورد آن رابطه بیاید.

توجهی که در سمت چپ این صفحه آمده است مربوط به کج فهمی‌رایج بین دانش‌آموزان است. بسیاری از دانش‌آموزان فکر می‌کنند $\vec{ma}$ نیرو است.

بهتر است بعد از آموزش قانون دوم و حل چند مثال، این کج فهمی‌را برای دانش‌آموزان باز کرده و توضیح لازم را به آنها ارائه دهیم.

می‌توانیم از دانش‌آموزان بخواهیم یکای نیوتون را برحسب یکاهای بنیادی جرم، طول و زمان بنویسند.

$$1N = (1kg)(1m/s^2) \Rightarrow 1N \equiv 1kg.m/s^2$$



فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

نسبت وارون دارد.

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

و یا :

$$\vec{F}_{net} = m\vec{a} \qquad (قانون دوم نیوتون) \qquad (۱ــ۲)$$

یکای SI نیرو، نیوتون است. یک نیوتون برابر با مقدار نیروی خالصی[۱] است که به جسمی به جرم یک کیلوگرم، شتابی برابر یک متر بر مربع ثانیه می‌دهد.

توجه : در رابطهٔ ۱ــ۲، $\vec{ma}$ نیرو نیست. تمام نیروهای وارد بر یک جسم با هم جمع برداری می‌شوند تا نیروی خالص ($\vec{F}_{net}$) وارد بر جسم به‌دست آید و آن را در سمت چپ معادله قرار می‌دهند. این نیروی خالص برابری با حاصل‌ضرب جرم در شتاب ($\vec{ma}$) است.

مثال ۱ــ۲

نیروی موتور یک قایق موتوری که جرم آن با سرنشینش ۴۰۰kg است، به گونه‌ای تنظیم می‌شود که در بازهٔ زمانی معینی، همواره نیروی افقی خالص ۸۰۰N به طرف جلو بر قایق وارد می‌کند.

الف) شتاب این قایق چقدر و در چه جهتی است؟

ب) اگر نیروی پیشران در یک لحظه ۱۳۰۰N باشد، نیروی مقاومت در آن لحظه چقدر است؟

پ) چقدر طول می‌کشد تا سرعت قایق از حالت سکون به ۱۵/۰ m/s برسد؟ در این مدت قایق چقدر جابه‌جا می‌شود؟

پاسخ : الف) از قانون دوم نیوتون برای پیدا کردن شتاب قایق استفاده می‌کنیم. با توجه به اینکه قایق در یک مسیر مستقیم حرکت می‌کند، می‌توان رابطهٔ ۲ــ۱ را برای یک راستا به‌صورت $a = \frac{F_{net}}{m}$ نوشت :

$$a = \frac{F_{net}}{m} = \frac{800N}{400kg} = 2/0\,N/kg = 2/0\,m/s^2$$

با توجه به اینکه جهت شتاب هواره در جهت نیروی خالص است، شتاب قایق به طرف جلو خواهد بود.

ب) نیروی پیشران و مقاومت در یک راستا هستند، بنابراین می‌توانیم بنویسیم :

$$F_{net} = F_{پیشران} - F_{مقاومت} \Rightarrow 800N = 1300N - F_{مقاومت}$$

$$F_{مقاومت} = 500N$$

پ) از رابطهٔ سرعت ــ زمان و سرعت ــ جابه‌جایی در حرکت با شتاب ثابت استفاده می‌کنیم.

$$v = at + v_0 \Rightarrow 15/0\,m/s = (2/0\,m/s^2)t + 0\,m/s \Rightarrow t = 7/5s$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \Rightarrow \Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{(15/0\,m/s)^2 - (0/0\,m/s)^2}{2(2/0\,m/s^2)} = 56/3m$$

به این ترتیب با دانستن نیروی خالص می‌توانیم کمیت‌های شتاب، سرعت، زمان حرکت، مکان و جابه‌جایی را به‌دست آوریم.

۱ــ واژهٔ net در زبان انگلیسی به معنای خالص است.

۳۳

توجه

در این بخش چون هنوز دانش‌آموزان با نیروهای مختلف آشنا نیستند باید در مثال‌ها نیروهای وارد بر جسم را به دانش‌آموزان بدهیم. بعد از آموزش بخش بعدی (معرفی برخی از نیروهای خاص)، می‌توان از دانش‌آموزان خواست نیروهای وارد بر جسم را تعیین کنند.

مثال ۲ــ۱

در این مثال نیروهای وارد بر قایق در راستای افقی، رسم شده است. فقط از دانش‌آموزان می‌خواهیم شتاب را براساس این نیروها به دست آورند. ضمناً در قسمت پ از دانش‌آموزان خواستیم که سرعت و جابه‌جایی را به دست آورند. یعنی در اولین مثال محاسباتی این فصل بین نیرو و حرکت ارتباط را برقرار می‌کند و از دانش آموزان خواسته می‌شود براساس شتاب به دست آمده، سرعت و جابه جایی را محاسبه کنند. به عبارت دیگر با داشتن نیروی خالص می‌توانیم علاوه بر کمیت شتاب، کمیت‌های سرعت، زمان حرکت، مکان و جابه‌جایی را نیز به دست آورد.

توجه

نیرو باعث تغییر حرکت می‌شود. حرکت حتی در نبود نیروها هم صورت می‌گیرد. امّا نیروی خالص سبب تغییر حرکت می‌شود.

توجه

قانون دوم نیوتون معادله‌ای‌برداری است. در استفاده از قانون دوم نیوتون نیروی خالص را به دست آورده و آن را تقسیم بر جرم جسم می‌کنیم. تک تک نیروها را به‌صورت نرده‌ای با هم جمع نمی‌کنیم.

بسیاری از دانش‌آموزان فکر می‌کنند جهت نیروی خالص و شتاب حرکت با جهت حرکت یکی است. این مثال این کج فهمی‌رایج بین دانش‌آموزان را می‌تواند اصلاح کند.

بهتر است توجه دانش‌آموزان را به جهت حرکت، جهت نیروی خالص و جهت شتاب جلب کنیم.

همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، نیروهای وارد بر توپ توسط مؤلف داده شده است. البته بعد از معرفی نیروهای خاص، دانش‌آموزان خودشان می‌توانند این نیروها را رسم کنند.

فیزیک ۳

مثال ۲ـ۳

شکل روبه‌رو نیروهای وارد بر توپ فوتبالی به جرم ۴۲۰g را در بالاترین نقطهٔ مسیرش نشان می‌دهد که در آن $\vec{F}_1$ نیروی مقاومت هوا و $\vec{F}_2$ وزن توپ است. جهت و بزرگی شتاب توپ در این نقطه را تعیین کنید. از نیروهای دیگر وارد بر توپ صرف‌نظر می‌شود.

جهت حرکت

$F_1 = 1/0\,N$

$F_2 = 4/1\,N$

پاسخ: جهت شتاب در جهت نیروی خالص (برایند) است.

$\vec{F}_1 = (-4/1\cdot N)\,\vec{j}$ و $\vec{F}_2 = (-1/\cdot N)\,\vec{i}$

$\vec{F}_{net} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = (-1/\cdot N)\,\vec{i} + (-4/1\cdot N)\,\vec{j}$ = نیروی خالص = وزن + نیروی مقاومت هوا

$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{net}}{m} = \frac{(-1/\cdot N)\,\vec{i} + (-4/1\cdot N)\,\vec{j}}{42\cdot\times 1\cdot^{-3}\,kg} = (-2/4\,N/kg)\,\vec{i} + (-9/8\,N/kg)\,\vec{j}$

$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{(-2/4\,N/kg)^2 + (-9/8\,N/kg)^2} = 10\cdot N/kg = 10\cdot m/s^2$

قانون سوم نیوتون: وقتی فنری را می‌کشید، فنر نیز شما را می‌کشد. در برخورد راکت با توپ تنیس، راکت به توپ نیرو وارد می‌کند و توپ نیز به راکت نیرو وارد می‌کند. اگر شما دیوار را هل دهید، دیوار نیز شما را هل می‌دهد. دو بار الکتریکی بدون آنکه با هم تماس داشته باشند به هم نیروی الکتریکی وارد می‌کنند. همچنین دو قطب آهن‌ربا بدون تماس با یکدیگر به هم نیروی مغناطیسی وارد می‌کنند (شکل ۲ـ۴). در این مثال‌ها نیرو از مقابل دو جسم بر یکدیگر است.

نیروها همواره به‌صورت جفت وجود دارند. اگر یکی از این نیروها را کنش بنامیم، نیروی دیگر واکنش نامیده می‌شود. قانون سوم نیوتون رابطهٔ کمّی بین نیروهای کنش و واکنش را به‌صورت زیر بیان می‌کند:

هرگاه جسمی به جسم دیگر نیرو وارد کند، جسم دوم نیز به جسم اول نیرویی هم‌اندازه و هم‌راستا اما در خلاف جهت وارد می‌کند.

بر اساس قانون سوم نیوتون، در تمام مثال‌های بالا، هر دو نیرو هم‌اندازه و هم‌راستا ولی در خلاف جهت یکدیگرند و می‌توانیم بنویسیم:

$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1} \Rightarrow F_{1,2} = F_{2,1} \qquad \text{(قانون سوم نیوتون)} \qquad (۲ـ۲)$$

توجه داریم ممکن است نیروهای کنش و واکنش منجر به اثرات متفاوتی شود؛ مثلاً هنگام کوبیدن میخ در قطعه‌ای چوب، چکش به میخ نیرو وارد می‌کند و سبب فرورفتن میخ در چوب می‌شود. نیروی وارد از میخ به چکش حرکت چکش را کُند و متوقف می‌کند (شکل ۲ـ۵).

توجه کنید که نیروهای کنش و واکنش همواره به دو جسم وارد می‌شوند و هم‌نوع‌اند؛ مثلاً هر دو الکتریکی‌اند، یا هر دو مغناطیسی‌اند یا هر دو گرانشی‌اند و یا . . . .

۱ـ بررسی حالت‌هایی که نیروها هم‌راستا یا عمود بر هم نیستند خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

شکل ۲ـ۴ نیروهای کنش و واکنش هم‌اندازه، هم‌راستا و در خلاف جهت یکدیگرند.

شکل ۲ـ۵ چکش به میخ نیرو وارد می‌کند و میخ به چکش. این نیروها هم‌اندازه، هم‌راستا و در خلاف جهت یکدیگرند.

۳۴

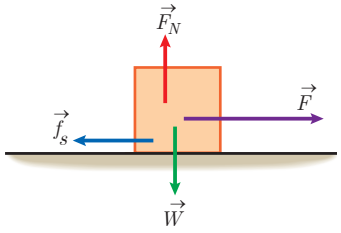
تصویرهای داده شده در شکل ۲ـ۴ نیروهای کنش و واکنش را برای حالت غیرتماسی نشان می‌دهد، امّا شکل ۲ـ۵ نیروی کنش و واکنش را برای نیروهای تماسی رسم کرده است.

دانش‌آموزان در علوم نهم با قانون سوم نیوتون آشنا شده‌اند، امّا در اینجا انتظار می‌رود به شکل گسترده‌تر و عمیق‌تر با این قانون آشنا شوند.

نظر دانش‌آموزان را باید به این نکتهٔ کتاب جلب کرد که نیروهای کنش و واکنش منجر به اثرات متفاوتی می‌شوند؛ مثلاً هنگام قدم‌زدن پای جلویی ما زمین را به عقب هُل می‌دهد و زمین ما را به جلو هُل می‌دهد. یا هنگام دوچرخه‌سواری، چرخ عقبی (در اثر اصطکاک بین چرخ و زمین) زمین را به عقب هُل می‌دهد و زمین چرخ را به جلو هُل می‌دهد و...

برای ۲ سطر آخر این صفحه که در مورد «همنوع بودن نیروی کنش و واکنش» بحث می‌کند، می‌توان مثال‌های زیادی آورد. مثلاً در شکل زیر نیروی عمودی سطح نمی‌تواند واکنش وزن باشد، زیرا نیروی عمودی از نوع الکترومغناطیسی است، امّا وزن از نوع نیروی گرانشی است.

یا نیروی کنش و واکنش بر یک جسم وارد شده‌اند، پس نمی‌توانند این دو کنش و واکنش یکدیگر باشند.



توجه مهم

در زیرنویس صفحه ۳۴ کتاب درسی نوشته شده است که : «بررسی حالت‌هایی که نیروها هم‌راستا یا عمود بر هم نیستند خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد». از این زیرنویس نتیجه می‌شود که کلیهٔ مسئله‌هایی که برای تجزیه و تحلیل آنها نیاز به تجزیه نیروها وجود دارد، خارج از برنامهٔ درسی محسوب می‌شود و همچنین تمام حالت‌هایی که برای به دست آوردن نیروی خالص باید از رابطهٔ $F=\sqrt{F_1^2+F_2^2+2F_1F_2Cos\alpha}$ استفاده شود (به جز حالت‌هایی که زاویهٔ α برابر صفر یا 90° یا 180° است) خارج از برنامهٔ کتاب درسی محسوب می‌شود.

یک کج فهمی رایج در بین دانش‌آموزان این است که فکر می‌کنند چون نیروی کنش و واکنش هم‌اندازه (نه برابر یا یکسان) هستند، بنابراین این نیروها همواره منجر به شتاب‌هایی هم‌اندازه می‌شوند. حلّ مثال ۲ــ۳ و تحلیل آن منجر به اصلاح این کج‌فهمی می‌شود.

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

مثال ۲ــ۳

دو شخص به جرم‌های ۷۵/۰kg و ۵۰/۰kg با کفش‌های چرخ‌دار در یک سالن مسطح و صاف روبه‌روی هم ایستاده‌اند. شخص اول با نیروی ۱۰۰/۰N شخص دوم را به طرف راست هُل می‌دهد.

الف) شتابی که شخص دوم می‌گیرد چقدر است؟

ب) شتابی که شخص اول می‌گیرد چقدر است؟

پاسخ : از قانون سوم نیوتون می‌دانیم نیرویی که شخص اول به دوم وارد می‌کند ($\vec{F}_{21}$) هم‌اندازه و در خلاف جهت نیرویی است که شخص دوم به اول وارد می‌کند ($\vec{F}_{12}$). با انتخاب جهت مثبت محور x به طرف راست می‌توانیم بنویسیم :

$$\vec{F}_{21}=-\vec{F}_{12}\Rightarrow F_{21}=F_{12}=100/0\,N$$

$$\vec{a}_2=\frac{\vec{F}_{12}}{m}=\frac{(100/0\,N)\,\vec{i}}{50/0\,kg}=(2/00\,\frac{N}{kg})\,\vec{i}=(2/00\,m/s^2)\,\vec{i}$$

$$\vec{a}_1=\frac{\vec{F}_{21}}{m}=\frac{-(100/0\,N)\,\vec{i}}{75/0\,kg}=-(1/33\,\frac{N}{kg})\,\vec{i}=-(1/33\,m/s^2)\,\vec{i}$$

توجه کنید نیروهای وارد بر هر دو نفر هم‌اندازه بوده است، اما به علت متفاوت بودن جرم‌ها، شتاب‌ها متفاوت شده است.

پرسش ۲ــ۵

شخصی در حال هل دادن جعبه‌ای سنگین روی سطح افقی است و این جعبه در جهت این نیرو حرکت می‌کند. با توجه به آنکه نیرویی که شخص به جعبه وارد می‌کند با نیرویی که جعبه به شخص وارد می‌کند هم‌اندازه است، توضیح دهید چگونه جعبه حرکت می‌کند؟

۲ــ۲ معرفی برخی از نیروهای خاص

بنا به قانون دوم نیوتون ($\vec{F}_{net}=m\vec{a}$) برای بررسی حرکت یک جسم باید نیروهای وارد بر آن جسم را تعیین کنیم. به همین دلیل لازم است با انواع نیروها آشنا شویم. در این بخش تعدادی از نیروهایی را که با آنها بیشتر سروکار داریم، معرفی می‌کنیم.

وزن : همان‌طور که در علوم هفتم خوانده‌ایم وزن یک جسم روی زمین، نیروی گرانشی است که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود (شکل ۲ــ۶). وقتی جسمی را در نزدیکی سطح زمین رها می‌کنیم، وزن آن سبب می‌شود تا جسم به طرف زمین شتاب پیدا کند. اگر از نیروی مقاومت هوا در مقابل حرکت چشم‌پوشی شود، طبق قانون دوم نیوتون می‌توانیم بنویسیم :

شتاب × جرم جسم = وزن جسم

اگر جرم جسم را با m، شتاب گرانشی را با $\vec{g}$ و وزن را با $\vec{W}$ نشان دهیم، رابطهٔ بالا به شکل زیر درمی‌آید :

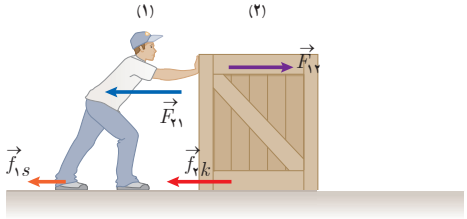
$$\vec{W}=m\vec{g} \qquad \text{(وزن جسم)} \qquad (۲ــ۳)$$

شکل ۲ــ۶ زمین بر جسم نیروی گرانشی ($\vec{W}$) وارد می‌کند و جسم نیز بر زمین نیروی گرانشی ($\vec{W}'$) وارد می‌کند

۳۵

پاسخ پرسش ۲ــ۵

شخص (۱) به جسم (۲) نیروی $\vec{F}_{12}$ را وارد می‌کند و جسم به شخص نیروی هم اندازه امّا در خلاف جهت $\vec{F}_{21}$ را وارد می‌کند. این دو نیرو (کنش و واکنش) به دو جسم متفاوت وارد می‌شود بنابراین، این دو نیرو همدیگر را خنثی نمی‌کنند. وقتی $F_{12}>f_k$ باشد، جعبه به طرف راست شتاب می‌گیرد. توجه داریم به شخص در راستای افقی دو نیروی اصطکاک f_{1s} و F_{21} وارد می‌شود و برای آنکه شخص بتواند جعبه را هل دهد باید : $F_{12}\le f_{1s,max}$ باشد.



جعبهٔ در حال حرکت

پرسش پیشنهادی

یک خودروی سواری با یک کامیون برخورد رودرو می‌کند (شاخ به شاخ).

الف) نیرویی که کامیون به خودروی سواری وارد می‌کند بیشتر است یا نیرویی که خودروی سواری به کامیون وارد می‌کند؟ توضیح دهید.

ب) در این برخورد، کدام وسیلهٔ نقلیه شتاب بیشتری می‌گیرد؟

پاسخ : الف) این دو نیرو چون کنش و واکنش هم هستند، بنابراین هم‌اندازه‌اند.

ب) با توجه به اینکه جرم خودروی سواری کمتر از جرم کامیون است، بنابراین با نیرویی هم‌اندازه، شتاب خودروی سواری بیشتر از کامیون است.

راهبرد حل مسئله : مسئله‌هایی که با قانون دوم نیوتون حل می‌شوند می‌توانند بسیار پیچیده باشند ولی ما در کتاب درسی فقط حالت‌های نسبتاً سادهٔ آن را بررسی می‌کنیم (حالت‌هایی که نیروها هم‌راستا یا عمود برهم هستند و همچنین فقط مسئله‌های تک جسمی را بررسی می‌کنیم. روال زیر فرایند حل مسئله را به مرحله‌های میانی کوچک‌تری تقسیم می‌کند.

۱ مسئله را حداقل یک بار با **دقت** می‌خوانیم.

۲ تصویر جسم مورد بررسی را کشیده و نیروهای وارد بر آن را با پیکان‌هایی نشان می‌دهیم.

۳ هر نیرو را به‌گونه‌ای برچسب می‌زنیم که یادآور کمیت فیزیکی مربوطه باشد مثلاً ($\vec{F}_N$ برای نیروی عمودی سطح یا $\vec{W}$ برای وزن یا ...)

۴ قانون دوم نیوتون را به‌کار می‌بریم. می‌توانیم قانون دوم را برای محور x و y جداگانه بنویسیم ($\sum F_x = ma_x$ و $\sum F_y = ma_y$)

۵ معادله‌ها را برای کمیت‌های مجهول حل می‌کنیم.

۶ در حالت خاص تعادل، فرایند بالا به علت صفر بودن شتاب ساده می‌شود. ($\sum F_x = 0$ و $\sum F_y = 0$)

توجه داریم اجسامی که ساکن و یا با سرعت ثابت در حال حرکت هستند را در حالت تعادل می‌نامیم.

در بخش معرفی برخی نیروها از دانش سال‌های پیش دانش‌آموزان و آنچه در دو فصل قبلی خوانده‌اند استفاده می‌کنیم (بالاخص قانون دوم نیوتون).

فصل ۴: دینامیک و حرکت دایره‌ای

مثال ۲-۳

دو شخص به جرم‌های ۷۵/۰kg و ۵۰/۰kg با کفش‌های چرخ‌دار در یک سالن مسطح و صاف روبه‌روی هم ایستاده‌اند. شخص اول با نیروی ۱۰۰/۰N شخص دوم را به طرف راست هُل می‌دهد.

الف) شتابی که شخص دوم می‌گیرد چقدر است؟

ب) شتابی که شخص اول می‌گیرد چقدر است؟

پاسخ : از قانون سوم نیوتون می‌دانیم نیرویی که شخص اول به دوم وارد می‌کند ($\vec{F}_{12}$) هم‌اندازه و در خلاف جهت نیرویی است که شخص دوم به اول وارد می‌کند ($\vec{F}_{21}$). با انتخاب جهت مثبت محور x به طرف راست می‌توانیم بنویسیم :

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12} \Rightarrow F_{21} = F_{12} = 100/0\,N$$

$$\vec{a}_{12} = \frac{\vec{F}_{12}}{m} = \frac{(100/0\,N)\,\vec{i}}{50/0\,kg} = (2/0\,\frac{N}{kg})\,\vec{i} = (2/0\,m/s^2)\,\vec{i}$$

$$\vec{a}_{21} = \frac{\vec{F}_{21}}{m} = \frac{-(100/0\,N)\,\vec{i}}{75/0\,kg} = -(1/33\,\frac{N}{kg})\,\vec{i} = -(1/33\,m/s^2)\,\vec{i}$$

توجه کنید نیروهای وارد بر هر دو نفر هم‌اندازه بوده است، اما به علت متفاوت بودن جرم‌ها، شتاب‌ها متفاوت شده است.

پرسش ۵-۲

شخصی در حال هل دادن جعبه‌ای سنگین روی سطح افقی است و این جعبه در جهت این نیرو حرکت می‌کند. با توجه به آنکه نیرویی که شخص به جعبه وارد می‌کند با نیرویی که جعبه به شخص وارد می‌کند هم‌اندازه است، توضیح دهید چگونه جعبه حرکت می‌کند؟

۲-۲ معرفی برخی از نیروهای خاص

بنا به قانون دوم نیوتون ($\vec{F}_{net} = m\vec{a}$) برای بررسی حرکت یک جسم باید نیروهای وارد بر آن جسم را تعیین کنیم. به همین دلیل لازم است با انواع نیروها آشنا شویم. در این بخش تعدادی از نیروهایی را که با آنها بیشتر سروکار داریم، معرفی می‌کنیم.

وزن : همان‌طور که در علوم هفتم خواندیم وزن یک جسم روی زمین، نیروی گرانشی است که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود (شکل ۲-۶). وقتی جسمی را در نزدیکی سطح زمین رها می‌کنیم، وزن آن سبب می‌شود تا جسم به طرف زمین شتاب پیدا کند. اگر از نیروی مقاومت هوا در مقابل حرکت چشم‌پوشی شود، طبق قانون دوم نیوتون می‌توانیم بنویسیم :

شتاب × جرم جسم = وزن جسم

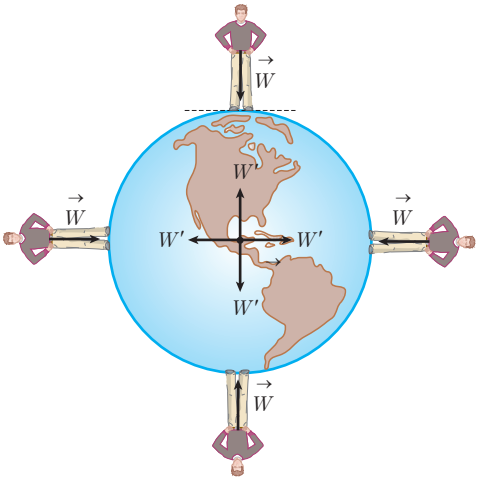
اگر جرم جسم را با m، شتاب گرانشی را با $\vec{g}$ و وزن را با $\vec{W}$ نشان دهیم، رابطهٔ بالا به شکل زیر درمی‌آید :

$$\vec{W} = m\vec{g} \qquad \text{(وزن جسم)} \qquad (۲-۲)$$

شکل ۲-۶ زمین بر جسم نیروی گرانشی ($\vec{W}$) وارد می‌کند و جسم نیز بر زمین نیروی گرانشی ($\vec{W}'$) وارد می‌کند.

۲ـ۲ـ معرفی برخی از نیروهای خاص

دانش‌آموزان با نیروی وزن کاملاً آشنا هستند. کج‌فهمی رایج در مورد شکل ۲ـ۶ آن است که اگر آدمک را زیر کره بکشیم بسیاری از دانش‌آموزان وزن را به طرف پایین کره رسم می‌کنند. پیشنهاد می‌شود چند آدمک در مکان‌های مختلف روی کره رسم شود و از دانش‌آموزان بخواهیم وزن و واکنش آن را رسم کنند (مانند شکل).



فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

مثال ۲ـ۳

دو شخص به جرم‌های ۷۵/۰kg و ۵۰/۰kg با کفش‌های چرخ‌دار در یک سالن مسطح و صاف روبه‌روی هم ایستاده‌اند. شخص اول با نیروی ۱۰۰/۰N شخص دوم را به طرف راست هُل می‌دهد.

الف) شتابی که شخص دوم می‌گیرد چقدر است؟

ب) شتابی که شخص اول می‌گیرد چقدر است؟

پاسخ : از قانون سوم نیوتون می‌دانیم نیرویی که شخص اول به دوم وارد می‌کند ($\vec{F}_{12}$) هم‌اندازه و در خلاف جهت نیرویی است که شخص دوم به اول وارد می‌کند ($\vec{F}_{21}$). با انتخاب جهت مثبت محور x به طرف راست می‌توانیم بنویسیم :

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12} \Rightarrow F_{21} = F_{12} = ۱۰۰/۰\,N$$

$$\vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_{12}}{m} = \frac{(۱۰۰/۰\,N)\,\vec{i}}{۵۰/۰\,kg} = (۲/۰۰\,\frac{N}{kg})\,\vec{i} = (۲/۰۰\,m/s^2)\,\vec{i}$$

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_{21}}{m} = \frac{-(۱۰۰/۰\,N)\,\vec{i}}{۷۵/۰\,kg} = -(۱/۳۳\,\frac{N}{kg})\,\vec{i} = -(۱/۳۳\,m/s^2)\,\vec{i}$$

توجه کنید نیروهای وارد بر هر دو نفر هم‌اندازه بوده است، اما به علت متفاوت بودن جرم‌ها، شتاب‌ها متفاوت شده است.

پرسش ۲ـ۵

شخصی در حال هل دادن جعبه‌ای سنگین روی سطح افقی است و این جعبه در جهت این نیرو حرکت می‌کند. با توجه به آنکه نیرویی که شخص به جعبه وارد می‌کند با نیرویی که جعبه به شخص وارد می‌کند هم‌اندازه است، توضیح دهید چگونه جعبه حرکت می‌کند؟

۲ـ۲ معرفی برخی از نیروهای خاص

بنا به قانون دوم نیوتون ($\vec{F}_{net} = m\,\vec{a}$) برای بررسی حرکت یک جسم باید نیروهای وارد بر آن جسم را تعیین کنیم. به همین دلیل لازم است با انواع نیروها آشنا شویم. در این بخش تعدادی از نیروهایی را که با آنها بیشتر سروکار داریم، معرفی می‌کنیم.

وزن : همان‌طور که در علوم هفتم خواندیم وزن یک جسم روی زمین، نیروی گرانشی است که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود (شکل ۲ـ۶). وقتی جسمی را در نزدیکی سطح زمین رها می‌کنیم، وزن آن سبب می‌شود تا جسم به طرف زمین شتاب پیدا کند. اگر از نیروی مقاومت هوا در مقابل حرکت چشم‌پوشی شود، طبق قانون دوم نیوتون می‌توانیم بنویسیم :

شتاب × جرم جسم = وزن جسم

اگر جرم جسم را با m، شتاب گرانشی را با $\vec{g}$ و وزن را با $\vec{W}$ نشان دهیم، رابطه بالا به شکل زیر درمی‌آید :

$$\vec{W} = m\,\vec{g} \qquad \text{(وزن جسم)} \qquad (۲ـ۲)$$

شکل ۲ـ۶ زمین بر جسم نیروی گرانشی ($\vec{W}$) وارد می‌کند و جسم نیز بر زمین نیروی گرانشی ($\vec{W}'$) وارد می‌کند

۳۵

پرسش پیشنهادی

سیبی از درخت آویزان است. در اثر باد سیب از درخت جدا شده و به طرف زمین سقوط می‌کند و سرانجام با زمین برخورد کرده و متوقف می‌شود. در کدام حالت نیروی وزن بر سیب وارد می‌شود؟

پاسخ : در تمام حالت‌های ذکر شده (وقتی از درخت آویزان است، وقتی سقوط می‌کند، در مدت زمان برخورد با زمین و هنگامی که روی زمین ساکن قرار می‌گیرد) بر سیب نیروی وزن وارد می‌شود.

در این پارگراف (پاراگراف اول) به ثابت بودن جرم و متغیر بودن وزن یک جسم اشاره می‌شود. مثلاً؛ شتاب گرانشی در قطب بیشترین مقدار و در استوا کمترین مقدار است. بنابراین جرم جسم در قطب و استوا با هم برابرند امّا اندازهٔ وزن آن در قطب بیشتر از اندازهٔ وزن آن در استوا است.

پاسخ تمرین ۲ــ۱

در این تمرین وزن یک جسم روی یک سیارهٔ دلخواه تعریف شده است. براساس این تعریف از دانش‌آموزان می‌خواهد وزن قطعهٔ طلای ۱۰۰ گرمی را در سطح زمین، ماه و مریخ به دست آورده و با هم مقایسه نمایند.

الف) $W_{\text{زمین}} = mg_{\text{زمین}} = (۰/۱۰۰\,\text{kg})(۹/۸\text{N/kg}) = ۰/۹۸\,\text{N}$

ب) $W_{\text{ماه}} = mg_{\text{ماه}} = (۰/۱۰۰\,\text{kg})(۱/۶\text{N/kg}) = ۰/۱۶\,\text{N}$

پ) $W_{\text{مریخ}} = mg_{\text{مریخ}} = (۰/۱۰۰\,\text{kg})(۳/۷\text{N/kg}) = ۰/۳۷\,\text{N}$

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، چون شتاب گرانشی در سطح زمین بیشتر از مریخ و ماه است، وزن قطعهٔ طلا نیز بیشتر است :

$$W_{\text{زمین}} > W_{\text{مریخ}} > W_{\text{زمین}}$$

$$\frac{W_{\text{زمین}}}{W_{\text{ماه}}} = \frac{mg_{\text{زمین}}}{mg_{\text{ماه}}} = \frac{g_{\text{زمین}}}{g_{\text{ماه}}} = ۶/۲ \quad \text{یا} \quad \frac{W_{\text{زمین}}}{W_{\text{مریخ}}} = \frac{mg_{\text{زمین}}}{mg_{\text{مریخ}}} = \frac{g_{\text{زمین}}}{g_{\text{مریخ}}} = ۲/۶$$

نیروی مقاومت شاره (از جمله هوا) در بسیاری از مسئله‌های دینامیک قابل صرف‌نظر کردن نیست و بدون در نظر گرفتن آن نمی‌توان مسئله را حل کرد. نیروی مقاومت شاره را می‌توان با یک ساده‌سازی این‌گونه توضیح داد؛ وقتی جسمی در یک شاره حرکت می‌کند با ذرات شاره برخورد می‌کند و در نتیجه از طرف ذرات شاره نیرویی در خلاف جهت حرکت جسم بر آن وارد می‌شود. هرچه ابعاد جسم (سطح مقطع جسم) بزرگ‌تر باشد با تعداد بیشتری ذره برخورد می‌کند. همچنین هر چه سرعت جسم بیشتر باشد، ذرات تکانهٔ بیشتری را به جسم وارد می‌کنند. بنابراین نیروی مقاومت شاره به بزرگی جسم، تندی آن و ... بستگی دارد.

مثال ۲ــ۴ : در مثال ۲ــ۴ توجه داریم که وقتی چترباز چترش را باز می‌کند، نیروی مقاومت هوا حدود ۲ برابر وزن چترباز می‌شود. پس در این‌گونه مثال‌ها که نیروی مقاومت شاره تا این حد بزرگ است، صرف‌نظر کردن از آن، عملاً حلّ مسئله را به بیراهه می‌کشاند و حتماً باید این نیرو در نظر گرفته شود. نکتهٔ مهم دیگر آن است که معمولاً نیروی مقاومت شاره متغیر است (البته در حالتی که جسم مانند چترباز به تندی حدی می‌رسد این نیرو می‌تواند ثابت و هم‌اندازه با وزن باشد) بنابراین شتاب را باید در

فیزیک ۳

توجه داریم که جهت وزن و در نتیجه شتاب گرانشی همواره به طرف زمین (مرکز زمین) است. جرم یک جسم در مکان‌های مختلف ثابت است، اما وزن آن طبق رابطهٔ ۲ــ۳ به مقدار $\vec{g}$ در آن مکان بستگی دارد. مثلاً اگر جرم شخصی $۶۰/۰\,\text{kg}$ باشد، در محلی که $g = ۹/۸۰\,\text{N/kg}$ است، وزن آن ۵۸۸N و در بالونی که در ارتفاع زیاد حرکت می‌کند و در آن ارتفاع $g = ۹/۷۶\,\text{N/kg}$ است تقریباً ۵۸۶N است. شتاب جاذبه در سطح زمین تقریباً ۹/۸N/kg است.

تمرین ۲ــ۱

الف) وزن قطعه‌ای طلا به جرم ۱۰۰ گرم را روی سطح زمین به‌دست آورید.

ب) وزن یک جسم در سطح یک سیاره یا بر یا نیروی گرانشی است که از طرف آن سیاره بر جسم وارد می‌شود. وزن این قطعه طلا را در سطح ماه و مریخ به‌دست آورید و با هم مقایسه کنید. ($g_{\text{زمین}} = ۹/۸\text{N/kg}$ ، $g_{\text{ماه}} = ۱/۶\text{N/kg}$ ، $g_{\text{مریخ}} = ۳/۷\text{N/kg}$)

توجه کنید، حتی اگر جسم در حال سقوط آزاد نباشد باز هم نیروی وزن ($\vec{W}$) بر آن وارد می‌شود. مثلاً بر یک چترباز قبل از پرش، در حال سقوط و حتی هنگام رسیدن به زمین، نیروی وزن وارد شده و از رابطهٔ ۲ــ۳ به‌دست می‌آید.

نیروی مقاومت شاره : وقتی جسمی مانند یک توپ را از بالای ساختمانی رها می‌کنیم، علاوه‌بر وزن جسم، نیروی دیگری از طرف هوا به جسم در خلاف جهت حرکت وارد می‌شود. به‌طور کلی وقتی جسمی در یک شاره (مایع یا گاز) قرار دارد و نسبت به آن حرکت می‌کند از طرف شاره نیروی در خلاف جهت حرکت جسم، به آن وارد می‌شود که به آن نیروی مقاومت شاره می‌گویند[1] و معمولاً آن را با $\vec{f}_D$ نشان می‌دهند[2]. نیروی مقاومت شاره به بزرگی جسم، تندی آن و ... بستگی دارد. هرچه تندی جسم بیشتر باشد، نیروی مقاومت شاره بیشتر خواهد شد. همان‌طور که می‌دانیم اگر جسم در هوا حرکت کند، به این نیرو، نیروی مقاومت هوا می‌گویند.

مثال ۲ــ۴

چتربازی به جرم $۶۰/۰\,\text{kg}$ مدتی پس از یک پرش آزاد، چترش را باز می‌کند. ناگهان نیروی مقاومت هوا به ۱۱۴۰N افزایش می‌یابد. شتاب چترباز را در این لحظه به‌دست آورید و حرکت آن را تحلیل کنید. برای سادگی g را $۱۰\,\text{N/kg}$ فرض کنید.

پاسخ : با توجه به شکل، نیروی وزن به طرف پایین و مقاومت هوا به طرف بالا است. اگر محور y مختصات را رو به بالا انتخاب کنیم، برای محاسبهٔ شتاب چترباز در این حالت می‌توانیم بنویسیم :

$$f_D - W = ma \Rightarrow (۱۱۴۰\,\text{N}) - (۶۰/۰\,\text{kg})(۱۰\,\frac{\text{N}}{\text{kg}}) = (۶۰/۰\,\text{kg})a$$

$$\Rightarrow a = \frac{۵۴۰\,\text{N}}{۶۰/۰\,\text{kg}} = ۹/۰\,\text{m/s}^2$$

همان‌طور که ملاحظه می‌کنید شتاب چترباز در این حالت $۹/۰\,\text{m/s}^2$ و رو به بالا، یعنی در خلاف جهت حرکت آن است. پس به‌تدریج تندی چترباز کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه نیروی مقاومت هوا نیز

۱ــ توجه کنید، نیروی مقاومت شاره با نیروی شناوری که از آن دفع یا آن آشنا هستید، متفاوت است.

۲ــ D سرواژهٔ Drag به معنای پسا (پس‌کش) است.

همان لحظه‌ای که نیروی مقاومت هوا داده شده است، محاسبه کرد. در سطر دوم این مثال نوشته شده است : «حرکت چترباز را تحلیل کنید» بنابراین در آزمون‌های رسمی‌نیز می‌توان پرسش‌هایی را مطرح کرد که از دانش‌آموز خواسته شود، حرکت یک جسم را براساس داده‌های مسئله تحلیل کند.

در انتهای مثال تندی حدی و شرایطی که به تندی حدی می‌رسیم توضیح داده شده است. با اینکه این مفهوم در پاسخ مثال آمده است، می‌تواند در آزمون‌های رسمی یا غیررسمی مورد پرسش قرار گیرد.

پرسش‌های پیشنهادی

جرم قطره بارانی که به تندی حدی خود رسیده برابر ۰/۰۵۰ g است. نیروی مقاومت هوا در مقابل حرکت قطره باران چند میلی نیوتون است؟ $(g = 9/8\ N/kg)$

پاسخ : در حالتی که نیروهای وارد بر قطره باران متوازن شده باشند، قطره باران به تندی حدی می‌رسد. بنابراین در این حالت نیروی وزن رو به پایین با نیروی مقاومت هوای روبه بالا هم اندازه هستند :

$$f_D = mg = (0/050 \times 10^{-3}\,kg)(9/8\,N/kg) = 4/9 \times 10^{-4}\,N = 0/49\,mN$$

مثال ۲ــ۵ : از این منظر بسیار مهم است که با در نظر گرفتن مقاومت هوا، شتاب جسم‌ها متفاوت با g بوده و براساس اینکه مقدار جرم چقدر است، حتی شتاب جسم‌های مختلف با هم فرق می‌کند. در این مثال جهت محور رو به پایین انتخاب شده تا تحلیل مسئله ساده‌تر شود. ضمناً دانش‌آموز متوجه می‌شود که نباید حتماً محور حرکت را رو به بالا انتخاب کند (البته در تمام قسمت‌های فصل اول و بخش‌های دیگر فصل دوم جهت محور روبه بالا انتخاب شده است). در شرایط داده شده برای این مسئله ($m_2 = 2m_1$ و $f_{D2} = f_{D1}$) جسم سنگین‌تر با شتاب بیشتری حرکت می‌کند پس با تندی بیشتری به زمین برخورد می‌کند و زمان حرکت آن نیز کمتر است.

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

کم می‌شود تا اینکه نیروی مقاومت هوا و وزن هم‌اندازه شده و نیروهای وارد بر چترباز متوازن شوند. پس از این چترباز با تندی ثابتی موسوم به تندی حدی، به طرف پایین حرکت می‌کند. تندی حدی برای یک چترباز نوعی حدود ۵/۰ m/s و برای قطرات باران حدود ۷/۰ m/s است.

مثال ۲ــ۵

دو گوی هم‌اندازه را که جرم یکی دو برابر دیگری است ($m_2 = 2m_1$) از بالای برجی به ارتفاع h بطور هم‌زمان رها می‌کنیم. با فرض اینکه نیروی مقاومت هوا در طی حرکت دو گوی ثابت و یکسان باشد، تندی برخورد کدام گوی با زمین بیشتر است؟

پاسخ : بر این گوی‌ها، دو نیروی وزن و مقاومت هوا وارد می‌شود. طبق قانون دوم نیوتون، نیروی خالص وارد بر گوی برابر با حاصل‌ضرب جرم در شتاب است. نیروی مقاومت هوا را با f_D و وزن را با W نشان می‌دهیم و برای بررسی ساده‌تر حرکت گوی‌ها، جهت مثبت محور y را به‌طرف پایین انتخاب می‌کنیم :

$$W - f_D = ma \Rightarrow a = \frac{W - f_D}{m} = \frac{mg - f_D}{m} = g - \frac{f_D}{m}$$

یعنی با درنظرگرفتن مقاومت هوا، هر چه m بیشتر باشد، شتاب حرکت بیشتر است. در نتیجه $a_2 > a_1$ است.

طبق رابطهٔ سرعت ـ جابه‌جایی می‌توانیم بنویسیم :

$$v^2 - v_0^2 = 2a\Delta y \Rightarrow v^2 - 0 = 2ah \Rightarrow v = \sqrt{2ah} \Rightarrow v_2 > v_1$$

یعنی در این مثال تندی برخورد گوی سنگین‌تر، بیشتر از گوی سبک‌تر است.

تمرین ۲ــ۲

اگر در مثال ۲ــ۵ از مقاومت هوا صرف‌نظر کنیم، سرعت برخورد گوی‌ها با زمین را با هم مقایسه کنید.

نیروی عمودی سطح : مطابق شکل ۲ــ۷، لیوانی را روی سطح افقی میزی در نظر بگیرید. بر لیوان ساکن روی میز افقی چه نیروهایی وارد می‌شود؟ با توجه به اینکه نیروی وزن بر لیوان وارد می‌شود، چه نیرویی سبب خنثی شدن آن و سکون جسم می‌شود؟

همان‌طور که می‌دانیم نیروهای وارد بر جسم ساکن، متوازن‌اند، بنابراین در این حالت باید یک نیروی هم‌اندازه و در خلاف جهت وزن از طرف میز (سطح) بر لیوان وارد شده باشد تا نیروی وزن را خنثی کند. به این نیرو که عمود بر سطح تماس است، نیروی عمودی سطح (چون گاهی می‌گویند و آن را با $\vec{F}_N$ نشان می‌دهند.

$$\vec{F}_{net} = 0 \Rightarrow \vec{F}_N + \vec{W} = 0 \Rightarrow \vec{F}_N = -\vec{W} \Rightarrow F_N = W$$

شکل ۲ــ۷ نیروهای وارد بر لیوان متوازن‌اند.

نیروی عمودی سطح ناشی از تغییر شکل سطح تماس دو جسم است. اگر جسمی سنگین را روی یک سطح اسفنجی یا یک تشک قرار دهیم تغییر شکل اسفنج یا تشک به‌خوبی دیده می‌شود. حتی یک زمین به‌ظاهر سفت و سخت نیز وقتی جسمی روی آن قرار می‌گیرد، تغییر شکل می‌دهد. این تغییر شکل مربوط به نیروهای بین مولکولی است که در فیزیک ۱ با آن آشنا شدید.

۳۷

پاسخ تمرین ۲ــ۲

هدف از طرح این تمرین آن است که بلافاصله دانش‌آموز با شرایطی که از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌شود و شتاب جسم‌ها مستقل از مقدار جرمشان برابر g می‌شود و با تندی یکسانی به زمین برخورد می‌کنند این شرایط در بحث سقوط آزاد فصل ۱ آموزش داده شده است.

نیروی عمودی سطح : می‌توان مثال ۲ــ۵ را با مقدار جرم‌های مشخص، F_D مشخص و... ارائه کرد تا دانش‌آموزان شتاب، تندی، زمان سقوط و... را محاسبه کنند.

دانش‌آموزان اغلب نمی‌دانند چرا نیروی عمودی سطح به وجود می‌آید. می‌توان از دانش‌آموزان خواست استدلال کنند چرا چنین نیرویی باید وجود داشته باشد.

توجه داریم به دست آوردن اندازهٔ نیروی عمودی سطح ($\vec{F}_N$) با قانون دوّم نیوتون امکان‌پذیر است و برای به دست آوردن آن، رابطهٔ مستقلی وجود ندارد.

در شکل ۲ــ۷ می‌توانیم از دانش‌آموزان بخواهیم نیروهای وارد بر لب‌تاپ و واکنش آنها را مشخص کنند.

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

کم می‌شود تا اینکه نیروی مقاومت هوا و وزن هم‌اندازه شده و نیروهای وارد بر جتبار متوازن شوند. پس از این جتبار با تندی ثابتی موسوم به تندی حدی، به طرف پایین حرکت می‌کند. تندی حدی برای یک جتبار نوعی حدود ۵/۰m/s و برای قطرات باران حدود ۷/۰m/s است.

مثال ۲ــ۵

دو گوی هم‌اندازه را که جرم یکی دو برابر دیگری است ($m_1 = 2m_2$) از بالای برجی به ارتفاع h به‌طور هم‌زمان رها می‌کنیم. با فرض اینکه نیروی مقاومت هوا در طی حرکت دو گوی ثابت و یکسان باشند، تندی برخورد کدام گوی با زمین بیشتر است؟

پاسخ : بر این گوی‌ها، دو نیروی وزن و مقاومت هوا وارد می‌شود. طبق قانون دوم نیوتون، نیروی خالص وارد بر گوی برابر با حاصل‌ضرب جرم در شتاب است. نیروی مقاومت هوا را با f_D و وزن را با W نشان می‌دهیم و برای بررسی ساده‌تر حرکت گوی‌ها، جهت مثبت محور y را به‌طرف پایین انتخاب می‌کنیم :

$$W - f_D = ma \Rightarrow a = \frac{W - f_D}{m} = \frac{mg - f_D}{m} = g - \frac{f_D}{m}$$

یعنی با درنظرگرفتن مقاومت هوا، هر چه m بیشتر باشد، شتاب حرکت بیشتر است. در نتیجه $a_1 > a_2$ است.

طبق رابطهٔ سرعت ــ جابه‌جایی می‌توانیم بنویسیم :

$$v^2 - v_0^2 = 2a\Delta y \Rightarrow v^2 - 0 = 2ah \Rightarrow v = \sqrt{2ah} \Rightarrow v_1 > v_2$$

یعنی در این مثال تندی برخورد گوی سنگین‌تر، بیشتر از گوی سبک‌تر است.

تمرین ۲ــ۴

اگر در مثال ۲ــ۵ از مقاومت هوا صرف‌نظر کنیم، سرعت برخورد گوی‌ها با زمین را با هم مقایسه کنید.

نیروی عمودی سطح : مطابق شکل ۲ــ۷، لب‌تابی را روی سطح افقی میزی در نظر بگیرید. بر لب‌تاب ساکن روی میز افقی چه نیروهایی وارد می‌شود؟ با توجه به اینکه نیروی وزن بر لب‌تاب وارد می‌شود، چه نیروی سبب خنثی شدن آن و سکون جسم می‌شود؟

شکل ۲ــ۷ نیروهای وارد بر لب‌تاب متوازن‌اند.

همان‌طور که می‌دانیم نیروهای وارد بر جسم ساکن، متوازن‌اند، بنابراین در این حالت باید یک نیروی هم‌اندازه و در خلاف جهت وزن از طرف میز (سطح) بر لب‌تاب وارد شده باشد تا نیروی وزن را خنثی کند. به این نیرو که عمود بر سطح تماس است، نیروی عمودی سطح (نکیه‌گاه) می‌گویند و آن را با $\vec{F}_N$ نشان می‌دهند.

$$\vec{F}_{net} = 0 \Rightarrow \vec{F}_N + \vec{W} = 0 \rightarrow F_N = -W \Rightarrow F_N = W$$

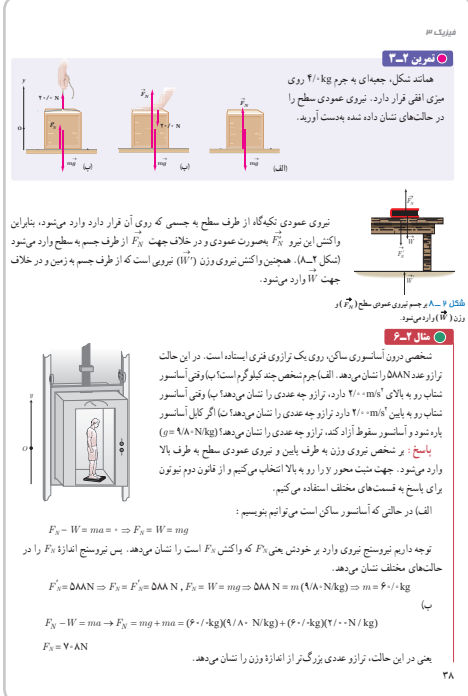
نیروی عمودی سطح ناشی از تغییر شکل سطح تماس دو جسم است. اگر جسمی سنگین را روی یک سطح اسفنجی یا یک تشک قرار دهیم تغییر شکل اسفنج یا تشک به‌خوبی دیده می‌شود. حتی یک زمین به‌ظاهر سفت و سخت نیز وقتی جسمی روی آن قرار می‌گیرد، تغییر شکل می‌دهد. این تغییر شکل مربوط به نیروهای بین مولکولی است که در فیزیک ۱ با آن آشنا شدید.

پاسخ تمرین ۲ــ۳

یک جعبه با جرم مشخص بر روی سطح قرار دارد امّا بسته به اینکه F چگونه بر جعبه وارد می‌شود (اثر می‌کند) نیروهای عمودی سطح متفاوتی به دست می‌آید. در این شکل‌ها نیز می‌توان از دانش‌آموزان خواست نیروهای واکنش را رسم کنند.

توجه داشته باشیم که $\overline{W'}$ را همانند شکل ۲ــ۸ می‌توانیم روی زمین رسم کنیم (به جای آنکه از مرکز زمین رسم کنیم).

توجه به مکان‌های $\overline{F'_N}$ و $\overline{W'}$ در شکل ۲ــ۸ بسیار آموزنده است : شاید رسم یک میز که تلویزیونی روی آن قرار دارد و اینکه از دانش‌آموزان بخواهیم نیروهای وارد بر تلویزیون و واکنش آنها را رسم کنند، مفید باشد. حتی می‌توانیم جرم تلویزیون را بدهیم و از دانش‌آموزان بخواهیم مقادیر F_N، F'_N، W و W' را به دست آورند.



فیزیک ۳

تمرین ۲ــ۳

هماننه شکل، جعبه‌ای به جرم ۴/۰kg روی میزی افقی قرار دارد. نیروی عمودی سطح را در حالت‌های نشان داده شده به‌دست آورید.

(الف) (ب) (ب)

نیروی عمودی تکیه‌گاه از طرف سطح به جسمی که روی آن قرار دارد وارد می‌شود، بنابراین واکنش این نیرو $\vec{F}'_N$ به‌صورت عمودی و در خلاف جهت $\vec{F}_N$ از طرف جسم به سطح وارد می‌شود (شکل ۲ــ۸). همچنین واکنش نیروی وزن ($\vec{W}'$) نیروی است که از طرف جسم به زمین و در خلاف جهت $\vec{W}$ وارد می‌شود.

شکل ۲ــ۸ برجسم نیروی عمودی سطح ($\vec{F}_N$) و وزن ($\vec{W}$) وارد می‌شود.

مثال ۲ــ۶

شخصی درون آسانسوری ساکن، روی یک ترازوی فنری ایستاده است. در این حالت ترازو عدد ۵۸۸N را نشان می‌دهد. الف) جرم شخص چند کیلوگرم است؟ ب) وقتی آسانسور شتاب رو به بالای ۲/۰۰m/s² دارد، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ پ) وقتی آسانسور شتاب رو به پایین ۲/۰۰m/s² دارد ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ت) اگر کابل آسانسور پاره شود و آسانسور سقوط آزاد کند، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ($g = 9/80 N/kg$)

پاسخ : بر شخص نیروی وزن به طرف پایین و نیروی عمودی سطح به طرف بالا وارد می‌شود. جهت مثبت محور y را رو به بالا انتخاب می‌کنیم و از قانون دوم نیوتون برای پاسخ به قسمت‌های مختلف استفاده می‌کنیم.

الف) در حالتی که آسانسور ساکن است می‌توانیم بنویسیم :

$$F_N - W = ma = 0 \Rightarrow F_N = W = mg$$

توجه داریم نیروسنج نیروی وارد بر خودش یعنی F_N که واکنش F_N است را نشان می‌دهد. پس نیروسنج اندازهٔ F_N را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.

$$F'_N = 588N \Rightarrow F_N = F'_N = 588\ N\ ,\ F_N = W = mg \Rightarrow 588\ N = m\,(9/80 N/kg) \Rightarrow m = 60/0 kg$$

ب)

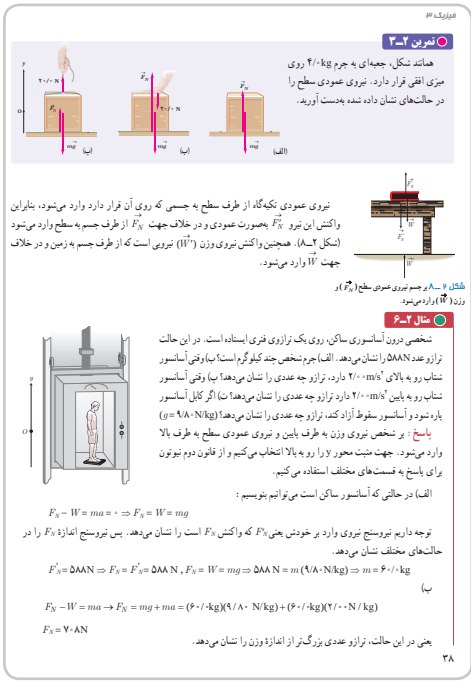
$$F_N - W = ma \rightarrow F_N = mg + ma = (60/0 kg)(9/80\ N/kg) + (60/0 kg)(2/00\ N/kg)$$

$$F_N = 720 N$$

یعنی در این حالت، ترازو عددی بزرگ‌تر از اندازهٔ وزن را نشان می‌دهد.

مثال ۲ــ۶ : معمولاً بعد از آموزش F_N یکی از مثال‌های کاربردی مربوط به نیروی عمودی سطح، عددهای متفاوتی است که شخصی روی ترازوی فنری در آسانسور ایستاده و ترازو نشان می‌دهد. توجه داریم وقتی شخصی روی ترازوی فنری یا نیروسنج می‌ایستد، ترازوی فنری نیرویی که به خودش وارد می‌شود یعنی F'_N (واکنش F_N) را نشان می‌دهد؛چون $F'_N = F_N$ است بنابراین می‌توانیم بگوییم مقدار F_N را نشان می‌دهد.

توجه به بند «ت» مثال که در آن شرایط خاصی را بیان می‌کند، از اهمیت زیادی برخوردار است.



فیزیک ۳

تمرین ۲ــ۳

هماننه شکل، جعبه‌ای به جرم ۴/۰kg روی میزی افقی قرار دارد. نیروی عمودی سطح را در حالت‌های نشان داده شده به‌دست آورید.

(الف) (ب) (پ)

نیروی عمودی تکیه‌گاه از طرف سطح به جسمی که روی آن قرار دارد وارد می‌شود، بنابراین واکنش این نیرو $\vec{F'_N}$ به‌صورت عمودی و در خلاف جهت $\vec{F_N}$ از طرف جسم به سطح وارد می‌شود (شکل ۲ــ۸). همچنین واکنش نیروی وزن ($\vec{W'}$) نیرویی است که از طرف جسم به زمین و در خلاف جهت $\vec{W}$ وارد می‌شود.

شکل ۲ــ۸ $\vec{F'_N}$ بر جسم نیروی عمودی سطح ($\vec{F_N}$) و وزن ($\vec{W}$) وارد می‌شود.

مثال ۲ــ۶

شخصی درون آسانسوری ساکن، روی یک ترازوی فنری ایستاده است. در این حالت ترازو عدد ۵۸۸N را نشان می‌دهد. الف) جرم شخص چند کیلوگرم است؟ ب) وقتی آسانسور شتاب رو به بالای ۲/۰۰m/s² دارد، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ پ) وقتی آسانسور شتاب رو به پایین ۲/۰۰m/s² دارد ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ت) اگر کابل آسانسور پاره شود و آسانسور سقوط آزاد کند، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ($g = 9/8 \text{N/kg}$)

پاسخ : بر شخص نیروی وزن به طرف پایین و نیروی عمودی سطح به طرف بالا وارد می‌شود. جهت مثبت محور y را رو به بالا انتخاب می‌کنیم و از قانون دوم نیوتون برای پاسخ به قسمت‌های مختلف استفاده می‌کنیم.

الف) در حالتی که آسانسور ساکن است می‌توانیم بنویسیم :

$$F_N - W = ma = 0 \Rightarrow F_N = W = mg$$

توجه داریم نیروسنج نیروی وارد بر خودش یعنی F'_N که واکنش F_N است را نشان می‌دهد. پس نیروسنج اندازهٔ F'_N را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.

$$F'_N = 588\text{N} \Rightarrow F_N = F'_N = 588\text{ N}, F_N = W = mg \Rightarrow 588\text{ N} = m\,(9/8\text{ N/kg}) \Rightarrow m = 60/0\text{kg}$$

ب)

$$F_N - W = ma \rightarrow F_N = mg + ma = (60/0\text{kg})(9/8\text{ N/kg}) + (60/0\text{kg})(2/00\text{ N/kg})$$

$$F_N = 708\text{N}$$

یعنی در این حالت، ترازو عددی بزرگ‌تر از اندازهٔ وزن را نشان می‌دهد.

۳۸

پاسخ پرسش ۲ــ۶ :

الف) $F_N - mg = ma,\ a > 0 \Rightarrow F_N = mg + ma \rightarrow F_N > mg$

ب) $F_N - mg = ma,\ a < 0 \Rightarrow F_N = mg + ma \Rightarrow F_N < mg$

پ) $F_N - mg = ma,\ a < 0 \Rightarrow F_N = mg + ma \Rightarrow F_N < mg$

ت) $F_N - mg = ma,\ a > 0 \Rightarrow F_N = mg + ma \Rightarrow F_N > mg$

می‌توان به پرسش ۲ــ۶ دو بند دیگر نیز اضافه کرد؛

ث) آسانسور با سرعت ثابت حرکت کند :

ج) آسانسور ساکن $F_N - mg = 0 \Rightarrow F_N = mg$

باشد : $F_N - mg = 0 \Rightarrow F_N = mg$

ب)

$$F_N - W = ma \Rightarrow F_N - mg - ma \Rightarrow F_N = mg + ma = m\,(g+a)$$

جهت شتاب رو به پایین است.

$$F_N = (60/0\text{kg})\left(9/8\frac{\text{N}}{\text{kg}} - 2/00\frac{\text{N}}{\text{kg}}\right) = 468\text{N}$$

یعنی در این حالت ترازو، عددی کوچک‌تر از اندازهٔ وزن را نشان می‌دهد.

ت) وقتی کابل آسانسور پاره شود، آسانسور سقوط آزاد می‌کند و شتاب آن برابر g و رو به پایین است.

$$F_N - W = ma \rightarrow F_N = mg + ma = m(g-g) = 0$$

یعنی در سقوط آزاد، نیروی عمودی سطح صفر است. به عبارت دیگر ترازو عدد صفر را نشان می‌دهد.

پرسش ۲ــ۶

در مثال ۲ــ۶، در هر یک از حالت‌های زیر، عددی را که ترازوی فنری نشان می‌دهد با وزن شخص مقایسه کنید.

الف) آسانسور به طرف بالا شروع به حرکت کند.

ب) آسانسور به طرف پایین شروع به حرکت کند.

پ) آسانسور در حالی که به طرف بالا حرکت می‌کند، متوقف شود.

ت) آسانسور در حالی که به طرف پایین حرکت می‌کند، متوقف شود.

نیروی اصطکاک : وقتی تلاش می‌کنیم جسمی را روی سطحی به حرکت درآوریم، چه جسم حرکت کند و چه ساکن بماند، با مقاومتی روبه‌رو می‌شویم که به آن نیروی اصطکاک گویند.

اگر یک خودروی ساکن بر سطح افقی خیابان را هُل دهید، و نتوانید آن را به حرکت درآورید، در این حالت نیروی در خلاف جهت هُل دادن شما بین لاستیک‌ها و سطح به وجود آمده است که با حرکت خودرو مخالفت می‌کند (شکل ۲ــ۹). این نیرو، نمونه‌ای از نیروی اصطکاک ایستایی است و آن را با f_s نشان می‌دهند. حال خودروی در حال حرکتی را در نظر بگیرید که راننده‌اش ترمز کرده و چرخ‌های خودرو قفل شده است. سرعت خودرو کاهش پیدا می‌کند و پس از طی مسافتی متوقف می‌شود. در این حالت نیز نیروی در خلاف جهت حرکت از طرف سطح بر خودرو وارد می‌شود. این نیرو، نمونه‌ای از نیروی اصطکاک جنبشی است و آن را با f_k نشان می‌دهند.

شکل ۲ــ۹ نیروی اصطکاک ایستایی در خلاف جهت هل دادن به‌وجود آمده است.

نیروی اصطکاک بین دو جسم به جنس سطح دو جسم، و زبری و نرمی آنها و . . . بستگی دارد؛ مثلاً اصطکاک بین کفش و سطح زمین به جنس زبرهٔ کفش و سطحی که روی آن حرکت می‌کنیم بستگی دارد. نیروی اصطکاک بین دو جسم به علت ناهمواری‌های محل تماس دو جسم ایجاد می‌شود (شکل ۲ــ۱۰). حتی سطوحی که بسیار هموار به‌نظر می‌آیند، ناهمواری‌های میکروسکوپی بسیاری دارند که سبب اصطکاک می‌شوند.

نقطه‌های تماس

شکل ۲ــ۱۰

نیروی اصطکاک عمدتاً به‌عنوان نیروی ناخواهی شناخته می‌شود، با وجود این در زندگی روزمره لازم است. نگه‌داشتن یک قلم در دست، نوشتن، راهن خودرو، قدم زدن و دویدن، ترمز کردن و . . . بدون اصطکاک ممکن نیست. بدون اصطکاک حتی ایستادن نامکن است، زیرا کمترین جابه‌جایی سبب لغزیدن و افتادن می‌شود.

۳۹

نیروی اصطکاک : بسیاری از دانش‌آموزان تصور می‌کنند وقتی جسمی ساکن روی یک سطح افقی قرار دارد (بدون آنکه هُل داده شود یا کشیده شود) بین جسم و سطح اصطکاک وجود دارد. با بحث و گفت‌وگو می‌توان این کج فهمی‌را اصلاح کرد؛ مثلاً یک میز را روی سطح افقی در نظر بگیرند و از دانش‌آموزان خواسته شود که بگویند بین میز و زمین اصطکاک وجود دارد یا نه؟ اگر وجود دارد جهت نیروی اصطکاک را مشخص کنند و براساس

قانون دوم شتاب میز را تعیین کنند. با این گونه سؤال‌ها مشخص می‌شود که نیروی اصطکاک فقط در حالت‌ها وجود دارد که جسمی‌روی جسم دیگر حرکت کند یا اینکه ساکن باشد امّا تحت کشش یا رانش باشد، و نیروی اصطکاک به دو دستهٔ نیروی اصطکاک ایستایی و جنبشی تقسیم‌بندی می‌شود (در این کتاب).

اندازهٔ نیروی اصطکاک ایستایی را می‌توان از شرایط متوازن بودن نیروها به دست آورد. برای نیروی اصطکاک ایستایی رابطهٔ مشخصی وجود ندارد امّا نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه از رابطهٔ ۲ــ۴ ($f_{s,\max} = \mu_s F_N$) به دست می‌آید و نیروی اصطکاک جنبشی از رابطهٔ ۲ــ۶ ($f_k = \mu_k F_N$) محاسبه می‌شود.

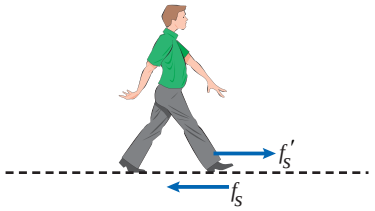
می‌توانیم از دانش‌آموزان بخواهیم، بگویند نیروی اصطکاک بین دو جسم به چه عواملی بستگی دارد؟ احتمالاً دانش‌آموزان به جنس دو جسم، زبری و نرمی‌آنها، رطوبت، دما و ... اشاره می‌کنند.

این بحث را می‌توان به آرامی به سمت بحث میکروسکوپی در مورد نیروی اصطکاک کشاند. اغلب دانش‌آموزان تصور نادرستی از مضر بودن نیروی اصطکاک دارند. پاراگراف آخر این صفحه به دانش‌آموزان کمک می‌کند تا به نقش مثبت نیروی اصطکاک در زندگی پی‌ببرند.

هدف از پرسش ۲ــ۷ درگیر کردن دانش‌آموزان به نقش مثبت اصطکاک در راه رفتن انسان، خودروها و ... است.

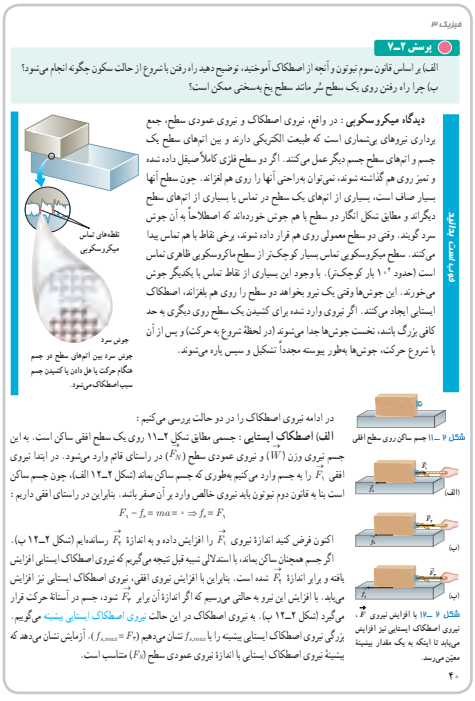
پاسخ پرسش ۲ــ۷

هنگام راه رفتن، پا زمین را به عقب هل می‌دهد این برهم کنش به علت اصطکاک بین پا و زمین اتفاق می‌افتد. طبق قانون سوم نیوتون زمین نیز پا را به طرف جلو هُل می‌دهد که سبب حرکت و راه رفتن می‌شود. اگر سطح زمین سُر و بدون اصطکاک باشد، نیروی اصطکاک که پا به زمین وارد می‌کند و نیروی اصطکاکی که زمین به پا وارد می‌کند بسیار ناچیز است و راه رفتن به سختی ممکن خواهد بود و حتی ممکن است نتوانیم راه برویم.



شکل ۲ــ۱۲ با افزایش نیروی $\vec{F}$، نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد تا اینکه به یک مقدار بیشینه معین می‌رسد.

خوب است بدانیم «دیدگاه میکروسکوپی» می‌تواند به درک بیشتر نیروی اصطکاک کمک کند. اشاره به طبیعت الکتریکی نیروی اصطکاک، اشاره به جوش سرد، سطح میکروسکوپی تماس و نسبت 10^{-4} بار کوچک‌تر بودن آن نسبت به سطح ظاهری تماس و اشاره به تشکیل و پاره شدن جوش‌ها در هنگام حرکت جسم، موارد مهمی‌هستند که می‌توان به آنها پرداخت.



فیزیک ۳

پرسش ۲ــ۷

الف) بر اساس قانون سوم نیوتون و آنچه از اصطکاک آموخته، توضیح دهید راه رفتن با شروع از حالت سکون چگونه انجام می‌شود؟
ب) چرا راه رفتن روی یک سطح سُر مانند سطح یخ به‌سختی ممکن است؟

دیدگاه میکروسکوپی: در واقع، نیروی اصطکاک و نیروی عمودی سطح، جمع برداری نیروهای بی‌شماری است که طبیعت الکتریکی دارند و بین اتم‌های سطح یک جسم و اتم‌های سطح جسم دیگر عمل می‌کنند. اگر دو سطح فلزی کاملاً صیقل داده شده و تمیز روی هم گذاشته شوند، نمی‌توان به‌راحتی آنها را روی هم لغزاند. چون سطح آنها بسیار صاف است، بسیاری از اتم‌های یک سطح در تماس با بسیاری از اتم‌های سطح دیگراند و مطابق شکل انگار دو سطح با هم جوش خورده‌اند که اصطلاحاً به آن جوش سرد گویند. وقتی دو سطح معمولی روی هم قرار داده شوند، برخی نقاط با هم تماس پیدا می‌کنند. سطح میکروسکوپی تماس بسیار کوچک‌تر از سطح ماکروسکوپی ظاهری تماس است (حدود 10^{-4} بار کوچک‌تر). با وجود این بسیاری از نقاط تماس با یکدیگر جوش می‌خورند. این جوش‌ها وقتی یک تیرو بخواهد دو سطح را روی هم بلغزاند، اصطکاک ایستایی ایجاد می‌کنند. اگر نیروی وارد شده برای کنیدن یک سطح روی دیگری به حد کافی بزرگ باشد، نخست جوش‌ها جدا می‌شوند (در لحظهٔ شروع به حرکت) و پس از آن با شروع حرکت، جوش‌ها به‌طور پیوسته مجدداً تشکیل و سپس پاره می‌شوند.

نقطه‌های تماس میکروسکوپی

چون سرد

چون سرد بین اتم‌های سطح در جسم هنگام حرکت یا هل دادن یا کشیدن جسم سبب اصطکاک می‌شود.

شکل ۲ــ۱۱ جسم ساکن روی سطح افقی

در ادامه نیروی اصطکاک را در دو حالت بررسی می‌کنیم:

الف) اصطکاک ایستایی: جسمی مطابق شکل ۲ــ۱۱ روی یک سطح افقی ساکن است. به این جسم نیروی وزن ($\vec{W}$) و نیروی عمودی سطح ($\vec{F}_N$) در راستای قائم وارد می‌شود. در ابتدا نیروی افقی $\vec{F}_1$ را به جسم وارد می‌کنیم به‌طوری که جسم ساکن بماند (شکل ۲ــ۱۲ الف)، چون جسم ساکن است بنا به قانون دوم نیوتون باید نیروی خالص وارد بر آن صفر باشد. بنابراین در راستای افقی داریم:

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

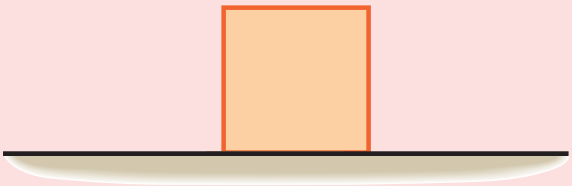
اکنون فرض کنید اندازهٔ نیروی $\vec{F}_1$ را افزایش داده و به اندازهٔ $\vec{F}_2$ رسانده‌ایم (شکل ۲ــ۱۲ ب). اگر جسم همچنان ساکن بماند، با استدلالی شبیه قبل نتیجه می‌گیریم که نیروی اصطکاک ایستایی افزایش یافته و برابر اندازهٔ $\vec{F}_2$ شده است. بنابراین با افزایش نیروی افقی، نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش این نیرو به حالتی می‌رسیم که اگر اندازهٔ آن برابر $\vec{F}_3$ شود، جسم در آستانهٔ حرکت قرار می‌گیرد (شکل ۲ــ۱۲ پ). به نیروی اصطکاک در این حالت نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه می‌گوییم. بزرگی نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه را با $f_{s,\max}$ نشان می‌دهیم ($f_{s,\max} = F_3$). آزمایش نشان می‌دهد که بیشینهٔ نیروی اصطکاک ایستایی با اندازهٔ نیروی عمودی سطح (F_N) متناسب است.

۴۰

پرداختن به نیروی اصطکاک ایستایی به کمک شکل‌های ۲ــ۱۱ و ۲ــ۱۲، کمک زیادی به فهم نیروی اصطکاک می‌کند. تمرکز ابتدایی آموزش روی شکل ۲ــ۱۱ است که جسم روی سطح افقی ساکن بوده و تحت تأثیر کشش یا هل دادن قرار ندارد. دانش‌آموز باید در این حالت بفهمد که بین جسم و سطح، نیروی اصطکاکی وجود ندارد. ادامهٔ مفهوم اصطکاک ایستایی را می‌توان با شکل‌های ۲ــ۱۲ توضیح داد. رسم همهٔ نیروهای وارد بر جسم در شکل‌های ۲ـ۱۱ و ۲ـ۱۲ می‌تواند به یادگیری این بحث کمک کند.

مثال پیشنهادی

قطعه‌ای روی یک سطح افقی هموار ساکن است. الف) بزرگی نیروی اصطکاک وارد از سطح بر قطعه چقدر است؟ ب) اکنون نیروی افقی ۶/۰N را به قطعه به موازات سطح وارد می‌کنیم ولی قطعه حرکت نمی‌کند. بزرگی نیروی اصطکاک وارد بر سطح چقدر است؟ پ) اگر نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه وارد بر قطعه ۱۲/۰N باشد، آیا قطعه در صورتی که نیروی افقی ۱۰/۰N بر ان وارد شود حرکت می‌کند؟ در این حالت نیروی اصطکاک چقدر است؟ ت) اگر نیروی ۱۵/۰N بر قطعه وارد شود، قطعه حرکت خواهد کرد؟



پاسخ : الف) $F_1-f_{s1}=ma=0, F_1=0 \rightarrow f_{s1}=0$

ب) $F_2-f_{s2}=ma=0 \rightarrow f_{s2}=F_2=6/0\,\mathrm{N}$

پ) خیر زیرا $F_2<f_{s,\max}$ است.

$F_3-f_{s3}=ma=0 \rightarrow f_{s3}=F_3=10/0\,\mathrm{N}$

ت) بله زیرا $F_4>f_{s,\max}$ است.

توجه

۱ رابطه‌های ۲ــ۴ ($f_{s,\max} = \mu_s F_N$) و ۲ــ۵ ($f_k = \mu_k F_N$) معادله‌های برداری نیستند. جهت‌های $\vec{f_s}$ و $\vec{f_k}$ موازی سطح و در خلاف جهت نیرویی است که جسم را می‌کشد یا هل می‌دهد و نیروی $\vec{F}_N$ عمود بر سطح است.

۲ ضرایب μ_S و μ_k بدون بُعد (یکا) هستند و باید به‌صورت آزمایشگاهی تعیین شوند. مقدار آنها به ویژگی‌های معینی از جسم و سطح بستگی دارد؛ مثلاً مقدار μ_S میان تخم‌مرغ و تفلون ۰/۰۴ است ولی مقدار آن میان کفش‌های صخره نورد و صخره ۱/۲ است.

۳ در این کتاب فرض می‌شود که مقدار μ_k به تندی‌ای که جسم روی سطح می‌لغزد بستگی ندارد.

۴ در معادلهٔ ۲ــ۵ ($f_s \leq \mu_s F_N$) علامت مساوی فقط وقتی به کار می‌رود که سطوح در آستانهٔ رها شدن و سُر خوردن هستند. در دام متداول استفاده از $f_s = \mu_s F_N$ در هر وضعیت ایستا قرار نگیریم.

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

(۲ــ۴) $f_{s,max} = \mu_s F_N$ (نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه)

در این رابطه μ_s ضریب اصطکاک ایستایی نام دارد. تجربه و آزمایش نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک ایستایی به عامل‌هایی مانند جنس سطح تماس دو جسم، میزان صافی و زبری آنها و ... بستگی دارد.

توجه کنید که رابطهٔ ۲ــ۴ اندازهٔ نیروی اصطکاک ایستایی را فقط در آستانهٔ حرکت می‌دهد. در حالت کلی نیروی اصطکاک ایستایی کوچک‌تر و یا مساوی $f_{s,max}$ است:

(۲ــ۵) $f_s \leq \mu_s F_N$

تمرین ۲ــ۴

اگر در شکل ۲ــ۱۲، جرم جسم ۴/۰kg و بزرگی نیروها F_1=۴/۰N ، F_2=۸/۰N و F_3=۱۶/۰N باشند،

الف) بزرگی نیروهای اصطکاک ایستایی در هر حالت چقدر است؟

ب) ضریب اصطکاک ایستایی را پیدا کنید.

آزمایش ۲ــ۱: اندازه‌گیری ضریب اصطکاک ایستایی بین دو جسم

وسایل لازم: نیروسنج، قطعهٔ چوبی به شکل مکعب مستطیل با وجوه یکنواخت، ترازو، خط‌کش

شرح آزمایش:

۱ــ مکعب چوبی را از طرف وجه بزرگ آن، روی سطح افقی میز قرار دهید.

۲ــ نیروسنج را مانند شکل به مکعب چوبی وصل کنید و سر دیگر نیروسنج را با دست بگیرید و به‌طور افقی بکشید.

۳ــ نیروی دستتان را به‌آرامی افزایش دهید تا جایی که مکعب چوبی در آستانهٔ لغزیدن قرار گیرد. در این حالت عددی را که نیروسنج نشان می‌دهد، در جدول یادداشت کنید (برای اینکه دقت شما افزایش یابد لازم است آزمایش را چند بار تکرار کنید).

۴ــ اکنون مکعب چوبی را از طرف وجه کوچک‌تر روی سطح قرار دهید و مراحل ۲ و ۳ را تکرار کنید.

۵ــ با اندازه‌گیری جرم مکعب چوبی و استفاده از رابطهٔ ۲ــ۴ مقدار μ_s را در هر آزمایش محاسبه و در جدول یادداشت کنید.

شمارهٔ آزمایش	مساحت سطح تماس قطعه با میز	وزن قطعه: عددی که نیروسنج نشان می‌دهد ($F_{s,max}$)	μ_s

همراه با اعضای گروه خود، نتیجه‌های به‌دست آمده را تفسیر کنید.

۴۱

پاسخ تمرین ۲ــ۴

الف)

$$F_1 - f_s = ma = 0 \rightarrow f_s = F_1 = 4/0\,\text{N}$$

$$F_2 - f_s = ma = 0 \rightarrow f_s = F_2 = 8/0\,\text{N}$$

ب)

$$F_3 - f_{s,\max} = ma = 0 \rightarrow f_{s,\max} = F_3 = 12\,\text{N}$$

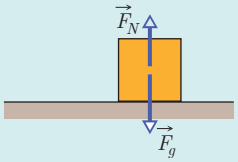
$$f_{s,\max} = \mu_s F_N \rightarrow \mu_s = \frac{f_{s,\max}}{F_N},\ F_N = mg = (4/0\,\text{N})(9/8\,\text{N}/kg) = 39/2\,\text{N} \rightarrow \mu_s = \frac{12/0\,N}{39/2\,N} = 0/30$$

در انجام این آزمایش (۲ــ۱) به یکنواخت بودن سطوح مکعب توجه شود. تکرار آزمایش و میانگین‌گیری توصیه می‌شود. در آزمون پایانی (نهایی) فیزیک۳، یکی از سؤالات به «طراحی آزمایش» اختصاص می‌یابد. بنابراین توصیه می‌شود روی کلیهٔ آزمایش‌ها و طراحی آزمایش‌ها کار شود.

دانستنی؛ نمودار نیروی اصطکاک بر حسب نیروی کشنده

شکل‌های زیر نشان می‌دهد وقتی بزرگی نیروی وارد شده به جسم را افزایش می‌دهیم بزرگی نیروی اصطکاک ایستایی افزایش می‌یابد و قطعه ساکن باقی می‌ماند. ولی وقتی نیروی وارد شده به بزرگی معینی می‌رسد، قطعه از قید تماس تنگاتنگ به سطح میز کنده می‌شود و به سمت چپ شتاب می‌گیرد. نیروی اصطکاکی که از آن پس با حرکت مخالفت می‌کند، نیروی اصطکاک جنبشی است.

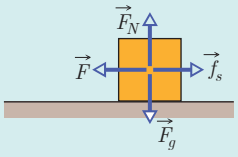
F = ۰ نیروی اصطکاک



(الف)

هیچ تلاشی برای لغزاندن نیست. بنابراین، نه اصطکاک و نه حرکت وجود ندارد.

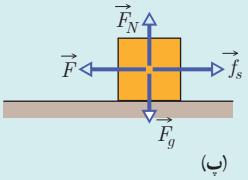
F = نیروی اصطکاک



(ب)

نیروی $\vec{F}$ سعی می‌کند قطعه را بلغزاند، ولی در تعادل با نیروی اصطکاک است. حرکتی نداریم.

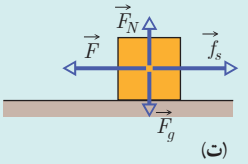
F = نیروی اصطکاک



(پ)

اکنون نیروی $\vec{F}$ قوی‌تر است، ولی همچنان در تعادل با نیروی اصطکاک است. حرکتی نداریم.

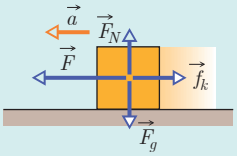
F = نیروی اصطکاک



(ت)

اکنون نیروی $\vec{F}$ بسیار قوی است، ولی همچنان در تعادل با نیروی اصطکاک است. حرکتی نداریم.

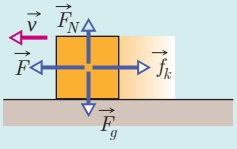
نیروی اصطکاک جنبشی ضعیف



(ث)

سرانجام نیروی وارد شده بر نیروی اصطکاک ایستایی غلبه می‌کند. قطعه می‌لغزد و شتاب می‌گیرد.

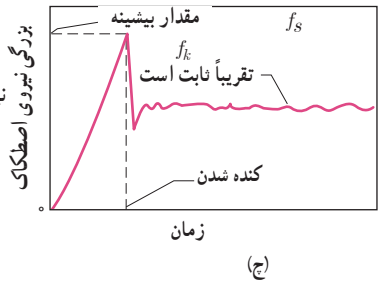
همان نیروی اصطکاک جنبشی ضعیف



(ج)

برای آنکه تندی ثابت بماند، نیروی ضعیف شدهٔ $\vec{F}$ باید برابر نیروی اصطکاک ضعیف باشد.

نیروی اصطکاک جنبشی فقط یک مقدار دارد (موازنه‌ای در کار نیست).

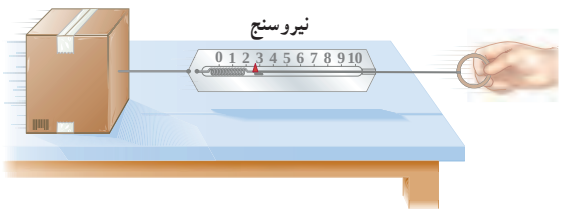


نیروی اصطکاک ایستایی فقط می‌تواند برابر نیروی رو به افزایش اعمالی باشد.

شکل (الف) نیروی وارد بر یک قطعهٔ ساکن. (ب تا ت) نیروی خارجی $\vec{F}$ که بر قطعه وارد شده است، با نیروی اصطکاک ایستایی $\vec{f}$ به توازن رسیده است. وقتی F افزایش می‌یابد، f_s نیز افزایش می‌یابد، تا اینکه f_s به یک مقدار بیشینهٔ معین برسد. (ث) قطعه سپس با شتاب ناگهانی در جهت $\vec{F}$، «تند می‌شود» (ج) اگر اکنون جعبه بخواهد با سرعت ثابت حرکت کند، F باید از مقدار بیشینه‌اش که درست پیش از کنده شدن داشت، کاهش پیدا کند. (چ) چند نتیجهٔ تجربی برای حالت‌های (الف) تا (ج).

پاسخ فعالیت ۲ــ۲

به کمک نیروسنج و چند مکعب می‌توانیم این آزمایش را انجام دهیم.



ابتدا یک مکعب که وزن آن را اندازه‌گیری کردیم را با نیروسنج آن‌قدر می‌کشیم تا جسم در آستانهٔ حرکت قرار گیرد (بهتر است این آزمایش را برای چند بار تکرار کنیم).

در این حالت :

$$F - f_{s,max} = ma = 0 \rightarrow F = f_{s,max}$$

یعنی با خواندن عدد نیروسنج مقدار $f_{s,max}$ را به‌دست می‌آوریم و در جدول صفحه بعد قرار می‌دهیم.

فیزیک ۳

فعالیت ۲ــ۳

آزمایشی طراحی کنید که نشان دهد $f_{s,max}$ متناسب با F_N است.

ب) **نیروی اصطکاک جنبشی** : وقتی جسمی روی سطحی می‌لغزد از طرف سطح بر جسم، نیروی اصطکاک جنبشی وارد می‌شود که موازی با سطح و در خلاف جهت لغزش جسم است. آزمایش نشان می‌دهد که اندازهٔ نیروی اصطکاک جنبشی متناسب با اندازهٔ نیروی عمودی سطح است.

$$f_k = \mu_k F_N \quad \text{(نیروی اصطکاک جنبشی)} \quad (۲ــ۶)$$

در این رابطه μ_k **ضریب اصطکاک جنبشی** نام دارد.

تجربه و آزمایش‌های گوناگون نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک جنبشی مانند ضریب اصطکاک ایستایی به عامل‌هایی مانند جنس سطح تماس دو جسم، میزان صافی و زبری آنها و ... بستگی دارد. معمولاً ضریب اصطکاک جنبشی میان دو سطح، کمتر از ضریب اصطکاک ایستایی میان آن دو سطح است؛ یعنی $\mu_k < \mu_s$. جدول ۲ــ۱ تعدادی ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی را نشان می‌دهد.

جدول ۲ــ۱

جنس دو سطح تماس	μ_k	μ_s
فولاد بر فولاد	۰/۵۷	۰/۷۴
فولاد بر آلومینیوم	۰/۴۷	۰/۶۱
فولاد بر مس	۰/۳۶	۰/۵۳
مس بر چدن	۰/۲۹	۱/۰۵
مس بر شیشه	۰/۵۳	۰/۶۸
شیشه بر شیشه	۰/۴۰	۰/۹۴
لاستیک بر بتون تر	۰/۲۵	۰/۳۰
لاستیک بر بتون خشک	۰/۸	۱/۰
تفلون بر تفلون	۰/۰۴	۰/۰۴

فعالیت ۲ــ۴

آزمایشی طراحی کنید که با آن بتوانید :

الف) نیروی اصطکاک جنبشی وارد بر جسمی مانند یک قطعه چوب در حال لغزش روی سطح را اندازه بگیرید و با استفاده از آن μ_k را به‌دست آورید.

ب) بستگی یا عدم بستگی نیروی اصطکاک جنبشی به مساحت سطح تماس دو جسم را تحقیق کنید.

مثال ۲ــ۷

شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که در حال کشیدن یک جعبهٔ ۷۵/۰ کیلوگرمی با نیروی ۳۰۹N روی سطح افقی است. نیرویی که شخص به جعبه وارد می‌کند افقی و جعبه در حال حرکت است. اگر ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جعبه ۰/۴۰۰ باشد،

الف) نیروی اصطکاک جنبشی وارد به جعبه چقدر است؟

ب) شتاب جعبه در این حالت چقدر است؟ $(g = 9/80\,\mathrm{N/kg})$

پاسخ : الف) نیروهای وارد بر جعبه را رسم می‌کنیم. چون جسم در امتداد قائم شتاب ندارد از قانون دوم نیوتون نتیجه می‌شود که برایند نیروهای وارد بر جسم در راستای قائم صفر است.

$$F_N - W = 0 \Rightarrow F_N = W = mg = (75/0\,\mathrm{kg})(9/80\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}}) = 735\,\mathrm{N}$$

۴۲

روی جسم (مکعب)، مکعب دیگری قرار می‌دهیم و آزمایش بالا را تکرار می‌کنیم. با انجام آزمایش برای مکعب‌های مختلف متوجه می‌شویم با افزایش F_N، $f_{s,max}$ نیز به همان نسبت افزایش پیدا می‌کند؛ یعنی $f_{s,max} \propto F_N$ است. روش‌های دیگری نیز برای انجام این آزمایش وجود دارد.

شمارهٔ آزمایش	وزن حجم (مکعب‌ها)	نیروی عمودی تکیه‌گاه	عددی که نیروسنج نشان می‌دهد ($f_{s,max}$)
۱			
۲			
۳			

توجه : به واژهٔ «معمولاً» در ابتدای سطر ۱۰ توجه کنیم. می‌توان در جدول‌های مختلفی که ضریب اصطکاک ایستایی یا ضریب اصطکاک جنبشی را ارائه می‌دهند، مواردی پیدا کرد که $\mu_k=\mu_s$ باشد، اما در اغلب حالت‌ها $\mu_s>\mu_k$ است.

فیزیک ۳

فعالیت ۲ــ۳

آزمایشی طراحی کنید که نشان دهد $f_{s,max}$ متناسب با F_N است.

ب) **نیروی اصطکاک جنبشی :** وقتی جسمی روی سطحی می‌لغزد از طرف سطح بر جسم، نیروی اصطکاک جنبشی وارد می‌شود که موازی با سطح و در خلاف جهت لغزش جسم است. آزمایش نشان می‌دهد که اندازهٔ نیروی اصطکاک جنبشی متناسب با اندازهٔ نیروی عمودی سطح است.

$$f_k = \mu_k F_N \quad \text{(نیروی اصطکاک جنبشی)} \quad (۲ــ۶)$$

در این رابطه μ_k ضریب اصطکاک جنبشی نام دارد.

تجربه و آزمایش‌های گوناگون نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک جنبشی مانند ضریب اصطکاک ایستایی به عامل‌هایی مانند جنس سطح تماس دو جسم، میزان صافی و زبری آنها و ... بستگی دارد. معمولاً ضریب اصطکاک جنبشی میان دو سطح، کمتر از ضریب اصطکاک ایستایی میان آن دو سطح است؛ یعنی $\mu_k < \mu_s$. جدول ۲ــ۱ تعدادی ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی را نشان می‌دهد.

شکل ۲ــ۱۳ برچسب اسکی نیروی اصطکاک جنبشی در خلاف جهت حرکت وارد می‌شود.

جدول ۲ــ۱

جنس دو سطح تماس	μ_k	μ_s
فولاد بر فولاد	۰/۵۷	۰/۷۴
فولاد بر آلومینیوم	۰/۴۷	۰/۶۱
فولاد بر مس	۰/۳۶	۰/۵۳
مس بر چدن	۰/۲۹	۱/۰۵
مس بر شیشه	۰/۵۳	۰/۶۸
شیشه بر شیشه	۰/۴۰	۰/۹۴
لاستیک بر بتون تر	۰/۲۵	۰/۳۰
لاستیک بر بتون خشک	۰/۸	۱/۰
تفلون بر تفلون	۰/۰۴	۰/۰۴

فعالیت ۲ــ۳

آزمایشی طراحی کنید که با آن بتوانید :

الف) نیروی اصطکاک جنبشی وارد بر جسمی مانند یک قطعه چوب در حال لغزش روی سطح را اندازه بگیرید و با استفاده از آن μ_k را بدست آورید.

ب) بستگی یا عدم بستگی نیروی اصطکاک جنبشی به مساحت سطح تماس دو جسم را تحقیق کنید.

مثال ۲ــ۷

شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که در حال کشیدن یک جعبهٔ ۷۵/۰ کیلوگرمی با نیروی ۳۰/۹N روی سطح افقی است. نیرویی که شخص به جعبه وارد می‌کند افقی و جعبه در حال حرکت است. اگر ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جعبه ۰/۴۰۰ باشد،

الف) نیروی اصطکاک جنبشی وارد به جعبه چقدر است؟

ب) شتاب جعبه در این حالت چقدر است؟ ($g = ۹/۸ \text{N/kg}$)

پاسخ : الف) نیروهای وارد بر جعبه را رسم می‌کنیم. چون جسم در امتداد قائم شتاب ندارد از قانون دوم نیوتون نتیجه می‌شود که برایند نیروهای وارد بر جسم در راستای قائم صفر است.

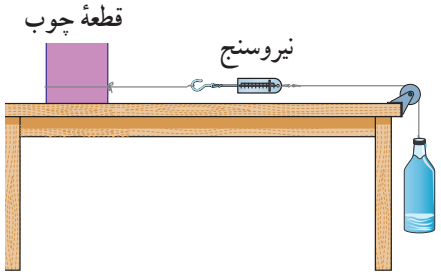
$$F_N - W = ۰ \Rightarrow F_N = W = mg = (۷۵/۰ \text{kg})(۹/۸ \frac{\text{N}}{\text{kg}}) = ۷۳۵\text{N}$$

۴۲

پاسخ فعالیت ۲ــ۳

(الف) با وسایل نشان داده شده در شکل می‌توانیم این آزمایش را انجام دهیم.

در بطری به آرامی آب می‌ریزیم و همزمان روی میز ضربه می‌زنیم. این عمل را آن‌قدر ادامه می‌دهیم تا اینکه وقتی جسم شروع به حرکت کرد به آرامی روی سطح حرکت کند و نیروسنج عدد ثابتی را نشان دهد (با تکرار آزمایش به شرایط مناسب انجام آزمایش می‌رسیم). در این حالت حرکت جسم با سرعت ثابت است و نیروی کشش نخ (عددی که نیروسنج نشان می‌دهد) و اصطکاک جنبشی حرکت هم‌اندازه هستند



و می‌توانیم بنویسیم :

عددی که نیروسنج نشان می‌دهد یا وزن بطری محتوی آب $T = f_k \rightarrow f_k = ma = 0 \quad T - f_k$

ب) جسم قسمت الف آزمایش را روی سطح‌های مختلف آن قرار داده و هربار عددی که نیروسنج نشان می‌دهد (یا وزن آب) را اندازه‌گیری می‌کنیم. اگر ویژگی‌های سطح‌های مختلف جسم با هم یکسان باشد، عددهایی که به‌دست می‌آوریم تقریباً یکسان خواهند بود که نشان‌دهندهٔ مستقل بودن این نیرو از مساحت سطح تماس دو جسم است.

مثال ۲ــ۷

فرصت مناسبی را ایجاد می‌کند تا دانش‌آموزان نیروهای وارد بر جسم متحرک را رسم کرده و نوع اصطکاک (جنبشی) را تشخیص دهند و خودشان مدل‌سازی لازم و نحوهٔ حل این نوع مسئله‌ها را تمرین کنند.

فیزیک ۳

فعالیت ۲ــ۲

آزمایشی طراحی کنید که نشان دهد $f_{s,max}$ متناسب با F_N است.

ب) نیروی اصطکاک جنبشی : وقتی جسمی روی سطحی می‌لغزد از طرف سطح بر جسم، نیروی اصطکاک جنبشی وارد می‌شود که موازی با سطح و در خلاف جهت لغزش جسم است. آزمایش نشان می‌دهد که اندازهٔ نیروی اصطکاک جنبشی متناسب با اندازهٔ نیروی عمودی سطح است.

$$f_k = \mu_k F_N \quad \text{(نیروی اصطکاک جنبشی)} \quad (۶ــ۲)$$

در این رابطه μ_k ضریب اصطکاک جنبشی نام دارد.

تجربه و آزمایش‌های گوناگون نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک جنبشی مانند ضریب اصطکاک ایستایی به عامل‌هایی مانند جنس سطح تماس دو جسم، میزان صافی و زبری آنها و ... بستگی دارد. معمولاً ضریب اصطکاک جنبشی میان دو سطح، کمتر از ضریب اصطکاک ایستایی میان آن دو سطح است؛ یعنی $\mu_k < \mu_s$. جدول ۲ــ۱ تعدادی ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی را نشان می‌دهد.

فعالیت ۲ــ۳

آزمایشی طراحی کنید که با آن بتوانید :

الف) نیروی اصطکاک جنبشی وارد بر جسمی مانند یک قطعه چوب در حال لغزش روی سطح را اندازه بگیرید و با استفاده از آن μ_k را به‌دست آورید.

ب) بستگی یا عدم بستگی نیروی اصطکاک جنبشی به مساحت سطح تماس دو جسم را تحقیق کنید.

شکل ۲ــ۱۳ در چوب‌های اسکی نیروی اصطکاک جنبشی در خلاف جهت حرکت وارد می‌شود.

جدول ۲ــ۱

جنس دو سطح تماس	μ_k	μ_s
فولاد بر فولاد	۰/۵۷	۰/۷۴
فولاد بر آلومینیوم	۰/۴۷	۰/۶۱
فولاد بر مس	۰/۳۶	۰/۵۳
مس بر چدن	۰/۲۹	۱/۰۵
مس بر شیشه	۰/۵۳	۰/۶۸
شیشه بر شیشه	۰/۴۰	۰/۹۴
لاستیک بر بتون تر	۰/۲۵	۰/۳۰
لاستیک بر بتون خشک	۰/۸	۱/۰
تفلون بر تفلون	۰/۰۴	۰/۰۴

مثال ۲ــ۷

شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که در حال کشیدن یک جعبهٔ ۷۵/۰ کیلوگرمی با نیروی ۳۰/۹N روی سطح افقی است. نیرویی که شخص به جعبه وارد می‌کند افقی و جعبه در حال حرکت است. اگر ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جعبه ۰/۴۰۰ باشد،

الف) نیروی اصطکاک جنبشی وارد به جعبه چقدر است؟

ب) شتاب جعبه در این حالت چقدر است؟ $(g = 9/8\,\text{N/kg})$

پاسخ : الف) نیروهای وارد بر جعبه را رسم می‌کنیم. چون جسم در امتداد قائم شتاب ندارد از قانون دوم نیوتون نتیجه می‌شود که برایند نیروهای وارد بر جسم در راستای قائم صفر است.

$$F_N - W = 0 \Rightarrow F_N = W = mg = (75/0\,\text{kg})(9/8\,\frac{\text{N}}{\text{kg}}) = 735\,\text{N}$$

۴۲

پاسخ تمرین ۲ــ۵

این تمرین کمک می‌کند تا مثال ۲ــ۷ به یک مثال جامع و کامل تبدیل شود. حتماً این فرصت در اختیار دانش‌آموزان قرار گیرد تا خودشان به پاسخ آن برسند. شرایط شروع به حرکت جعبهٔ ساکن روی سطح افقی این است که $F \geq f_{s,max}$ باشد. بنابراین می‌توانیم حداقل نیروی لازم را به‌دست آوریم :

$$F_{\text{حداقل}} = f_{s,max} = \mu_s F_N \ , \ F_N = mg = ۷۳۵\text{N}$$

$$F_{\text{حداقل}} = (۰/۶۰۰)\,(۷۳۵\text{N}) = ۴۴۱\text{N}$$

یعنی اگر به جسم که در ابتدا ساکن است نیرویی کمتر از ۴۴۱N وارد کنیم شروع به حرکت نمی‌کند. اما پس از حرکت نیروی اصطکاک جنبشی وارد بر آن ۲۹۴N می‌شود و اگر $F = ۲۹۴\text{N}$ باشد، حرکت آن با سرعت ثابت انجام می‌شود و اگر $F > ۲۹۴\text{N}$ باشد، حرکت آن تندشونده و اگر $F < ۲۹۴\text{N}$ باشد حرکت آن کند شونده خواهد بود.

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۶ داریم :

$f_k = \mu_k F_N \Rightarrow f_k = ۰/۴۰۰ \times ۷۳۵\text{N} \Rightarrow f_k = ۲۹۴\text{N}$

ب) برایند نیروهای افقی وارد بر جسم برابر با حاصل‌ضرب جرم در شتاب است.

$F - f_k = ma \Rightarrow a = \frac{F - f_k}{m} \Rightarrow a = \frac{۳۰۹\,\text{N} - ۲۹۴\,\text{N}}{۷۵/۰\,\text{kg}} = ۰/۲۰\,\text{m/s}^2$

تمرین ۲ــ۵

در مثال قبل اگر ضریب اصطکاک ایستایی بین جعبه و زمین ۰/۶۰۰ و جسم در ابتدا ساکن باشد، حداقل نیروی افقی لازم برای به‌حرکت درآوردن جعبه چقدر است؟

نیروی کشسانی فنر : همان‌طور که در فیزیک ۱ دیدیم فنرها اجزای مهمی در فناوری هستند و به شکل‌های مختلفی ساخته می‌شوند (شکل ۲ــ۱۴). همچنین با تأثیر نیرو بر یک فنر آشنا شدیم و می‌دانیم که اگر یک سر فنری را به نقطه‌ای محکم کنیم و سر دیگر آن را بکشیم، طول فنر افزایش می‌یابد. شکل ۲ــ۱۵ الف، فنری را با طول عادی نشان می‌دهد که در آن، فنر نه فشرده و نه کشیده نشده است. اگر فنر را به اندازهٔ x بکشیم یا فشرده کنیم (شکل ۲ــ۱۵ ب و پ)، فنر نیرویی به طرف نقطهٔ تعادل به جسم وارد می‌کند. تجربه نشان می‌دهد هر چه فنر را بیشتر بکشیم یا فشرده کنیم (در محدودهٔ معینی از تغییر طول فنر)، نیروی کشسانی فنر نیز بیشتر می‌شود.

برای بیشتر فنرها با تقریب قابل قبولی، نیروی کشسانی فنر با اندازهٔ تغییر طول آن (x) رابطهٔ مستقیم دارد :

$$F_x = kx \quad \text{(نیروی کشسانی فنر[۱])} \qquad (۲ــ۷)$$

ضریب k در رابطهٔ ۲ــ۷، ثابت فنر نام دارد. ثابت فنر از مشخصات فنر است و به اندازه، شکل و ساختار ماده‌ای که فنر از آن ساخته شده بستگی دارد. در رابطهٔ ۲ــ۷ نیرو بر حسب نیوتون (N)، x بر حسب متر (m) و k بر حسب نیوتون بر متر (N/m) است. معادلهٔ ۲ــ۷ را به افتخار رابرت هوک، دانشمند انگلیسی (۱۷۰۳ــ۱۶۳۵ م.)، که این رابطه را کشف کرد، قانون هوک می‌نامند. برای یک فنر آهنگ‌پذیر، k عددی کوچک (حدود ۱۰۰ N/m) و برای یک فنر سفت k عددی بزرگ (حدود ۱۰۰۰۰ N/m) است. نمودار نیروی کشسانی بر حسب تغییر طول برای سه فنر با kهای متفاوت در شکل ۲ــ۱۶ رسم شده است.

فعالیت ۲ــ۴

تعدادی فنر متفاوت تهیه کنید. الف) سختی آنها را مقایسه کنید. ب) با طراحی یک آزمایش، ثابت هر فنر را به‌دست آورید.

۱ــ زیرنویس ، در نماد نیروی کشسانی فنر (F_x) سرواژهٔ elastic به معنی کشسان است.

شکل ۲ــ۱۴ فنرهای به کار رفته در جرخ‌های خودرو

شکل ۲ــ۱۵ الف) فنر طول عادی دارد و جسم در نقطهٔ تعادل است. ب) فنر کشیده شده است و نیروی کشسانی رو به نقطهٔ تعادل به جسم وارد می‌کند. و ب) فنر فشرده شده است، و نیروی کشسانی رو به نقطهٔ تعادل به جسم وارد می‌کند.

شکل ۲ــ۱۶ هر چه ثابت فنر بیشتر باشد، شیب نمودار بیشتر و فنر سخت‌تر است.

۲۳

تمرین پیشنهادی

جسمی روی سطح افقی هموار قرار دارد. الف) بزرگی نیروی اصطکاک وارد از سطح بر جسم چقدر است؟ ب) اگر اکنون نیروی افقی ۶/۰ N به جسم وارد شود، ولی جسم حرکت نکند، بزرگی نیروی اصطکاک وارد بر قطعه چند نیوتون است؟ پ) اگر مقدار بیشینهٔ $f_{s,max}$ برابر ۱۲N باشد، آیا قطعه درصورتی‌که نیروی افقی وارد بر آن ۱۱N باشد، حرکت خواهد کرد؟ ت) اگر ۱۴N باشد چطور؟ ث) بزرگی نیروی اصطکاک قسمت پ چقدر است؟

پاسخ : الف) صفر ب) $f_s = ۶/۰\,\text{N}$ پ) خیر ت) حرکت می‌کند ث) $f_s = ۱۱\,\text{N}$

تمرین پیشنهادی

خودرویی با تندی ۱۰/۰m/s روی یک جادهٔ افقی در حرکت است و راننده ترمز کرده و چرخ‌هایش قفل می‌شود. در هریک از حالت‌های زیر مسافت طی شده تا توقف را در مرحلهٔ ترمز به‌دست آورید. از مقاومت هوا و اثرهای دیگر صرف‌نظر می‌شود. الف) جاده خشک بوده و ضریب اصطکاک جنبشی آن ۰/۶۰ است. ب) جاده یخ‌بندان بوده و ضریب اصطکاک جنبشی آن ۰/۱۰ است.

پاسخ : الف) $\Delta x \simeq ۸/۳\text{m}$ ب) $\Delta x \simeq ۵۰\text{m}$

در موضوع **نیروی کشسانی فنر** می‌توان به موارد زیر اشاره کرد :

ـ کاربرد گستردهٔ فنر در فناوری (ساعت، خودرو، ماشین‌های صنعتی و . . .)

ـ جهت نیروی کشسانی فنر در حالت کشیده یا فشرده

ـ در محدودهٔ خاصی از کشش فنر $F \propto x$ است.

ـ در رابطهٔ (۲ـ۷)، x اندازهٔ تغییر طول فنر ($x = |\Delta L|$) است و F_e نیز اندازهٔ نیروی کشسانی فنر است.

ـ اشاره به رابرت هوک

ـ مرتبهٔ مقدار ثابت فنر برای فنرهای بزرگ و کوچک

ـ نشان داده شود که شیب نمودار F_e برحسب x برابر k است ($\frac{F_e}{x} = k$)

پاسخ فعالیت ۲ـ۴

الف)می‌توانیم با فشردن یا کشیدن فنرها سختی فنرها را با هم مقایسه کنیم. البته روش دقیق‌تر آن است که فنرها را آویزان کرده و وزنهٔ یکسانی به انتهای آنها آویزان کنیم و تغییر طول فنرها را اندازه‌گیری نماییم. فنری که کمتر کشیده شده است، سختی‌اش بیشتر است. ب) وزنه‌ای را انتخاب کرده و جرم آن را تعیین می‌کنیم. فنر را آویزان کرده و به انتهای فنر وزنه را وصل می‌کنیم و به کمک خط‌کش طول فنر را قبل از اتصال و بعد از اتصال می‌خوانیم؛ در این صورت با رابطهٔ : $mg = kx \rightarrow k = \frac{mg}{x}$

k را تعیین می‌کنیم.

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

با استفاده از رابطهٔ ۲ـ۶ داریم :

$f_k = \mu_k F_N \Rightarrow f_k = ۰/۴۰۰ \times ۷۳۵\text{N} \Rightarrow f_k = ۲۹۴\text{N}$

ب) برایند نیروهای افقی وارد بر جسم برابر با حاصل‌ضرب جرم در شتاب است.

$F - f_k = ma \Rightarrow a = \frac{F - f_k}{m} \Rightarrow a = \frac{۳۰۹\text{ N} - ۲۹۴\text{ N}}{۷۵/۰\text{kg}} = ۰/۲۰\text{m/s}^2$

تمرین ۲ـ۵

در مثال قبل اگر ضریب اصطکاک ایستایی بین جعبه و زمین ۰/۶۰۰ و جسم در ابتدا ساکن باشد، حداقل نیروی افقی لازم برای به‌حرکت درآوردن جعبه چقدر است؟

نیروی کشسانی فنر : همان‌طور که در فیزیک ۱ دیدیم فنرها اجزای مهمی در فناوری هستند و به شکل‌های مختلفی ساخته می‌شوند (شکل ۲ـ۱۴). همچنین با تأثیر نیرو بر یک فنر آشنا شدیم و می‌دانیم که اگر یک سر فنری را به نقطه‌ای محکم کنیم و سر دیگر آن را بکشیم، طول فنر افزایش می‌یابد. شکل ۲ـ۱۵ الف، فنری را با طول عادی نشان می‌دهد که در آن، فنر نه فشرده و نه کشیده نشده است. اگر فنر را به اندازهٔ x بکشیم یا فشرده کنیم (شکل ۲ـ۱۵ ب و پ)، فنر نیرویی به طرف نقطهٔ تعادل به جسم وارد می‌کند. تجربه نشان می‌دهد هر چه فنر را بیشتر بکشیم یا فشرده کنیم (در محدودهٔ معینی از تغییر طول فنر)، نیروی کشسانی فنر نیز بیشتر می‌شود.

شکل ۲ ـ ۱۴ فنرهای به کار رفته در چرخ‌های خودرو

برای بیشتر فنرها با تقریب قابل قبولی، نیروی کشسانی فنر با اندازهٔ تغییر طول آن (x) رابطهٔ مستقیم دارد :

$F_e = kx$ (نیروی کشسانی فنر) (۲ـ۷)

ضریب k در رابطهٔ ۲ـ۷، ثابت فنر نام دارد. ثابت فنر از مشخصات فنر است و به اندازه، شکل و ساختار ماده‌ای که فنر از آن ساخته شده بستگی دارد. در رابطهٔ ۲ـ۷ نیرو بر حسب نیوتون (N)، x بر حسب متر (m) و k بر حسب نیوتون بر متر (N/m) است. معادلهٔ ۲ـ۷ را به افتخار رابرت هوک، دانشمند انگلیسی (۱۷۰۳ـ۱۶۳۵م.)، که این رابطه را کشف کرد، قانون هوک می‌نامند. برای یک فنر انعطاف‌پذیر، k عددی کوچک (حدود ۱۰۰ N/m) و برای یک فنر سفت k عددی بزرگ (حدود ۱۰۰۰۰ N/m) است. نمودار نیروی کشسانی بر حسب تغییر طول برای سه فنر با kهای متفاوت در شکل ۲ـ۱۶ رسم شده است.

شکل ۲ ـ ۱۵ الف) فنر طول عادی دارد و جسم در نقطهٔ تعادل است. ب) فنر کشیده شده است و نیروی کشسانی رو به نقطهٔ تعادل به جسم وارد می‌کند. پ) فنر فشرده شده است و نیروی کشسانی رو به نقطهٔ تعادل به جسم وارد می‌کند.

فعالیت ۲ـ۴

تعدادی فنر متفاوت تهیه کنید. الف) سختی آنها را مقایسه کنید. ب) با طراحی یک آزمایش، ثابت هر فنر را به‌دست آورید.

شکل ۲ ـ ۱۶ هرچه ثابت فنر بیشتر باشد، شیب نمودار بیشتر و فنر سخت‌تر است.

۱ـ زیرنویس ۰ در نماد نیروی کشسانی فنر (F_e) سرواژهٔ elastic به معنی کشسان است.

مثال ۲ــ۸

می‌تواند تمرین مناسبی برای نیروی کشسانی باشد حتی این مثال به دانش‌آموزان کمک می‌کند تا بتوانند قسمت ب فعالیت ۲ــ۴ صفحهٔ قبل را پاسخ دهند. معمولاً وقتی فنر را از سقف آسانسور آویزان می‌کنیم، می‌توان تغییر طول فنر را در حالت‌های مختلف حرکت آسانسور خواست. این مسئله را می‌توان در تمرین ۱۲ پایان فصل مشاهده کرد.

توجه آورده شده در حاشیهٔ این صفحه بسیار مهم است، زیرا اولاً مراحلی را که دانش‌آموز در حل مسئله‌های دینامیک باید طی کند تا آن مسئله را حل کند آورده شده است. ثانیاً محدودهٔ بحث و محاسبات برداری را تعیین می‌کند. تأکیدات اصلی عبارت‌اند از : ۱ــ نیروها فقط در راستای افقی و قائم هستند و نیازی به تجزیهٔ نیروها نیست. ۲ــ فقط به بررسی مسئله‌های تک جسمی می‌پردازیم.

در موضوع نیروی کشش طناب (کابل، ریسمان و . . .) می‌توان به موارد زیر اشاره کرد :

ــ نیروی کشش طناب در راستای طناب و از جسم به طرف بیرون است.

ــ از جرم طناب صرف‌نظر می‌شود.

ــ از کش آمدن آن صرف‌نظر می‌شود.

ــ در شکل ۲ــ۷ طناب جسم و دست را با نیروی کشش T می‌کشد، حتی اگر جسم و طناب و دست دارای حرکت شتاب‌دار باشند.

مثال ۲ــ۹

مثالی جامع بوده و به نوعی مثال مربوط به اصطکاک است که فقط در اینجا شخص با طناب جسم را می‌کشد. دادن فرصت به دانش‌آموزان برای حل کردن این مثال، احتمالاً کج‌فهمی‌های مربوط به درس نیروی اصطکاک و کشش طناب را مشخص می‌کند.

در بند پ ارتباط بین دینامیک و حرکت‌شناسی به‌وضوح دیده می‌شود.

فیزیک ۳

مثال ۲ــ۸

فنری به طول $L_0=10/0\,cm$ را از یک نقطه آویزان می‌کنیم و به سر دیگر آن وزنهٔ ۲۰۰ گرمی وصل می‌کنیم. پس از رسیدن به تعادل، طول فنر به $L=12/0\,cm$ می‌رسد.

الف) ثابت فنر چند نیوتون بر متر است؟

ب) اگر وزنه‌ای ۳۰۰ گرمی را به فنر وصل کنیم، پس از رسیدن به تعادل طول فنر چند سانتی‌متر می‌شود؟

پاسخ : الف) محور مختصات را همانند شکل انتخاب می‌کنیم و نیروهای وارد بر جسم را رسم و با استفاده از قانون دوم نیوتون مسئله را حل می‌کنیم.

$F_c - W = ma \Rightarrow F_c - W = 0$ و $F_c = kx \Rightarrow kx = mg$

$k(12/0\times10^{-2}\,m - 10/0\times10^{-2}\,m) = (200\times10^{-3}\,kg)(9/8\,N/kg)$

$k = 9/8\,N/m$ (ب)

$kx = mg \Rightarrow (9/8\,N/m)x = (300\times10^{-3}\,kg)(9/8\,N/kg) \Rightarrow$

$x = 0/30\,m = 3/0\,cm$

$x = L - L_0 \Rightarrow 3/0\,cm = L - 10/0\,cm \Rightarrow L = 13/0\,cm$

نیروی کشش طناب : وقتی طناب (کابل، ریسمان و . . .) متصل به جسمی را مانند شکل ۲ــ۱۷ می‌کشیم، طناب جسم را با نیرویی می‌کشد که جهت آن از جسم به سمت بیرون و در راستای طناب است. چون در این حالت طناب تحت کشش قرار دارد، به این نیرو، نیروی کشش طناب گفته می‌شود و آن را با $\vec{T}$ نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل می‌بینید طناب دست را نیز با نیروی $\vec{T}'$ می‌کشد. بزرگی نیروی کشش طناب برابر با بزرگی نیروی $\vec{T}$ وارد بر جسم است. مثلاً اگر بزرگی نیروی وارد بر جسم از طرف طناب ۶۰N باشد، کشش طناب نیز ۶۰N است ($T=60\,N$). در این کتاب از جرم طناب و همچنین از کش آمدن آن صرف نظر می‌شود. بنابراین طناب فقط به‌عنوان رابط بین دو جسم عمل می‌کند و هر دو جسم (دست و جعبه) را با بزرگی نیروی یکسان T می‌کشد، حتی اگر این دو جسم و طناب شتاب‌دار باشند.

شکل ۲ــ۱۷ طناب جسم را با نیروی کشش $\vec{T}$ می‌کشد.

مثال ۲ــ۹

در شکل روبه‌رو، کارگری جعبهٔ ساکنی را با طنابی افقی با نیروی ثابت افقی ۳۱۰N می‌کشد. اگر جرم جعبه ۱۰۰kg و ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی بین جعبه و سطح به‌ترتیب ۰/۳۰۰ و ۰/۲۵۰ باشند،

الف) آیا جعبه شروع به حرکت می‌کند؟

۴۴

فیزیک ۳

مثال ۲ــ۸

فنری به طول $L_0=10/0\,cm$ را از یک نقطه آویزان می‌کنیم و به سر دیگر آن وزنهٔ ۲۰۰ گرمی وصل می‌کنیم. پس از رسیدن به تعادل، طول فنر به $L=12/0\,cm$ می‌رسد.

الف) ثابت فنر چند نیوتون بر متر است؟

ب) اگر وزنه‌ای ۳۰۰ گرمی را به فنر وصل کنیم، پس از رسیدن به تعادل طول فنر چند سانتی‌متر می‌شود؟

پاسخ : الف) محور مختصات را همانند شکل انتخاب می‌کنیم و نیروهای وارد بر جسم را رسم و با استفاده از قانون دوم نیوتون مسئله را حل می‌کنیم.

$F_c - W = ma \Rightarrow F_c - W = 0$ و $F_c = kx \Rightarrow kx = mg$

$k(12/0\times10^{-2}\,m - 10/0\times10^{-2}\,m) = (200\times10^{-3}\,kg)(9/8\,N/kg)$

$k = 9/8\,N/m$ (ب)

$kx = mg \Rightarrow (9/8\,N/m)x = (300\times10^{-3}\,kg)(9/8\,N/kg) \Rightarrow$

$x = 0/30\,m = 3/0\,cm$

$x = L - L_0 \Rightarrow 3/0\,cm = L - 10/0\,cm \Rightarrow L = 13/0\,cm$

نیروی کشش طناب : وقتی طناب (کابل، ریسمان و . . .) متصل به جسمی را مانند شکل ۲ــ۱۷ می‌کشیم، طناب جسم را با نیرویی می‌کشد که جهت آن از جسم به سمت بیرون و در راستای طناب است. چون در این حالت طناب تحت کشش قرار دارد، به این نیرو، نیروی کشش طناب گفته می‌شود و آن را با $\vec{T}$ نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل می‌بینید طناب دست را نیز با نیروی $\vec{T}'$ می‌کشد. بزرگی نیروی کشش طناب برابر با بزرگی نیروی $\vec{T}$ وارد بر جسم است. مثلاً اگر بزرگی نیروی وارد بر جسم از طرف طناب ۶۰N باشد، کشش طناب نیز ۶۰N است ($T=60\,N$). در این کتاب از جرم طناب و همچنین از کش آمدن آن صرف نظر می‌شود. بنابراین طناب فقط به‌عنوان رابط بین دو جسم عمل می‌کند و هر دو جسم (دست و جعبه) را با بزرگی نیروی یکسان T می‌کشد، حتی اگر این دو جسم و طناب شتاب‌دار باشند.

شکل ۲ــ۱۷ طناب جسم را با نیروی کشش $\vec{T}$ می‌کشد.

مثال ۲ــ۹

در شکل روبه‌رو، کارگری جعبهٔ ساکنی را با طنابی افقی با نیروی ثابت افقی ۳۱۰N می‌کشد. اگر جرم جعبه ۱۰۰kg و ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی بین جعبه و سطح به‌ترتیب ۰/۳۰۰ و ۰/۲۵۰ باشند،

الف) آیا جعبه شروع به حرکت می‌کند؟

۴۴

پاسخ تمرین ۲ــ۶

بر سطل دو نیروی کشش طناب (روبه‌بالا) و وزن (روبه‌پایین وارد می‌شود). اگر محور مختصات را روبه‌بالا انتخاب کنیم، می‌توانیم بنویسیم :

$$T - mg = ma \rightarrow T = mg + ma = m(g + a) = ۱۶/۰\,\text{kg}$$
$$(۹/۸\text{m/s}^۲ + ۱/۲\text{m/s}^۲) = ۱۷۶\text{N} \simeq ۱/۸ \times ۱۰^۲\text{N}$$

مثال ۲ــ۱۰ : فرصت مناسبی است تا دانش‌آموزان بتوانند خودشان نیروهای وارد بر نردبان را رسم کنند که مهم‌ترین مرحله حل مسئله‌های دینامیک است. بهتر است شرایط ارائه مثال به‌گونه‌ای باشد که دانش‌آموزان به پاسخ دسترسی نداشته باشند و خودشان مسئله را حل کنند.

در این مثال دانش‌آموزان با نیرویی که از سطح بر جسم وارد می‌شود یعنی $\vec{R} = \vec{f}_f + \vec{F}_N$ نیز آشنا می‌شوند. پس از حل مسئله توسط دانش‌آموزان می‌توانیم نظر آنها را با رسم؛ با مقیاس نیروهای وارد بر جسم جلب کنیم و از آنها بخواهیم در حل مسائل تا آنجا که ممکن است نیروها را با مقیاس درست رسم کنند. می‌توانیم سؤالات مرتبط با این مثال را نیز مطرح کنیم؛ مثلاً اگر سطح افقی اصطکاک نداشته باشد و بین دیوار و نردبان اصطکاک وجود داشته باشد، آیا نردبان می‌تواند در شرایط ساکن باقی بماند؟ یا نیروی سطح دیوار بر نردبان چقدر است؟

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

ب) اگر جعبه حرکت کند، شتاب حرکت آن را حساب کنید.

پ) سرعت جعبه را ۶/۰s پس از حرکت به‌دست آورید. ($g = ۹/۸۰\,\text{m/s}^۲$)

پاسخ : الف) شکل ساده‌ای از جسم مورد نظر (جعبه) رسم و نیروهای وارد بر آن را مشخص می‌کنیم. چون جعبه در راستای قائم حرکت ندارد، می‌توانیم بنویسیم :

$$F_N - W = ۰ \Rightarrow F_N = W \Rightarrow F_N = mg = (۱۰۰\,\text{kg})(۹/۸۰\,\text{N/kg}) = ۹۸۰\,\text{N}$$

برای اینکه جسم شروع به حرکت کند، باید $T > f_{s,\max}$ باشد. پس ابتدا $f_{s,\max}$ را از معادلهٔ ۲ــ۴ به‌دست می‌آوریم :

$$f_{s,\max} = \mu_s F_N = (۰/۳۰۰)(۹۸۰\,\text{N}) = ۲۹۴\,\text{N}$$

با توجه به اینکه $T = ۳۱۰\,\text{N} > ۲۹۴\,\text{N}$ است، جعبه شروع به حرکت می‌کند.

ب) نیروی اصطکاک جنبشی در خلاف جهت حرکت بر جعبه اثر می‌کند و برابر است با :

$$f_k = \mu_k F_N = (۰/۲۵۰)(۹۸۰\,\text{N}) = ۲۴۵\,\text{N}$$
$$T - f_k = ma \Rightarrow ۳۱۰\,\text{N} - ۲۴۵\,\text{N} = (۱۰۰\,\text{kg})a \Rightarrow a = ۰/۶۵\,\text{m/s}^۲$$

پ) چون شتاب جعبه ثابت است، از رابطهٔ سرعت ــ زمان در حرکت با شتاب ثابت روی مسیر مستقیم استفاده می‌کنیم :

$$v = at + v_۰ \Rightarrow v = (۰/۶۵\,\text{m/s}^۲)(۶/۰\,\text{s}) + (۰/۰\,\text{m/s}) \Rightarrow v = ۳/۹\,\text{m/s}$$

سرعت نیز در جهت محور x است.

تمرین ۲ــ۶

کارگری یک سطل محتوی مصالح به جرم ۱۶/۰kg را با طناب سبکی به طرف بالا می‌کشد. اگر شتاب رو به بالای سطل ۱/۲m/s^۲ باشد، نیروی کشش طناب چقدر است؟

مثال ۲ــ۱۰

در شکل روبه‌رو نردبانی به جرم ۲۰/۰kg به دیوار قائم بدون اصطکاکی تکیه داده شده است. ضریب اصطکاک ایستایی بین زمین و پای نردبان ۰/۴۶۰ است. در آستانهٔ سُرخوردن نردبان،

الف) زمین به نردبان چه نیروی وارد می‌کند؟

ب) چه نیرویی از دیوار به نردبان وارد می‌شود؟

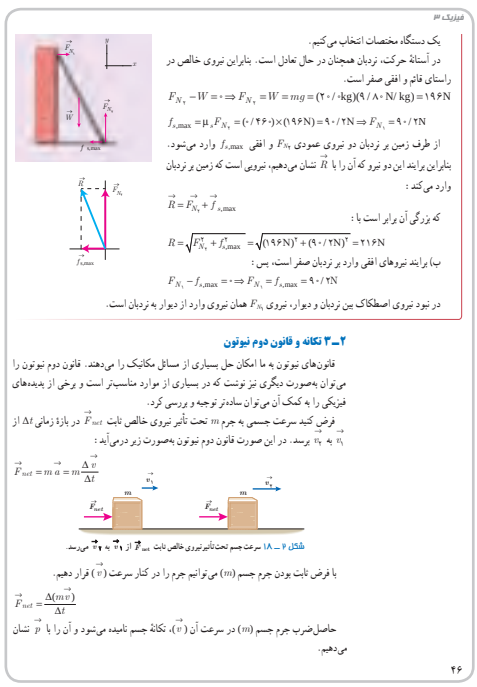
پاسخ : الف) نخست نیروهای وارد بر نردبان را رسم می‌کنیم که عبارت‌اند از : نیروی عمودی سطح دیوار ($\vec{F}_{N_۱}$)، نیروی وزن ($\vec{W}$)، نیروی عمودی سطح زمین ($\vec{F}_{N_۲}$) و نیروی اصطکاک ایستایی بین زمین و نردبان ($f_{s,\max}$).

۴۵

۲ــ۳ تکانه و قانون دوم نیوتون

شاید مقدمهٔ زیر کمک کند تا دانش‌آموزان بیشتر ترغیب شوند به بحث تکانه توجه کنند. تجربه نشان می‌دهد که متوقف کردن هر چیزی که تکانهٔ زیادی داشته باشد، دشوار است. به لحاظ فیزیکی هرچه تکانهٔ جسم بیشتر باشد، برای متوقف کردن آن در زمان معین باید نیروی بیشتری به آن وارد کرد. یک نهنگ که به آرامی حرکت می‌کند، تکانهٔ زیادی دارد و همچنین گلولهٔ کوچکی که از دهانهٔ تفنگ شلیک می‌شود، تکانه‌اش زیاد است. بنابراین انتظار داریم تکانه تابع جرم و سرعت باشد.

طرح درس تکانه در کتاب درسی، با اعمال یک نیروی خالص ثابت به جسمی به جرم m که با سرعت $\vec{v}_۱$ حرکت می‌کند آغاز می‌شود و قانون دوم را برای این جسم می‌نویسد و از دل رابطه قانون دوم تکانه را تعریف می‌کند.


فیزیک ۳

یک دستگاه مختصات انتخاب می‌کنیم.

در آستانهٔ حرکت، نردبان همچنان در حال تعادل است. بنابراین نیروی خالص در راستای قائم و افقی صفر است.

$$F_{N_۲} - W = ۰ \Rightarrow F_{N_۲} = W = mg = (۲۰/۰\,\text{kg})(۹/۸۰\,\text{N/kg}) = ۱۹۶\,\text{N}$$
$$f_{s,\max} = \mu_s F_{N_۲} = (۰/۴۶۰) \times (۱۹۶\,\text{N}) = ۹۰/۲\,\text{N} \Rightarrow F_{N_۱} = ۹۰/۲\,\text{N}$$

از طرف زمین بر نردبان دو نیروی عمودی $F_{N_۲}$ و افقی $f_{s,\max}$ وارد می‌شود. بنابراین برایند این دو نیرو که آن را با $\vec{R}$ نشان می‌دهیم، نیرویی است که زمین بر نردبان وارد می‌کند :

$$\vec{R} = \vec{F}_{N_۲} + \vec{f}_{s,\max}$$

که بزرگی آن برابر است با :

$$R = \sqrt{F_{N_۲}^۲ + f_{s,\max}^۲} = \sqrt{(۱۹۶\,\text{N})^۲ + (۹۰/۲\,\text{N})^۲} = ۲۱۶\,\text{N}$$

ب) برایند نیروهای افقی وارد بر نردبان صفر است، پس :

$$F_{N_۱} - f_{s,\max} = ۰ \Rightarrow F_{N_۱} = f_{s,\max} = ۹۰/۲\,\text{N}$$

در نبود نیروی اصطکاک بین نردبان و دیوار، نیروی $F_{N_۱}$ همان نیروی وارد از دیوار به نردبان است.

۲ــ۳ تکانه و قانون دوم نیوتون

قانون‌های نیوتون به ما امکان حل بسیاری از مسائل مکانیک را می‌دهند. قانون دوم نیوتون را می‌توان به‌صورت دیگری نیز نوشت که در بسیاری از موارد مناسب‌تر است و برخی از پدیده‌های فیزیکی را به کمک آن می‌توان ساده‌تر توجیه و بررسی کرد.

فرض کنید سرعت جسمی به جرم m تحت تأثیر نیروی خالص ثابت $\vec{F}_{net}$ در بازهٔ زمانی Δt از $\vec{v}_۱$ به $\vec{v}_۲$ برسد. در این صورت قانون دوم نیوتون به‌صورت زیر درمی‌آید :

$$\vec{F}_{net} = m\vec{a} = m\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

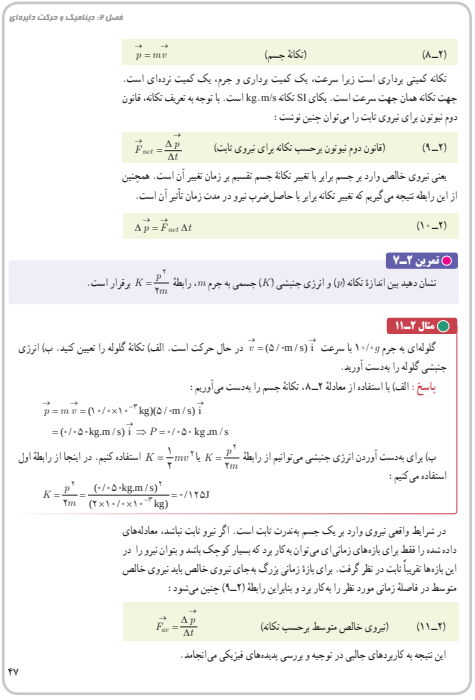
شکل ۲ ــ ۱۸ سرعت جسم تحت تأثیر نیروی خالص ثابت $\vec{F}_{net}$ از $\vec{v}_۱$ به $\vec{v}_۲$ می‌رسد.

با فرض ثابت بودن جرم جسم (m) می‌توانیم جرم را در کنار سرعت ($\vec{v}$) قرار دهیم.

$$\vec{F}_{net} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t}$$

حاصل‌ضرب جرم جسم (m) در سرعت آن ($\vec{v}$)، تکانهٔ جسم نامیده می‌شود و آن را با $\vec{p}$ نشان می‌دهیم.

۴۶


فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

$$\vec{p} = m\vec{v}$$ (تکانهٔ جسم) (۸ـ۲)

تکانه کمیتی برداری است زیرا سرعت، یک کمیت برداری و جرم، یک کمیت نرده‌ای است. جهت تکانه همان جهت سرعت است. یکای SI تکانه kg.m/s است. با توجه به تعریف تکانه، قانون دوم نیوتون برای نیروی ثابت را می‌توان چنین نوشت :

$$\vec{F}_{net} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$$ (قانون دوم نیوتون برحسب تکانه برای نیروی ثابت) (۹ـ۲)

یعنی نیروی خالص وارد بر جسم برابر با تغییر تکانهٔ جسم تقسیم بر زمان تغییر آن است. همچنین از این رابطه نتیجه می‌گیریم که تغییر تکانه برابر با حاصل‌ضرب نیرو در مدت زمان تأثیر آن است.

$$\Delta\vec{p} = \vec{F}_{net}\Delta t$$ (۱۰ـ۲)

تمرین ۲ـ۷

نشان دهید بین اندازهٔ تکانه (p) و انرژی جنبشی (K) جسمی به جرم m، رابطهٔ $K = \frac{p^2}{2m}$ برقرار است.

مثال ۲ـ۱۱

گلوله‌ای به جرم $10/0\,g$ با سرعت $\vec{v} = (5/0\,m/s)\,\vec{i}$ در حال حرکت است. الف) تکانهٔ گلوله را تعیین کنید. ب) انرژی جنبشی گلوله را به‌دست آورید.

پاسخ : الف) با استفاده از معادلهٔ ۸ـ۲، تکانهٔ جسم را به‌دست می‌آوریم :

$$\vec{p} = m\vec{v} = (10/0\times10^{-3}\,kg)(5/0\,m/s)\,\vec{i}$$
$$= (0/050\,kg.m/s)\,\vec{i} \Rightarrow P = 0/050\,kg.m/s$$

ب) برای به‌دست آوردن انرژی جنبشی می‌توانیم از رابطهٔ $K = \frac{p^2}{2m}$ یا $K = \frac{1}{2}mv^2$ استفاده کنیم. در اینجا از رابطهٔ اول استفاده می‌کنیم :

$$K = \frac{p^2}{2m} = \frac{(0/050\,kg.m/s)^2}{(2\times10/0\times10^{-3}\,kg)} = 0/125\,J$$

در شرایط واقعی نیروی وارد بر یک جسم به‌ندرت ثابت است. اگر نیرو ثابت نباشد، معادله‌های داده شده را فقط برای بازه‌های زمانی‌ای می‌توان به‌کار برد که بسیار کوچک باشند و بتوان نیرو را در این بازه‌ها تقریباً ثابت در نظر گرفت. برای بازهٔ زمانی بزرگ به‌جای نیروی خالص باید نیروی خالص متوسط در فاصلهٔ زمانی مورد نظر را به‌کار برد و بنابراین رابطهٔ (۹ـ۲) چنین می‌شود :

$$\vec{F}_{av} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$$ (نیروی خالص متوسط برحسب تکانه) (۱۱ـ۲)

این نتیجه به کاربردهای جالبی در توجه و بررسی پدیده‌های فیزیکی می‌انجامد.

۴۷

پاسخ تمرین ۲ـ۷

هدف از این تمرین پیدا کردن رابطه بین انرژی جنبشی و اندازهٔ تکانه است.

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2m}(m^2v^2) = \frac{1}{2m}(mv)^2 = \frac{P^2}{2m}$$

می‌توانیم از دانش‌آموزان بخواهیم با توجه به تعریف تکانه، تکانهٔ جسم را در دو لحظهٔ نشان داده در شکل ۲ـ۱۸ رسم کنند. در رسم تکانه‌ها به جهت و اندازهٔ بردار تکانه توجه کنند.

پرسش‌های پیشنهادی

دو جسم به جرم‌های m_1 و m_2 ($m_1 < m_2$) دارای انرژی جنبشی برابر هستند. اندازهٔ تکانه‌های آنها در مقایسه با هم چگونه است؟

$$K_1 = K_2 \rightarrow \frac{p_1^2}{2m_1} = \frac{p_2^2}{2m_2} \rightarrow \frac{p_1^2}{m_1} = \frac{p_2^2}{m_2} \rightarrow \frac{p_2^2}{p_1^2} = \frac{m_2}{m_1}$$

با توجه به صورت پرسش :

$$m_2 > m_1 \rightarrow \frac{p_2^2}{p_1^2} > 1 \rightarrow p_2 > p_1$$

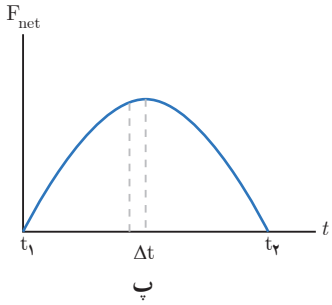
توجه

اعتبار رابطهٔ $K = \frac{p^2}{2m}$ برای اجسامی که با اندازهٔ تندی‌های بسیار کمتر از تندی نور حرکت می‌کنند معتبر است. (البته در این کتاب مسئله‌ای داده نمی‌شود که این رابطه اعتبار نداشته باشد).

مثال ۲ـ۱۱

فرصتی را فراهم می‌کند تا در آن دانش‌آموزان تکانه و انرژی جنبشی یک جسم را تعیین کنند و به برداری بودن تکانه و نرده‌ای بودن انرژی جنبشی توجه داشته باشند.

بعد از مثال ۲ــ۱۱، به شرایط واقعی‌تر پرداخته می‌شود، یعنی در شرایط واقعی نیروی وارد بر یک جسم به ندرت ثابت است. مثلاً نیروی وارد بر جسم F_{net} به‌صورت شکل زیر تغییر کند. در این صورت معادله ۲ــ۱۰ فقط برای بازه‌های زمانی بسیار بسیار کوچک قابل استفاده است و $F_{net}\Delta t$ برابر با مساحت سطح زیر نمودار در بازهٔ زمانی نشان داده شده است. یعنی تغییر تکانه را در این حالت می‌توان از مساحت سطح زیر نمودار نیروی خالص ــ زمان به‌دست آورد. یعنی : |مساحت زیر نمودار| $= |\Delta \vec{p}|$



پ

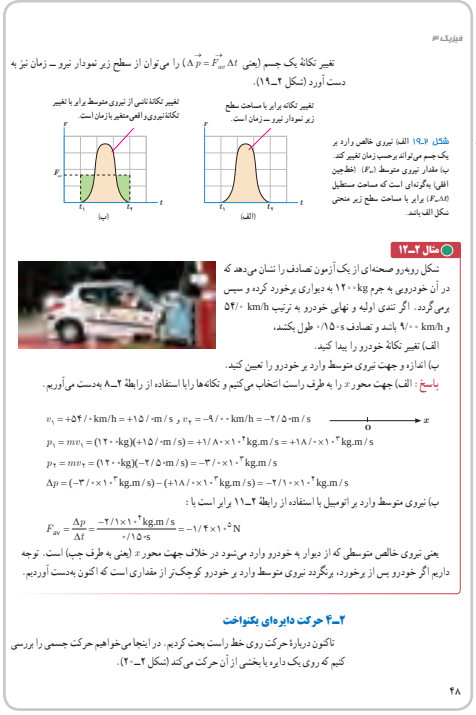
در این‌گونه موارد برای بازهٔ زمانی بزرگ t_1 تا t_2، به‌جای نیروی خالص باید نیروی خالص متوسط در فاصله زمانی مورد نظر را به‌کار برد. این نیروی خالص به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که مساحت زیر آن برابر با مساحت سطح زیر نمودار نیروی خالص برحسب زمان باشد.

نظر دانش‌آموزان را به سطح زیر نمودار $F-t$ و $F_{av}-t$ جلب می‌کنیم. آنها باید به این موضوع برسند که مساحت سطح زیر نمودار $F_{av}-t$ (مستطیل نشان داده شده) برابر با مساحت سطح زیر نمودار $F-t$ است.

توجه داریم در رابطهٔ ۲ــ۱۱، اگر $\vec{F}_{av}$ برابر صفر باشد، یعنی تغییر تکانهٔ جسم در بازهٔ زمانی Δt صفر باشد، تکانهٔ جسم در t_1 با تکانهٔ جسم در t_2 برابر است ($\vec{p}_1 = \vec{p}_2$) همچنین در رابطه ۲ــ۱۰، اگر $\vec{F}_{net}$ صفر باشد، $\Delta \vec{p}$ صفر می‌شود و این بدان معناست که در بازهٔ زمانی Δt، تکانه ثابت بوده و تغییر نمی‌کند. (اصطلاحاً تکانه پایسته می‌ماند)

مثال ۲ــ۱۲

مثالی کاربردی و مهم بوده که دانش‌آموزان باید به بزرگی نیرویی که دیوار به خودرو (با این تندی کم) وارد می‌کند توجه کنند. همچنین به این موضوع توجه کنند که اگر پس از برخورد، خودرو برنگردد، نیروی متوسط وارد بر خودرو کوچک‌تر از مقداری است که خودرو برمی‌گردد (به شرط ثابت بودن زمان برخورد).



فیزیک ۳

تغییر تکانهٔ یک جسم (یعنی $\Delta \vec{p} = \vec{F}_{av}\Delta t$) را می‌توان از سطح زیر نمودار نیرو ــ زمان نیز به دست آورد (شکل ۲ــ۱۹).

شکل ۲ــ۱۹ الف) نیروی خالص وارد بر یک جسم می‌تواند برحسب زمان تغییر کند. ب) مقدار نیروی متوسط (F_{av}) (خط‌چین آبی) به‌گونه‌ای است که مساحت مستطیل ($F_{av}\Delta t$) برابر با مساحت سطح زیر منحنی شکل الف باشد.

مثال ۲ــ۱۲

شکل روبه‌رو صحنه‌ای از یک آزمون تصادف را نشان می‌دهد که در آن خودرویی به جرم ۱۲۰۰kg به دیواری برخورد کرده و سپس برمی‌گردد. اگر تندی اولیه و نهایی خودرو به ترتیب ۵۴/۰ km/h و ۹/۰۰ km/h باشد و تصادف ۰/۱۵۰s طول بکشد،

الف) تغییر تکانهٔ خودرو را پیدا کنید.

ب) اندازه و جهت نیروی متوسط وارد بر خودرو را تعیین کنید.

پاسخ : الف) جهت محور x را به طرف راست انتخاب می‌کنیم و تکانه‌ها را با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۸ به‌دست می‌آوریم.

$$v_1 = +54/0\,km/h = +15/0\,m/s \quad , \quad v_2 = -9/00\,km/h = -2/50\,m/s$$

$$p_1 = mv_1 = (1200\,kg)(+15/0\,m/s) = +1/80\times10^4\,kg.m/s$$

$$p_2 = mv_2 = (1200\,kg)(-2/50\,m/s) = -3/00\times10^3\,kg.m/s$$

$$\Delta p = (-3/00\times10^3\,kg.m/s) - (+18/0\times10^3\,kg.m/s) = -21/0\times10^3\,kg.m/s$$

ب) نیروی متوسط وارد بر اتومبیل با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۱۱ برابر است با :

$$F_{av} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{-21/0\times10^3\,kg.m/s}{0/150\,s} = -1/4\times10^5\,N$$

یعنی نیروی خالص متوسطی که از دیوار به خودرو وارد می‌شود در خلاف جهت محور x (یعنی به طرف چپ) است. توجه داریم اگر خودرو پس از برخورد، برنگردد نیروی متوسط وارد بر خودرو کوچک‌تر از مقداری است که اکنون به‌دست آوردیم.

۲ــ۴ حرکت دایره‌ای یکنواخت

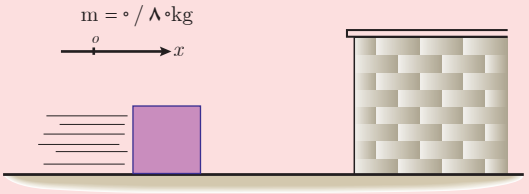
تاکنون دربارهٔ حرکت روی خط راست بحث کردیم. در اینجا می‌خواهیم حرکت جسمی را بررسی کنیم که روی یک دایره یا بخشی از آن حرکت می‌کند (شکل ۲ــ۲۰).

تمرین پیشنهادی

در شکل زیر جسمی با تندی ۵/۰m/s به دیوار برخورد کرده و با تندی ۲/۰m/s برمی‌گردد. اگر زمان برخورد ۰/۲۰s باشد؛
الف) تغییر تکانهٔ جسم را پیدا کنید.
ب) اندازه و جهت نیروی متوسط وارد بر جسم را تعیین کنید.

پاسخ : الف) $\Delta \vec{p} = -(5/6\text{kgm/s})\,\vec{i}$

ب) $F_{av} = 28\text{N}$ و در خلاف جهت محور x ($\vec{F}_{av} = -(28\text{N})\,\vec{i}$)



دانستنی

مشت‌زنی و آسیب مغزی

در مسابقه‌های مشت‌زنی قرن نوزدهم، از مشت‌های برهنه استفاده می‌کردند. در مشت‌زنی جدید، مشت‌زن‌ها دستکش‌های لایی‌دار می‌پوشند. چگونه این دستکش‌ها مانع آسیب دیدن مغز آنها می‌شوند؟ همچنین، چرا مشت‌زن‌ها معمولاً با ضربهٔ مشت می‌چرخند؟

توضیح : مغز در شارهٔ ضربه‌گیر داخل جمجمه غوطه‌ور است. اگر مشت برهنه ناگهان به مغز بخورد، جمجمه به سرعت شتاب می‌گیرد. این نیروی بزرگ ناگهانی (F_{av} بزرگ و Δt کوچک) می‌تواند باعث آسیب جدی به مغز شود. دستکش‌های لایی‌دار زمان اعمال نیرو به سر (Δt) را زیاد می‌کنند. برای ضربهٔ معین $F_{av}\Delta t$، دستکش بازهٔ زمانی طولانی‌تر از مشت برهنه را به‌وجود می‌آورد، و نیروی متوسط را کم می‌کند. چون نیروی متوسط کاهش یافته است، شتاب جمجمه کم می‌شود، و احتمال آسیب مغزی را کاهش می‌دهد (اما از بین نمی‌برد). همین استدلال را می‌توان برای «چرخیدن با ضربهٔ مشت» به‌کار برد. اگر هنگام برخورد مشت، سر ثابت بماند، بازهٔ زمانی اعمال نیرو نسبتاً کوتاه و نیروی متوسط بزرگ می‌شود. اگر سر در جهت ضربهٔ مشت حرکت کند، بازهٔ زمانی طولانی می‌شود و نیروی متوسط کاهش می‌یابد.

تمرین پیشنهادی

به یک توپ گلف به جرم $۵/۰ \times ۱۰^{-۲}\,kg$، با چوگان ضربه زده می‌شود. نیروی وارد بر توپ از صفر در هنگام تماس تا مقدار بیشینه (هنگام تغییر شکل بیشینهٔ توپ) تغییر می‌کند و سپس، مطابق نمودار نیرو بر حسب زمان در شکل ۲ــ۱۹، هنگام جدا شدن چوگان از توپ به صفر برمی‌گردد. فرض کنید توپ با سرعت $+۴۴\,m/s$ چوگان را ترک کند. (الف) اندازهٔ تغییر تکانهٔ ناشی از برخورد را به‌دست آورید. (ب) مدت برخورد و نیروی متوسط وارد بر توپ را برآورد کنید.

پاسخ : الف) $\Delta p = +۲/۲\,kgm/s$

ب) مسافتی که توپ جمع می‌شود را حدود $۲/۰\,cm$ فرض می‌کنیم و با استفاده از رابطهٔ $\Delta t = \frac{\Delta x}{v_{av}}$ زمان را محاسبه می‌کنیم :

$$\Delta t = \frac{۲/۰ \times ۱۰^{-۲}\,m}{۲۲\,m/s} = ۹/۱ \times ۱۰^{-۴}\,s$$

$$F_{av} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{+۲/۲\,kgm/s}{۹/۱ \times ۱۰^{-۴}\,s} = +۲/۴ \times ۱۰^{۳}\,N$$

دانستنی معلم

آسیب‌دیدگی در تصادف‌های خودرو

آسیب‌دیدگی‌های عمده‌ای که در اثر برخورد شخص با داخل خودرو، در تصادف رخ می‌دهد صدمه دیدن به مغز، شکستگی استخوان، و جراحت پوست، رگ‌های خونی، و اعضای داخلی است. در اینجا، به مقایسهٔ آستانه‌های غیر دقیق آسیب‌دیدگی انسان با نمونهٔ نیروها و شتاب‌هایی می‌پردازیم که معمولاً در تصادف خودرو با آنها مواجه می‌شویم.

فشار نیروی $۹۰\,kN$ ($۲۰۰۰۰\,lb$) بر استخوان درشت نی باعث شکستگی آن می‌شود. گرچه نیروی لازم برای شکستن برحسب استخوان مورد نظر تغییر می‌کند، اما می‌توان این مقدار را به عنوان نیروی آستانه برای شکستگی در نظر گرفت. می‌دانیم که شتاب گرفتن سریع سر، حتی بدون شکستگی جمجمه، می‌تواند کشنده باشد. برآوردها نشان می‌دهد که قرار گرفتن در معرض شتاب $۱۵۰\,g$ به مدت $۴\,ms$ یا $۵۰\,g$ برای $۶۰\,ms$ در ٪۵۰ موارد کُشنده است. این جراحت‌های ناشی از شتاب‌گیری سریع اغلب باعث آسیب دیدن اعصاب نخاع در جایی می‌شود که اعصاب وارد پایهٔ مغز می‌شوند. آستانهٔ آسیب‌دیدگی پوست، رگ‌های خونی، و اعضای داخلی را می‌توان از داده‌های مربوط به برخورد با تمام بدن به‌دست آورد که در آن نیرو به صورت یکنواخت در سطح جلویی به مساحت $۰/۷\,m^۲$ تا $۰/۹\,m^۲$ توزیع شده باشد. این داده‌ها نشان می‌دهند اگر برخورد کمتر از حدود $۷۰\,ms$ طول بکشد، شخص درصورتی زنده می‌ماند که فشار برخورد (نیرو به ازای واحد سطح) تمام بدن کمتر از $۱/۹ \times ۱۰^{۵}\,N/m^۲$ ($۲۸\,lb/in^۲$) باشد. فشار ضربهٔ $۳/۴ \times ۱۰^{۵}\,N/m^۲$ ($۵۰\,lb/in^۲$) به تمام بدن در ۵۰ درصد موارد باعث مرگ می‌شود.

با در اختیار داشتن داده‌های بالا، می‌توان نیروها و شتاب‌ها در یک نمونه تصادف خودرو را برآورد کرد و دید چگونه کمربندهای

ایمنی، کیسه‌های هوا، و تودوزی‌های لایی‌دار می‌توانند احتمال مرگ یا جراحت جدی در برخورد را کم کنند. برخوردی شامل یک مسافر ۷۵kg بدون کمربند ایمنی را در نظر بگیرید، که هنگام جراحت با سرعت ۲۷m/s (۹۷km/h) پس از برخورد با داشبورد بدون لایی ظرف ۰/۰۱۰s متوقف می‌شود. با استفاده $F_{av}\Delta t = mv_f - mv_i$، درمی‌یابیم که :

$$F_{av} = \frac{mv_f - mv_i}{\Delta t} = \frac{0-(75\,kg)(27\,m/s)}{0/010\,s} = -2/0\times10^5\,N$$

و شتاب برابر است با :

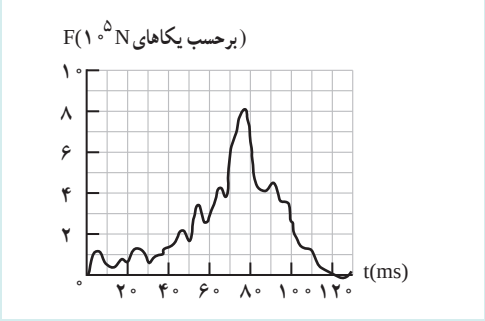
$$a = \left|\frac{\Delta v}{\Delta t}\right| = \frac{27\,m/s}{0/010\,s} = 2700\,m/s^2 = \frac{2700\,m/s^2}{9/8\,m/s^2}g = 280\,g$$

اگر فرض کنیم سر و سینهٔ مسافر با مجموع مساحت ۰/۵m^2 با داشبورد و شیشهٔ جلوی خودرو برخورد کند، و در معرض نیرو قرار گیرد، فشار وارد بر تمام بدن او برابر می‌شود با :

$$\frac{F_{av}}{A} = \frac{2/0\times10^5\,N}{0/5\,m^2} \simeq 4\times10^5\,N/m^2$$

مشاهده می‌کنیم که نیرو، شتاب، و فشار تمام بدن همه فراتر از آستانهٔ کُشنده بودن یا شکستگی استخوان‌ها هستند و این برخورد بدون حفاظ در ۹۷km/h بی‌شک کُشنده است.

برای کاهش یا حذف احتمال مرگ در تصادف اتومبیل چه می‌توان کرد؟ مهم‌ترین عامل زمان برخورد یا زمان متوقف شدن شخص است. اگر بتوان این زمان را به ۱۰ تا ۱۰۰ برابر مقدار ۰/۰۱s برای برخورد سخت افزایش داد، احتمال زنده ماندن در تصادف اتومبیل بسیار بیشتر می‌شود، زیرا افزایش Δt، نیروی تماس را ۱۰ تا ۱۰۰ برابر کوچک‌تر می‌سازد. کمربند ایمنی افراد را طوری مهار می‌کند که زمان متوقف شدن آنها همان زمان توقف خودرو، نوعاً حدود ۰/۱۵s می‌شود. این موضوع زمان برخورد مؤثر را یک مرتبهٔ بزرگی زیاد می‌کند. نمودار زیر، نیروی اندازه‌گیری شده وارد بر خودرو را برحسب زمان برای یک تصادف نشان می‌دهد.



نمودار نیروی وارد بر خودرو بر حسب زمان برای تصادف نوعی

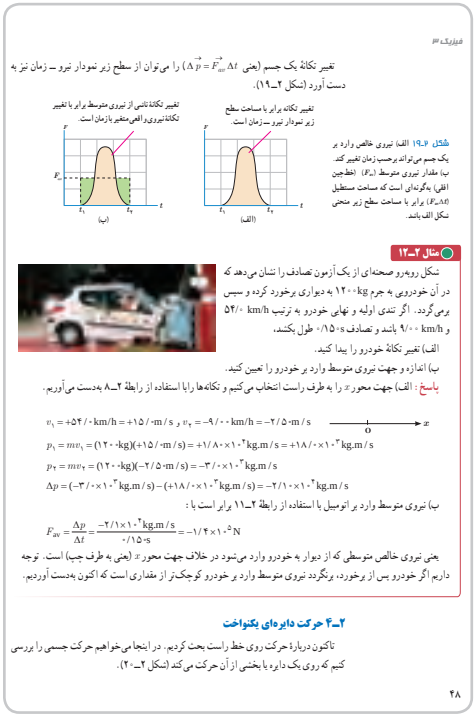
کیسه‌های هوا نیز زمان برخورد را زیاد می‌کنند، با خالی شدن سریع باد انرژی بدن را جذب، و نیروی تماس را در مساحت بدن حدود ۰/۵m^2 پخش می‌کنند، و مانع از زخم‌های عمیق یا شکستگی می‌شوند. کیسه‌های هوا باید به سرعت وارد کار شوند (در

کمتر از ۱۰ms تا شخصی را که با سرعت ۲۷m/s در حرکت است پیش از متوقف شدن در برابر میل‌فرمان در فاصلهٔ حدود ۰/۳m متوقف کنند. برای این آماده‌سازی سریع، شتاب‌سنج‌ها، سیگنالی را به‌منظور تخلیهٔ یک ردیف خازن می‌فرستند، که با اشتعال یک مادهٔ منفجره، کیسهٔ هوا را به سرعت پر از گاز می‌کند. بار الکتریکی لازم برای اشتعال در خازن‌ها ذخیره می‌شود تا اطمینان پیدا کنیم که کیسهٔ هوا در صورت آسیب دیدن باتری یا دستگاه الکتریکی خودرو در برخورد شدید نیز کار می‌کند.

کاهش مهم نیروها، شتاب‌ها، و فشارهای بالقوه مهلک به سطوح قابل تحمل با استفادهٔ هم‌زمان از کمربندهای ایمنی و کیسه‌های هوا به‌صورت زیر خلاصه می‌شود: اگر یک شخص ۷۵kg را که با سرعت ۲۷m/s در حرکت است، کمربند ایمنی در ۰/۱۵s متوقف کند، شخص در معرض نیروی متوسط ۹/۸kN، شتاب متوسط ۱۸g، و فشار تمام بدن $۲/۸ \times ۱۰^۴ N/m^۲$ برای سطح تماس $۰/۵m^۲$ قرار می‌گیرد. این مقدار حدود یک مرتبهٔ بزرگی کمتر از آنهایی هستند که قبلاً برای شخص محافظت نشده حساب کردیم و بسیار پایین‌تر از آستانهٔ جراحت‌هایی خواهند بود که زندگی را تهدید می‌کنند.

۲ــ۴ــ حرکت دایره‌ای یکنواخت

حرکت چرخشی بخش مهمی از زندگی روزمره است. دوران زمین به دور خودش شب و روز را به‌وجود می‌آورد، دوران زمین به دور خورشید سبب ایجاد فصل می‌شود. دوران چرخ‌ها حرکت راحت وسائط نقلیه را امکان‌پذیر می‌سازد، حرکت چرخ‌دنده‌ها بخش مهمی از فناوری ماشین‌آلاتی مانند ساعت، خودرو و... است. برای بررسی حرکت چرخشی لازم است با حرکت دایره‌ای یکنواخت آشنا شویم.



فیزیک ۳

تغییر تکانهٔ یک جسم (یعنی $\Delta \vec{p} = \vec{F}_{av} \Delta t$) را می‌توان از سطح زیر نمودار نیرو ــ زمان نیز به دست آورد (شکل ۲ــ۱۹).

شکل ۲ــ۱۹ الف) نیروی خالص وارد بر یک جسم می‌تواند برحسب زمان تغییر کند. ب) مقدار نیروی متوسط (F_{av}) (خط‌چین افقی) به‌گونه‌ای است که مساحت مستطیل ($F_{av}\Delta t$) برابر با مساحت سطح زیر منحنی شکل الف باشد.

مثال ۲ــ۱۲

شکل روبه‌رو صحنه‌ای از یک آزمون تصادف را نشان می‌دهد که در آن خودرویی به جرم ۱۲۰۰kg به دیواری برخورد کرده و سپس برمی‌گردد. اگر تندی اولیه و نهایی خودرو به ترتیب ۵۴/۰ km/h و ۹/۰۰ km/h باشد و تصادف ۰/۱۵۰s طول بکشد،

الف) تغییر تکانهٔ خودرو را پیدا کنید.

ب) اندازه و جهت نیروی متوسط وارد بر خودرو را تعیین کنید.

پاسخ: الف) جهت محور x را به طرف راست انتخاب می‌کنیم و تکانه‌ها را با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۸ به‌دست می‌آوریم.

$$v_1 = +۵۴/۰ km/h = +۱۵/۰ m/s \quad و \quad v_۲ = -۹/۰۰ km/h = -۲/۵۰ m/s$$

$$p_1 = mv_1 = (۱۲۰۰ kg)(+۱۵/۰ m/s) = +۱/۸۰ \times ۱۰^۴ kg.m/s$$

$$p_۲ = mv_۲ = (۱۲۰۰ kg)(-۲/۵۰ m/s) = -۳/۰ \times ۱۰^۳ kg.m/s$$

$$\Delta p = (-۳/۰ \times ۱۰^۳ kg.m/s) - (+۱۸/۰ \times ۱۰^۳ kg.m/s) = -۲/۱ \times ۱۰^۴ kg.m/s$$

ب) نیروی متوسط وارد بر اتومبیل با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۱۱ برابر است با:

$$F_{av} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{-۲/۱ \times ۱۰^۴ kg.m/s}{۰/۱۵۰ s} = -۱/۴ \times ۱۰^۵ N$$

یعنی نیروی خالص متوسطی که از دیوار به خودرو وارد می‌شود در خلاف جهت محور x (یعنی به طرف چپ) است. توجه داریم اگر خودرو پس از برخورد، برنگردد نیروی متوسط وارد بر خودرو کوچک‌تر از مقداری است که اکنون به‌دست آوردیم.

۲ــ۴ حرکت دایره‌ای یکنواخت

تاکنون دربارهٔ حرکت روی خط راست بحث کردیم. در اینجا می‌خواهیم حرکت جسمی را بررسی کنیم که روی یک دایره یا بخشی از آن حرکت می‌کند (شکل ۲ــ۲۰).

۴۸

به تعریف حرکت دایره‌ای یکنواخت توجه شود. رابطهٔ ۲ــ۱۲ براساس همین تعریف و آنچه دانش‌آموزان در فصل ۱ در مورد تندی، مسافت و زمان خوانده‌اند، داده شده است. یعنی این رابطه، فرمول جدیدی محسوب نمی‌شود، بلکه دانش‌آموز از رابطهٔ ۱ــ۱ می‌تواند دوره را تعریف کند.

توجه داریم با اینکه در حرکت دایره‌ای یکنواخت، اندازهٔ سرعت (تندی) ثابت است، اما چون جهت حرکت دائماً در حال تغییر است، حرکت آن شتاب‌دار است. می‌توان نظر دانش‌آموزان را به بردارهای سرعت در شکل ۲ــ۲۱ جلب کرد.

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

شکل ۲ــ۲۰ حرکت جسم‌های مختلف در مسیرهای دایره‌ای

بدین منظور ذره‌ای را در نظر می‌گیریم که روی یک مسیر دایره‌ای با تندی ثابت حرکت می‌کند (شکل ۲ــ۲۱). به این نوع حرکت، حرکت دایره‌ای یکنواخت می‌گویند. با اینکه تندی جسم در این حرکت ثابت است، حرکت ذره شتاب‌دار است (چرا؟). منظور از ذره می‌تواند جسمی مانند یک ماهواره باشد که در یک مدار دایره‌ای حول زمین می‌چرخد یا الکترونی باشد که در مدل اتمی بور حول هسته می‌چرخد و یا گلوله‌ای که به انتهای نخی بسته شده و در یک مسیر دایره‌ای در حرکت است. صرف نظر از آنکه این ذره چه جسمی است، همواره بردار سرعت ذره ($\vec{v}$) مماس بر مسیر حرکت دایره‌ای است.

شکل ۲ــ۲۱ ذره، روی یک مسیر دایره‌ای در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت با تندی ثابت (... = v_3 = v_2 = v_1) حرکت می‌کند.

پرسش ۲ــ۸

چرا در حرکت دایره‌ای یکنواخت، ذره در بازه‌های زمانی برابر، مسافت‌های یکسانی را طی می‌کند؟

دوره : در حرکت دایره‌ای یکنواخت، مدت زمان لازم برای پیمودن یک دور محیط دایره را دورهٔ تناوب (دوره) می‌نامیم. از آنجا که در این حرکت ذره محیط دایره ($2\pi r$) را با تندی v در زمان T طی می‌کند، داریم :

$$T = \frac{2\pi r}{v} \quad \text{(دوره)} \qquad (۱۲ــ۲)$$

یکای دوره ثانیه، (s) است.

پرسش ۲ــ۹

دورهٔ عقربهٔ ثانیه‌شمار، دقیقه‌شمار و ساعت‌شمار یک ساعت عقربه‌ای چیست؟

۴۹

پاسخ پرسش ۲ــ۸

چون تندی ذره ثابت است بنابراین در بازه‌های زمانی یکسان، مسافت یکسانی را طی می‌کنند :

مسافت = تندی × زمان $\Rightarrow l = v\Delta t$

$\Delta t_1 = \Delta t_2 = \ldots , v_1 = v_2 \ldots , l_1 = v_1\Delta t_1 , l_2 = v_2\Delta t_2 , \ldots \Rightarrow$

$l_1 = l_2 = \ldots$

توجه داریم برای حرکت دایره‌ای یکنواخت نیازی به تعریف بسامد (f) نیست. ضمناً تعریف ω_{av} و ω نیز در کتاب درسی نیامده است.

پاسخ پرسش ۲ــ۹

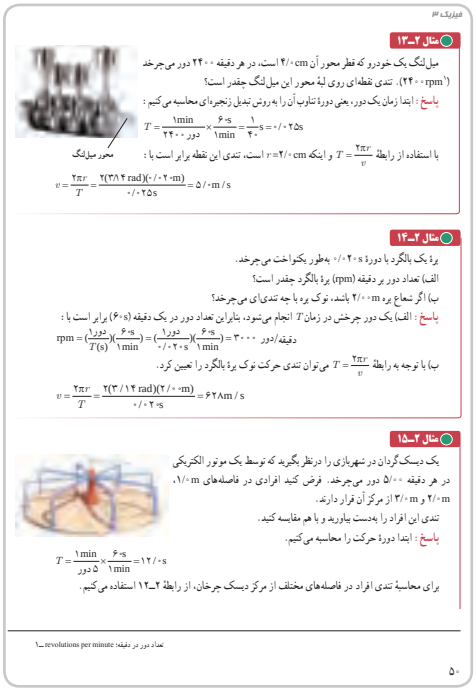
دورهٔ عقربهٔ ثانیه‌شمار، ۶۰ s، دورهٔ عقربهٔ دقیقه‌شمار، ۳۶۰۰ s و ساعت‌شمار ۴۳۲۰۰ s است.

در مثال ۲ــ۱۳

تعداد دور در دقیقهٔ (rpm) میل‌لنگ داده شده است. یکای rpm امروزه بسیار کاربردی است و دانش‌آموزان باید این توانایی را داشته باشند که از روی آن دورهٔ حرکت (T) را به‌دست آورند. ساده‌ترین روش به‌دست آوردن T از روی rpm، استفاده از رابطهٔ $T=\frac{t}{n}$ است. مثلاً در این مثال T را به این روش به‌دست آورند :

$$T=\frac{t}{n}=\frac{۶۰\text{s}}{۲۴۰\text{دور}}=\frac{۱}{۴۰}\text{s}=۰/۰۲۵\text{s}$$

این مثال یک مثال کاربردی در مورد خودروهاست. دانش‌آموزان rpm میل‌لنگ خودرو را از عقربه‌ای که در جلوی راننده قرار دارد می‌توانند بخوانند.



فیزیک ۳

مثال ۲ــ۱۳

میل‌لنگ یک خودرو که قطر محور آن ۴/۰cm است، در هر دقیقه ۲۴۰۰ دور می‌چرخد (۲۴۰۰rpm). تندی نقطه‌ای روی لبهٔ محور این میل‌لنگ چقدر است؟

پاسخ : ابتدا زمان یک دور، یعنی دورهٔ تناوب آن را به روش تبدیل زنجیره‌ای محاسبه می‌کنیم :

$$T=\frac{۱\text{min}}{۲۴۰۰\text{دور}}\times\frac{۶۰\text{s}}{۱\text{min}}=\frac{۱}{۴۰}\text{s}=۰/۰۲۵\text{s}$$

با استفاده از رابطهٔ $T=\frac{۲\pi r}{v}$ و اینکه $r=۴/۰\text{cm}$ است، تندی این نقطه برابر است با :

محور میل‌لنگ

$$v=\frac{۲\pi r}{T}=\frac{۲(۳/۱۴\text{ rad})(۰/۰۲\text{m})}{۰/۰۲۵\text{s}}=۵/۰\text{m/s}$$

مثال ۲ــ۱۴

پرهٔ یک بالگرد با دورهٔ ۰/۰۲۰s به‌طور یکنواخت می‌چرخد.

الف) تعداد دور بر دقیقه (rpm) پرهٔ بالگرد چقدر است؟

ب) اگر شعاع پره ۲/۰۰m باشد، نوک پره با چه تندی‌ای می‌چرخد؟

پاسخ : الف) یک دور چرخش در زمان T انجام می‌شود، بنابراین تعداد دور در یک دقیقه (۶۰s) برابر است با :

$$\text{rpm}=(\frac{\text{دور}۱}{T(\text{s})})(\frac{۶۰\text{s}}{۱\text{min}})=(\frac{\text{دور}۱}{۰/۰۲۰\text{s}})(\frac{۶۰\text{s}}{۱\text{min}})=۳۰۰۰\ \text{دور/دقیقه}$$

ب) با توجه به رابطهٔ $T=\frac{۲\pi r}{v}$ می‌توان تندی حرکت نوک پرهٔ بالگرد را تعیین کرد.

$$v=\frac{۲\pi r}{T}=\frac{۲(۳/۱۴\text{ rad})(۲/۰\text{m})}{۰/۰۲\text{s}}=۶۲\text{Am/s}$$

مثال ۲ــ۱۵

یک دیسک گردان در شهربازی را درنظر بگیرید که توسط یک موتور الکتریکی در هر دقیقه ۵/۰۰ دور می‌چرخد. فرض کنید افرادی در فاصله‌های ۱/۰m، ۲/۰m و ۳/۰m از مرکز آن قرار دارند.

تندی این افراد را به‌دست بیاورید و با هم مقایسه کنید.

پاسخ : ابتدا دورهٔ حرکت را محاسبه می‌کنیم.

$$T=\frac{۱\text{min}}{۵\text{ دور}}\times\frac{۶۰\text{s}}{۱\text{min}}=۱۲/۰\text{s}$$

برای محاسبهٔ تندی افراد در فاصله‌های مختلف از مرکز دیسک چرخان، از رابطهٔ ۲ــ۱۲ استفاده می‌کنیم.

۱ــ revolutions per minute: تعداد دور در دقیقه

۵۰

در مثال ۲ــ۱۴ دانش‌آموزان با همان رابطه ۲ــ۱۲ می‌توانند تندی نوک پره را حساب کنند. در بند الف، تبدیل دوره به rpm را از دانش‌آموز خواسته است که باز هم می‌توان به روش زنجیره‌ای یا روش $T=\frac{t}{n}$ آن را محاسبه کرد.

پیام اصلی مثال ۲ــ۱۵ آن است که دانش‌آموزان پس از حل این مسئله به این نتیجه‌ها برسند؛

۱ــ rpm همهٔ افراد یکسان است.

۲ــ دورهٔ همه افراد یکسان است.

۳ــ تندی افراد که در فاصله‌های مختلف ایستاده‌اند، متفاوت است و هرچه از مرکز چرخش دورتر می‌شویم، تندی بیشتر می‌شود.

پاسخ تمرین ۲ــ۸

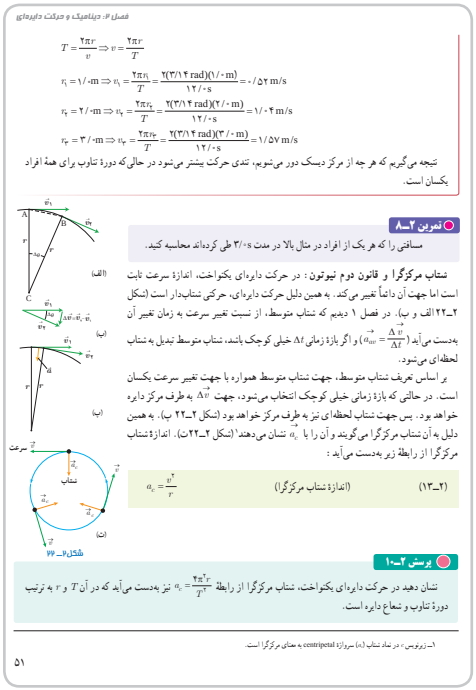
به کمک رابطهٔ ۱ــ۱ می‌توانیم مسافت طی شده توسط افراد را محاسبه کنیم :

$$l_1 = v_1\Delta t = (0/52\,m/s)(3/0\,s) = 1/56\,m$$

$$l_2 = v_2\Delta t = (1/04\,m/s)(3/0\,s) = 3/12\,m$$

$$l_3 = v_3\Delta t = (1/57\,m/s)(3/0\,s) = 4/71\,m$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هرچه فاصلهٔ افراد از مرکز دیسک بیشتر باشد، هم تندی آنها بیشتر است و هم مسافتی که طی می‌کنند.



فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

$$T = \frac{2\pi r}{v} \Rightarrow v = \frac{2\pi r}{T}$$

$$r_1 = 1/0\,m \Rightarrow v_1 = \frac{2\pi r_1}{T} = \frac{2(3/14\ rad)(1/0\,m)}{12/0\,s} = 0/52\,m/s$$

$$r_2 = 2/0\,m \Rightarrow v_2 = \frac{2\pi r_2}{T} = \frac{2(3/14\ rad)(2/0\,m)}{12/0\,s} = 1/04\,m/s$$

$$r_3 = 3/0\,m \Rightarrow v_3 = \frac{2\pi r_3}{T} = \frac{2(3/14\ rad)(3/0\,m)}{12/0\,s} = 1/57\,m/s$$

نتیجه می‌گیریم که هر چه از مرکز دیسک دور می‌شویم، تندی حرکت بیشتر می‌شود در حالی که دورهٔ تناوب برای همهٔ افراد یکسان است.

تمرین ۲ــ۸

مسافتی را که هر یک از افراد در مثال بالا در مدت ۳/۰s طی کرده‌اند محاسبه کنید.

شتاب مرکزگرا و قانون دوم نیوتون : در حرکت دایره‌ای یکنواخت، اندازهٔ سرعت ثابت است اما جهت آن دائماً تغییر می‌کند. به همین دلیل حرکت دایره‌ای، حرکتی شتاب‌دار است (شکل ۲ــ۲۲ الف و ب). در فصل ۱ دیدیم که شتاب متوسط، از نسبت تغییر سرعت به زمان تغییر آن به‌دست می‌آید ($\vec{a}_{av} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$) و اگر بازهٔ زمانی Δt خیلی کوچک باشد، شتاب متوسط تبدیل به شتاب لحظه‌ای می‌شود.

بر اساس تعریف شتاب متوسط، جهت شتاب متوسط همواره با جهت تغییر سرعت یکسان است. در حالتی که بازهٔ زمانی خیلی کوچک انتخاب می‌شود، جهت $\Delta\vec{v}$ به طرف مرکز دایره خواهد بود. پس جهت شتاب لحظه‌ای نیز به طرف مرکز خواهد بود (شکل ۲ــ۲۲ ب). به همین دلیل به آن شتاب مرکزگرا می‌گویند و آن را با $\vec{a}_c$ نشان می‌دهند[1] (شکل ۲ــ۲۲ ج). اندازهٔ شتاب مرکزگرا از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$a_c = \frac{v^2}{r} \qquad \text{(اندازهٔ شتاب مرکزگرا)} \qquad (۱۳ــ۲)$$

شکل ۲ــ۲۲

پرسش ۲ــ۱۰

نشان دهید در حرکت دایره‌ای یکنواخت، شتاب مرکزگرا از رابطهٔ $a_c = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$ نیز به‌دست می‌آید که در آن T و r به ترتیب دورهٔ تناوب و شعاع دایره است.

۱ــ زیرنویس c در نماد شتاب (a_c) سرواژهٔ centripetal به معنای مرکزگرا است.

۵۱

می‌توان آموزش شتاب مرکزگرا را با این سؤال شروع کرد که حرکت دایره‌ای یکنواخت شتاب‌دار است یا نه؟ چرا؟ اگر شتاب‌دار است جهت شتاب آن در کدام جهت است؟ البته دانش‌آموزان از بخش قبل در مورد شتاب‌دار بودن این حرکت بحث و گفت‌گو کرده‌اند. در اینجا باید بتوانند براساس طرح درس آورده شده در کتاب، جهت آن را بفهمند.

شکل‌های ۲ــ۲۲ الف، ب و پ صرفاً برای نشان دادن جهت $\Delta\vec{v}$ و اینکه در حالتی که Δt خیلی کوچک می‌شود، جهت شتاب با جهت $\Delta\vec{v}$ یکسان است، آورده شده‌اند. بنابراین نباید براساس این شکل‌ها، عملیات تفاضل برداری از دانش‌آموزان خواسته شود. شکل ت کمک زیادی به جمع‌بندی مطلب می‌کند. توجه داریم در این شکل $\vec{a}_c$ ها هم‌اندازه ولی جهت آنها در نقاط مختلف متفاوت است و همچنین $\vec{v}$ ها هم‌اندازه ولی جهت آنها در نقاط مختلف متفاوت است.

توجه

در شکل ۲ــ۲۲ ب، بسیاری از دانش‌آموزان با تفاضل برداری آشنا نیستند اما جمع برداری را می‌شناسند. اگر از جمع برداری شروع کنیم می‌توانیم به تفاضل دو بردار برسیم :

$$\vec{v}_1 + \Delta\vec{v} = \vec{v}_2 \rightarrow \vec{v}_2 - \vec{v}_1 = \Delta\vec{v}$$

یعنی $\Delta\vec{v}$ برابر تفاضل $\vec{v}_1$ از $\vec{v}_2$ $(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)$ است.

پاسخ پرسش ۲ــ۱۰

از رابطهٔ دوره و شتاب مرکزگرا استفاده می‌کنیم.

$$a_c = \frac{v^2}{r} \quad , \quad T = \frac{2\pi r}{v} \Rightarrow a_c = \frac{\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2}{r} = \frac{4\pi^2 r^2}{rT^2} \Rightarrow a = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

با پاسخ دادن به این پرسش می‌توانیم رابطهٔ بین دوره، شعاع چرخش ذره و شتاب مرکزگرا را پیدا کنیم.

مثال ۲ــ۱۶

یک تمرین معمولی برای پیدا کردن دوره شتاب مرکزگرای یک خودرو بر حسب کمیت‌های شعاع و تندی است.

تمرین ۲ــ۹

با حل این تمرین متوجه می‌شویم که شتاب مرکزگرای سورتمه در پیچ دوم که شعاع آن کمتر است، بیشتر می‌باشد. پس نیروی مرکزگرای لازم برای چرخیدن در پیچ‌های تند بیشتر است و احتمال خارج شدن از مسیر نیز بیشتر است. پس بهترین کار برای داشتن امنیت، آن است که در سرپیچ‌ها، بالاخص پیچ‌های با شعاع کم (پیچ تند)، تندی یا اندازهٔ سرعت را کاهش دهیم.

پاسخ :

$$a_{c_1} = \frac{v^2}{r_1} = \frac{(34\ \mathrm{m/s})^2}{33\ \mathrm{m}} = 35\ \mathrm{m/s^2}$$

$$a_{c_2} = \frac{v^2}{r_2} = \frac{(34\ \mathrm{m/s})^2}{24\ \mathrm{m}} = 48\ \mathrm{m/s^2}$$

$$T = \frac{2\pi r}{v} \Rightarrow v = \frac{2\pi r}{T}$$

$$r_1 = 1/0\ \mathrm{m} \Rightarrow v_1 = \frac{2\pi r_1}{T} = \frac{2(3/14\ \mathrm{rad})(1/0\ \mathrm{m})}{12/0\ \mathrm{s}} = 0/52\ \mathrm{m/s}$$

$$r_2 = 2/0\ \mathrm{m} \Rightarrow v_2 = \frac{2\pi r_2}{T} = \frac{2(3/14\ \mathrm{rad})(2/0\ \mathrm{m})}{12/0\ \mathrm{s}} = 1/04\ \mathrm{m/s}$$

$$r_3 = 3/0\ \mathrm{m} \Rightarrow v_3 = \frac{2\pi r_3}{T} = \frac{2(3/14\ \mathrm{rad})(3/0\ \mathrm{m})}{12/0\ \mathrm{s}} = 1/57\ \mathrm{m/s}$$

نتیجه می‌گیریم که هر چه از مرکز دیسک دور می‌شویم، تندی حرکت بیشتر می‌شود در حالی که دورهٔ تناوب برای همهٔ افراد یکسان است.

تمرین ۲ــ۸

مسافتی را که هر یک از افراد در مثال بالا در مدت ۳/0s طی کرده‌اند محاسبه کنید.

شتاب مرکزگرا و قانون دوم نیوتون : در حرکت دایره‌ای یکنواخت، اندازهٔ سرعت ثابت است اما جهت آن دائماً تغییر می‌کند. به همین دلیل حرکت دایره‌ای، حرکتی شتاب‌دار است (شکل ۲ــ۲۲ الف و ب). در فصل ۱ دیدیم که شتاب متوسط، از نسبت تغییر سرعت به زمان تغییر آن به‌دست می‌آید ($\vec{a}_{av} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$) و اگر بازهٔ زمانی Δt خیلی کوچک باشد، شتاب متوسط تبدیل به شتاب لحظه‌ای می‌شود.

بر اساس تعریف شتاب متوسط، جهت شتاب متوسط همواره با جهت تغییر سرعت یکسان است. در حالتی که بازهٔ زمانی خیلی کوچک انتخاب می‌شود، جهت $\Delta \vec{v}$ به طرف مرکز دایره خواهد بود. پس جهت شتاب لحظه‌ای نیز به طرف مرکز خواهد بود (شکل ۲ــ۲۲ ب). به همین دلیل به آن شتاب مرکزگرا می‌گویند و آن را با $\vec{a}_c$ نشان می‌دهند[1] (شکل ۲ــ۲۲ ج). اندازهٔ شتاب مرکزگرا از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$a_c = \frac{v^2}{r} \qquad \text{(اندازهٔ شتاب مرکزگرا)} \qquad (۲ــ۱۳)$$

شکل ۲ــ۲۲

پرسش ۲ــ۱۰

نشان دهید در حرکت دایره‌ای یکنواخت، شتاب مرکزگرا از رابطهٔ $a_c = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$ نیز به‌دست می‌آید که در آن T و r به ترتیب دورهٔ تناوب و شعاع دایره است.

۱ــ زیرنویس c در نماد شتاب (a_c) سرواژهٔ centripetal به معنای مرکزگرا است.

مثال ۲ــ۱۶

خودرویی در یک میدان به شعاع ۱۰۰m با تندی ۳۶/0 km/h در حال دور زدن است. دوره و شتاب مرکزگرای خودرو را محاسبه کنید.

پاسخ : با توجه به داده‌های مسئله یعنی شعاع و تندی، می‌توانیم از رابطه‌های $T = \frac{2\pi r}{v}$ و $a_c = \frac{v^2}{r}$ برای محاسبهٔ دوره و شتاب مرکزگرا استفاده کنیم. نخست تبدیل یکاها را انجام می‌دهیم و سپس کمیت‌های خواسته شده را به‌دست می‌آوریم :

$$v = (36/0\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}})(\frac{1000\ \mathrm{m}}{1\ \mathrm{km}})(\frac{1\ \mathrm{h}}{3600\ \mathrm{s}}) = 10/0\ \mathrm{m/s}$$

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2(3/14\ \mathrm{rad})(100\ \mathrm{m})}{10/0\ \mathrm{m/s}} = 62/8\ \mathrm{s}$$

$$a_c = \frac{v^2}{r} = \frac{(10/0\ \mathrm{m/s})^2}{100\ \mathrm{m}} = 1/0\ \mathrm{m/s^2}$$

تمرین ۲ــ۹

شکل روبه‌رو مسیر حرکت سورتمه‌ای را در مسابقهٔ المپیک زمستانی نشان می‌دهد. سورتمه روی یک سطح افقی در حال حرکت است. اگر تندی حرکت سورتمه در کل مسیر ۳۴m/s باشد، شتاب مرکزگرای آن را در هر یک از پیچ‌ها به‌دست آورید.

دیدیم شتاب جسم در حرکت دایره‌ای یکنواخت در راستای شعاع دایره و جهت آن به طرف مرکز دایره است. از قانون دوم نیوتون می‌دانیم شتاب یک جسم را نیروی خالص وارد بر آن ایجاد می‌کند و شتاب جسم همواره در راستا و جهت نیروی خالص وارد بر جسم است. بنابراین، در حرکت دایره‌ای یکنواخت نیز یک نیروی خالص رو به مرکز، سبب ایجاد شتاب مرکزگرا می‌شود. به این نیروی خالص که منجر به حرکت دایره‌ای می‌شود، **نیروی مرکزگرا** می‌گوییم. وقتی جسم متصل به نخی را روی سطح افقی بدون اصطکاک می‌چرخانیم، درمی‌یابیم که باید نخ را دائماً بکشیم؛ یعنی نیروی مرکزگرا به آن وارد کنیم (شکل ۲ــ۲۳). نخ نیروی مرکزگرایی را به جسم وارد می‌کند که آن را در مسیر دایره‌ای به حرکت وامی‌دارد. نیروی مرکزگرا نوع جدیدی از نیرو نیست، نیروهای گرانشی یا الکتریکی می‌توانند نیروهای مرکزگرا را تأمین کنند؛ مثلاً نیروی گرانشی به طرف مرکز زمین، ماه را در مداری تقریباً دایره‌ای نگه می‌دارد. الکترون‌های مداری اتم‌ها در مدل پور تحت‌تأثیر نیروی الکتریکی به طرف هسته در مدارهای خود می‌چرخند و ... .

شکل ۲ــ۲۳ نیروی کشش نخ نیروی مرکزگرای لازم جهت چرخش جسم بر سطح افقی را تأمین می‌کند.

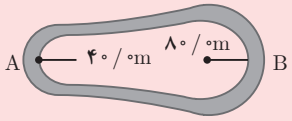
قانون دوم نیوتون ($F_{net} = ma$) را در حرکت دایره‌ای یکنواخت به‌صورت زیر می‌توانیم بنویسیم :

$$F_{net} = m\frac{v^2}{r} \qquad \text{(قانون دوم نیوتون در حرکت دایره‌ای یکنواخت)} \qquad (۲ــ۱۴)$$

در این رابطه F_{net} بزرگی نیروی خالص وارد بر جسم در راستای شعاع و به طرف مرکز دایره است.

تمرین پیشنهادی

یک پیست اتومبیل‌رانی طوری ساخته شده است که دو کمان به شعاع‌های ۸۰/۰m در B و ۴۰/۰m در A را با دو مسیر مستقیم به هم متصل می‌سازد. در یک دور آزمایشی راننده‌ای با تندی ۵۰/۰m/s یک دور کامل می‌زند. شتاب مرکزگرا را در A و B به دست آورید.



پاسخ :

$$a_A = \frac{(50/0\ m/s)^2}{40/0\ m} = 62/5\ m/s^2 \quad \text{و} \quad a_B = \frac{(50/0\ m/s)^2}{80/0\ m} = 31/3\ m/s^2$$

نیروی مرکزگرا : در طراحی این بخش از درس، از قانون دوم نیوتون بهره می‌گیریم. یعنی یک جسم به علت نیروی خالص وارد بر آن شتاب می‌گیرد و جهت شتاب جسم همواره در جهت نیروی خالص وارد بر آن است. همچنین توجه داریم که نیروی مرکزگرا نوع جدیدی از نیرو نیست. نیروی مرکزگرا را باید نوعی نیروی فیزیکی واقعی تأمین کند. مانند نیروی گرانشی وارد بر ماهواره یا نیروی کشش نخ وارد بر گوی متصل به نخ.

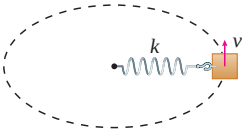
دانستنی

نیروهای مجازی

هرکسی که سوار چرخ‌وفلک شده باشد در معرض چیزی قرار گرفته است که احساس نیروی «فرار کردن از مرکز» را به‌وجود می‌آورد. نگه داشتن نرده و حرکت به طرف مرکز مانند بالا رفتن از یک تپه یا شیب تند است. در واقع، این نیرو به اصطلاح مرکزگریز مجازی است. در واقع، شخص سوار با ماهیچه‌های دست و بازویش نیروی مرکزگرایی را به بدنش وارد می‌کند. به علاوه اصطکاک ایستایی بین پاهای شخص با سکو، نیروی مرکزگرای کوچک‌تری را به او وارد می‌کند. اگر دست شخص سوار بلغزد، به‌صورت شعاعی به بیرون پرتاب نمی‌شود، بلکه روی خط راست مماس بر نقطه‌ای از فضا که دستش از نرده جدا شده از آن دور می‌شود. شخص سوار در نقطه‌ای دور از مرکز فرود می‌آید نه «با فرار کردن از مرکز» در امتداد خط شعاعی بلکه، عمود بر خط شعاعی حرکت می‌کند و با افزایش جابه‌جایی شعاعی جابه‌جایی زاویه‌ای پیدا می‌کند.

پاسخ مثال ۲ــ۱۷

در این مثال چهارچرخه روی سطح افقی حرکت می‌کند و فرض می‌شود کشش نخ نیز در راستای افقی است. جالب بودن این نوع مثال‌ها در این است که با داشتن شعاع حرکت، جرم و نیروی مرکزگرا می‌توانیم تندی حرکت و دورهٔ حرکت را به‌دست آوریم و این توانایی مهمی برای دانش‌آموزان محسوب می‌شود. در این نوع مثال‌ها می‌توان به‌جای طناب از فنر نیز استفاده کرد. با دانستن ثابت فنر و مقدار تغییر طول آن، نیروی مرکزگرا مشخص می‌شود و طول فنر مساوی شعاع چرخش است. بقیهٔ محاسبات نیز مانند مثال ۲ــ۱۷ خواهد بود.



فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

مثال ۲ــ۱۷

پدری فرزند ۲۰ کیلوگرمی خود را در یک چهارچرخهٔ ۵/۰ کیلوگرمی قرار می‌دهد و با یک طناب ۲/۰ متری، چهارچرخه را روی سطح افقی زمین به‌گونه‌ای می‌کشد تا چهارچرخه روی دایره‌ای حرکت کند. با فرض یکنواخت بودن حرکت چهارچرخه و صرف‌نظر کردن از اصطکاک و با فرض اینکه نیروی کشش طناب ۱۰۰N باشد، تندی و دورهٔ چهارچرخه را به‌دست آورید.

پاسخ: بچه و چهارچرخه را به‌صورت یک ذره فرض می‌کنیم که در یک مسیر دایره‌ای با نیروی مرکزگرای ۱۰۰N حرکت می‌کند. بر ذره سه نیروی وزن، نیروی عمودی سطح (در راستای عمودی) و نیروی کشش نخ (مرکزگرا) به طرف مرکز دایره وارد می‌شود. نیروی وزن و نیروی عمودی سطح همدیگر را خنثی می‌کنند و بنابراین تنها نیروی $\vec{T}$ به‌عنوان نیروی خالص در نظر گرفته می‌شود.

$$m = 20\,\text{kg},\ r = 2/0\,\text{m},\ F_{net} = T = 100\,\text{N}$$

$$F_{net} = m\frac{v^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{rF}{m}} = \sqrt{\frac{(2/0\,\text{m})(100\,\text{N})}{20\,\text{kg}}} = 2/8\,\text{m/s}$$

$$\text{دوره}: T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi(2/0\,\text{m})}{2/8\,\text{m/s}} = 4/5\,\text{s}$$

تمرین ۲ــ۱۰

خودرویی به جرم 1500 kg را در نظر بگیرید که می‌خواهد در یک پیچ مسطح افقی به شعاع 50/0 m بدون آنکه بلغزد، دور بزند. اگر ضریب اصطکاک ایستایی بین لاستیک و سطح جاده 1/0 باشد، حداکثر تندی خودرو چقدر می‌تواند باشد؟ (راهنمایی: با اینکه خودرو می‌خواهد یک‌چهارم دایره را طی کند، می‌توانیم خودرو را به‌صورت یک ذره در نظر بگیریم که در یک‌چهارم دایره، حرکت دایره‌ای یکنواخت دارد. در راستای عمود بر سطح، نیروی وزن و نیروی عمودی سطح بر خودرو وارد می‌شود و نیروی اصطکاک ایستایی که عمود بر راستای حرکت است، مانع از لغزش خودرو شده و به طرف مرکز پیچ، بر خودرو وارد می‌شود. این نیرو نقش مرکزگرای لازم را برای دور زدن تأمین می‌کند.)

نیروهای اصطکاک ایستایی

۲ــ۵ نیروی گرانشی

وقتی سیبی از یک درخت جدا می‌شود، چه نیروی سبب سقوط آن به طرف زمین می‌شود؟ وقتی تیر آب را باز می‌کنیم، چه نیروی سبب می‌شود آب به طرف زمین نشارش کند؟ چرا وقتی یک جسم را به بالا پرتاب می‌کنیم پس از مدتی به پایین می‌افتد؟

منشأ نیروی مرکزگرایی که سبب چرخش ماه به‌دور زمین می‌شود چیست؟ زمین به همراه هفت سیارهٔ دیگر نیز به دور خورشید می‌چرخند؛ منشأ نیروی مرکزگرای وارد بر زمین و سیارات دیگر چیست؟

شکل ۲ــ۳۴ اگر بر ماه نیرویی وارد نشود ماه باید به‌طور مستقیم حرکت کند نه به صورت دایره‌ای

پاسخ تمرین ۲ــ۱۰

هدف از این تمرین ارائهٔ یک مثال کاربردی در دور زدن خودروها در پیچ‌های مسطح و افقی یا میدان‌های درون شهری است. دراین نوع مثال‌ها نیروی مرکزگرا را نیروی اصطکاک ایستایی بین لاستیک‌ها و جاده که عمود بر راستای حرکت است، تأمین می‌کند. اگر این نیرو که باعث شتاب مرکزگرا می‌شود به‌طور ناگهانی از بین برود، خودرو در امتداد خط مماس بر حرکت دایره‌ای به پیش می‌رفت و از مرکز میدان دور می‌شد.

پاسخ: در حالت کلی:

$$F_{net} = ma \rightarrow f_s = m\frac{v^2}{r}$$

برای حالتی که f_s بیشینه است و خودرو با تندی حداکثر می‌تواند حرکت کند:

$$f_{s,\max} = m\frac{v_{\max}^2}{r},\ f_{s,\max} = \mu_s F_N = \mu_s mg$$

$$\mu_s mg = m\frac{v_{\max}^2}{r} \rightarrow v_{\max} = \sqrt{\mu_s rg} = \sqrt{(1/0)(50/0\,\text{m})(10\,\text{m/s}^2)} = 10\sqrt{5}\,\text{m/s} \simeq 22\,\text{m/s} = 81\,\text{km/h}$$

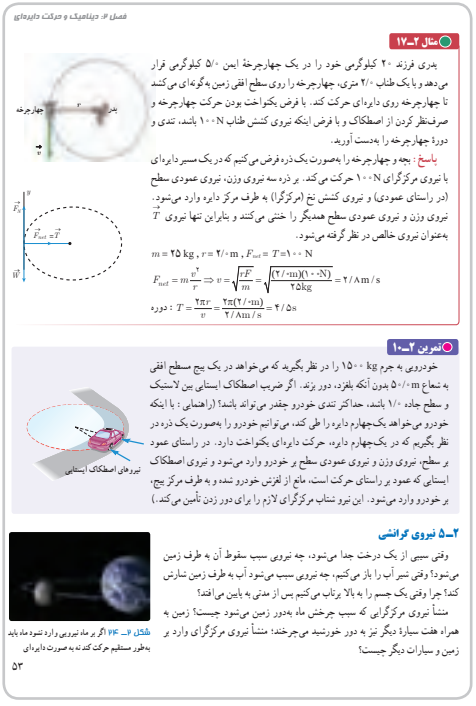
توجه داریم μ_s داده شده برای لاستیک و سطح (آسفالت استاندارد باشد) برای حالت خشک در نظر گرفته شده است به‌طوری که خودرو می‌تواند با تندی نسبتاً زیاد از پیچ عبور کند. اگر جاده مرطوب یا یخ‌زده باشد، مقدار μ_s می‌تواند ۰/۲ یا کمتر شود. در این شرایط نیروی مرکزگرای ناشی از اصطکاک ایستایی برای نگه داشتن خودرو در مسیر دایره‌ای به اندازهٔ کافی بزرگ نیست و ممکن است خودرو روی خط مماس بر مسیر دایره‌ای سُر بخورد و از جاده خارج شود.

تمرین پیشنهادی

تمرین ۲ـ۱۰ را برای حالتی که پیچ جاده مرطوب بوده و ضریب اصطکاک ۰/۲۳۰ است، حل کنید.

۲ـ ۵ نیروی گرانشی

محتوای بخش نیروی گرانش به‌گونه‌ای تنظیم شده که برای دانش‌آموزان این سؤال پیش بیاید که چه نیرویی سبب چرخش ماه به دور زمین (در یک مدار تقریباً دایره‌ای) می‌شود؟ یا زمین و سیارات دیگر تحت تأثیر چه نیرویی به دور خورشید می‌چرخند؟ شاهکار نیوتون این بود که تشخیص داد همان نیرویی که سبب چرخش ماه به دور زمین می‌شود (نیروی گرانش بین زمین و ماه) سبب سقوط یک سیب به طرف زمین می‌گردد (نیروی گرانش بین زمین و سیب). پس از آموزش این بخش باید دانش‌آموزان بتوانند به سؤالات مطرح شده در صفحهٔ ابتدایی فصل ۲ پاسخ دهند. یعنی به «آیا می‌دانید ماهواره‌ها تحت تأثیر چه نیرویی در مدار خود باقی می‌مانند و اگر این نیرو وجود نداشته باشد حرکت آنها چگونه خواهد شد؟»



فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

مثال ۲ـ۱۷

پدری فرزند ۲۰ کیلوگرمی خود را در یک چهارچرخهٔ ۵/۰ کیلوگرمی قرار می‌دهد و با یک طناب ۲/۰ متری، چهارچرخه را روی سطح افقی زمین به‌گونه‌ای می‌کشد تا چهارچرخه روی دایره‌ای حرکت کند. با فرض یکنواخت بودن حرکت چهارچرخه و صرف‌نظر کردن از اصطکاک و با فرض اینکه نیروی کشش طناب ۱۰۰N باشد، تندی و دورهٔ چهارچرخه را به‌دست آورید.

پاسخ : بچه و چهارچرخه را به‌صورت یک ذره فرض می‌کنیم که در یک مسیر دایره‌ای با نیروی مرکزگرای ۱۰۰N حرکت می‌کند. بر ذره سه نیروی وزن، نیروی عمودی سطح (در راستای عمودی) و نیروی کشش نخ (مرکزگرا) به طرف مرکز دایره وارد می‌شود. نیروی وزن و نیروی عمودی سطح همدیگر را خنثی می‌کنند و بنابراین تنها نیروی $\vec{T}$ به‌عنوان نیروی خالص در نظر گرفته می‌شود.

$$m = 25\,kg\,,\ r = 2/0\,m\,,\ F_{net} = T = 100\,N$$

$$F_{net} = m\frac{v^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{rF}{m}} = \sqrt{\frac{(2/0\,m)(100\,N)}{25kg}} = 2/4\,m/s$$

دوره : $T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi(2/0\,m)}{2/4\,m/s} = 4/5\,s$

تمرین ۲ـ۱۰

خودرویی به جرم ۱۵۰۰ kg را در نظر بگیرید که می‌خواهد در یک پیچ سطح افقی به شعاع ۵۰/۰m بدون آنکه بلغزد، دور بزند. اگر ضریب اصطکاک ایستایی بین لاستیک و سطح جاده ۱/۰ باشد، حداکثر تندی خودرو چقدر می‌تواند باشد؟ (راهنمایی : با اینکه خودرو می‌خواهد یک‌چهارم دایره را طی کند، می‌توانیم خودرو را به‌صورت یک ذره در نظر بگیریم که در یک‌چهارم دایره، حرکت دایره‌ای یکنواخت دارد. در راستای عمود بر سطح، نیروی وزن و نیروی عمودی سطح بر خودرو وارد می‌شود و نیروی اصطکاک ایستایی که عمود بر راستای حرکت است، مانع از لغزش خودرو شده و به طرف مرکز پیچ، بر خودرو وارد می‌شود. این نیرو شتاب مرکزگرای لازم را برای دور زدن تأمین می‌کند.)

نیروهای اصطکاک ایستایی

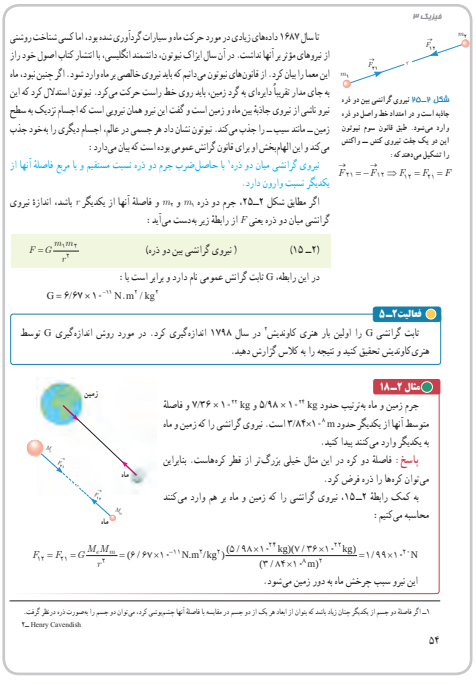
۲ـ۵ نیروی گرانشی

وقتی سیبی از یک درخت جدا می‌شود، چه نیرویی سبب سقوط آن به طرف زمین می‌شود؟ وقتی نیر آب را بالا می‌کنیم، چه نیرویی سبب می‌شود آب به طرف زمین نشارش کند؟ چرا وقتی یک جسم را به بالا پرتاب می‌کنیم پس از مدتی به پایین می‌افتد؟

منشأ نیروی مرکزگرایی که سبب چرخش ماه به‌دور زمین می‌شود چیست؟ زمین به همراه هفت سیارهٔ دیگر نیز به دور خورشید می‌چرخند؛ منشأ نیروی مرکزگرای وارد بر زمین و سیارات دیگر چیست؟

شکل ۲ـ ۱۴ اگر بر ماه نیرویی وارد نشود ماه باید به‌طور مستقیم حرکت کند نه به صورت دایره‌ای

بسیاری از دانش‌آموزان ممکن است به هم‌اندازه بودن نیروی کنش و واکنش توجه نکنند. در اینجا می‌توانیم با مثال‌هایی که جرم‌های دو جسم متفاوت‌اند و رسم نیروهای کنش و واکنش این کج‌فهمی‌ها را برطرف کرد.



فیزیک ۳

شکل ۲ـ۲۵ نیروی گرانشی بین دو ذره، جاده است و در امتداد خط واصل دو ذره، وارد می‌شود. طبق قانون سوم نیوتون در هر یک جفت نیروی کنش ـ واکنشی را تشکیل می‌دهند که :

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12} \Rightarrow F_{12} = F_{21} = F$$

تا سال ۱۶۸۷ داده‌های زیادی در مورد حرکت ماه و سیارات گردآوری شده بود، اما کسی نشناخت روشنی از نیروهای مؤثر بر آنها نداشت. در آن سال ایزاک نیوتون، دانشمند انگلیسی، با انتشار کتاب اصول خود راز این معما را بیان کرد. از قانون‌های نیوتون می‌دانیم که باید نیروی خالصی بر ماه وارد شود. اگر چنین نبود، ماه به جای مدار تقریباً دایره‌ای به گرد زمین، باید روی خط راست حرکت می‌کرد. نیوتون استدلال کرد که این نیرو ناشی از نیروی جاذبهٔ بین ماه و زمین است و گفت این نیرو همان نیرویی است که اجسام نزدیک به سطح زمین ـ مانند سیب ـ را جذب می‌کند. نیوتون نشان داد هر جسمی در عالم، اجسام دیگری را به‌خود جذب می‌کند و این الهام‌بخش او برای قانون گرانش عمومی بوده است که بیان می‌دارد :

نیروی گرانشی میان دو ذره[1] با حاصل‌ضرب جرم دو ذره نسبت مستقیم و با مربع فاصلهٔ آنها از یکدیگر نسبت وارون دارد.

اگر مطابق شکل ۲ـ۲۵، جرم دو ذره m_1 و m_2 و فاصلهٔ آنها از یکدیگر r باشد، اندازهٔ نیروی گرانشی میان دو ذره یعنی F از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad (\text{نیروی گرانشی بین دو ذره}) \qquad (۲ـ۱۵)$$

در این رابطه، G ثابت گرانش عمومی نام دارد و برابر است با :

$$G = 6/67 \times 10^{-11}\ N.m^2/kg^2$$

فعالیت ۲ـ۵

ثابت گرانشی G را اولین بار هنری کاوندیش[2] در سال ۱۷۹۸ اندازه‌گیری کرد. در مورد روش اندازه‌گیری G توسط هنری کاوندیش تحقیق کنید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

مثال ۲ـ۱۸

جرم زمین و ماه به‌ترتیب حدود $5/98 \times 10^{24}\,kg$ و $7/36 \times 10^{22}\,kg$ و فاصلهٔ متوسط آنها از یکدیگر حدود $3/84 \times 10^{8}\,m$ است. نیروی گرانشی را که زمین و ماه به یکدیگر وارد می‌کنند پیدا کنید.

پاسخ : فاصلهٔ دو کره در این مثال خیلی بزرگ‌تر از قطر کره‌هاست. بنابراین می‌توان کره‌ها را ذره فرض کرد.

به کمک رابطهٔ ۲ـ۱۵، نیروی گرانشی را که زمین و ماه بر هم وارد می‌کنند محاسبه می‌کنیم :

$$F_{12} = F_{21} = G\frac{M_e M_m}{r^2} = (6/67 \times 10^{-11}\,N.m^2/kg^2)\frac{(5/98 \times 10^{24}\,kg)(7/36 \times 10^{22}\,kg)}{(3/84 \times 10^{8}\,m)^2} = 1/99 \times 10^{20}\,N$$

این نیرو سبب چرخش ماه به دور زمین می‌شود.

۱ـ اگر فاصلهٔ دو جسم از یکدیگر چنان زیاد باشد که بتوان از ابعاد هر یک از دو جسم در مقایسه با فاصلهٔ آنها چشم‌پوشی کرد، می‌توان دو جسم را به‌صورت ذره در نظر گرفت.

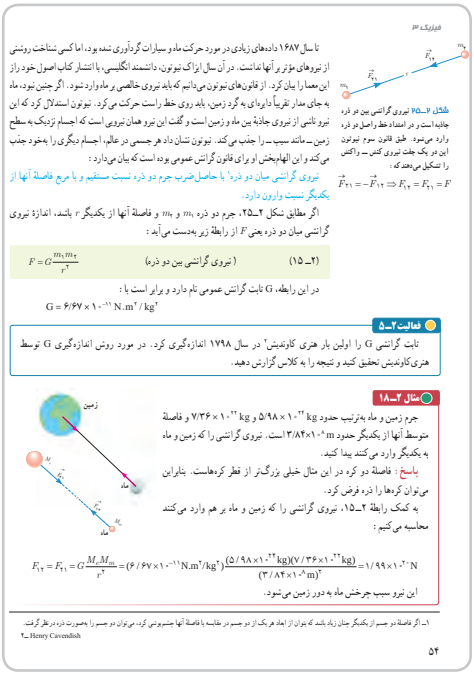
۲ـ Henry Cavendish

پاسخ فعالیت ۲ـ۵

انتظار می‌رود دانش‌آموزان در مورد ثابت گرانشی (G) تحقیق کرده و به‌صورت پاورپوینت به کلاس ارائه دهند. از نتیجهٔ این تحقیق نمی‌توان در آزمون‌های رسمی سؤالی مطرح کرد. اما خود تحقیق و ارائه آن به عنوان بخشی از نمرهٔ مستمر در نظر گرفته شود.

مثال ۲ــ۱۸

با حل این مثال دانش‌آموز متوجه می‌شود، با اینکه فاصلهٔ ماه از زمین نسبتاً زیاد است اما نیروی گرانشی همچنان بزرگ بوده و سبب چرخش ماه به دور زمین می‌شود (البته زمین و ماه بر اثر نیروی گرانش وارد بر یکدیگر حول مرکز جرم زمین و ماه که تقریباً در فاصلهٔ سه‌چهارم از مرکز زمین قرار دارد می‌چرخند). نکتهٔ دیگری که در این مثال باید به آن توجه کرد این است که؛ فاصلهٔ دو کره در این مثال خیلی بزرگ‌تراز قطر کره‌هاست. بنابراین می‌توان کره‌ها را به‌صورت دو ذره فرض کرد که جرم آنها در مرکز کره‌ها قرار دارند.



فیزیک ۳

تا سال ۱۶۸۷ داده‌های زیادی در مورد حرکت ماه و سیارات گردآوری شده بود، اما کسی شناخت روشنی از نیروهای مؤثر بر آنها نداشت. در آن سال اسحاق نیوتون، دانشمند انگلیسی، با انتشار کتاب اصول خود راز این معما را بیان کرد. از قانون‌های نیوتون می‌دانیم که باید نیروی خالصی بر ماه وارد شود. اگر چنین نبود، ماه به جای مدار تقریباً دایره‌ای به گرد زمین، باید روی خط راست حرکت می‌کرد. نیوتون استدلال کرد که این نیرو ناشی از نیروی جاذبهٔ بین ماه و زمین است و گفت این نیرو همان نیرویی است که اجسام نزدیک به سطح زمین ــ مانند سیب ــ را جذب می‌کند. نیوتون نشان داد هر جسمی در عالم، اجسام دیگری را به‌خود جذب می‌کند و این الهام‌بخش او برای قانون گرانش عمومی بوده است که بیان می‌دارد :

نیروی گرانشی میان دو ذره[۱] با حاصل‌ضرب جرم دو ذره نسبت مستقیم و با مربع فاصلهٔ آنها از یکدیگر نسبت وارون دارد.

اگر مطابق شکل ۲ــ۱۵، جرم دو ذره m_1 و m_2 و فاصلهٔ آنها از یکدیگر r باشد، اندازهٔ نیروی گرانشی میان دو ذره یعنی F از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad \text{(نیروی گرانشی بین دو ذره)} \qquad (۲ــ۱۵)$$

در این رابطه، G ثابت گرانش عمومی نام دارد و برابر است با :

$$G = ۶/۶۷ \times ۱۰^{-۱۱}\ \mathrm{N.m^۲/kg^۲}$$

فعالیت ۲ــ۵

ثابت گرانشی G را اولین بار هنری کاوندیش[۲] در سال ۱۷۹۸ اندازه‌گیری کرد. در مورد روش اندازه‌گیری G توسط هنری‌کاوندیش تحقیق کنید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

مثال ۲ــ۱۸

جرم زمین و ماه به‌ترتیب حدود $۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴}\ \mathrm{kg}$ و $۷/۳۶ \times ۱۰^{۲۲}\ \mathrm{kg}$ و فاصلهٔ متوسط آنها از یکدیگر حدود $۳/۸۴ \times ۱۰^{۸}\ \mathrm{m}$ است. نیروی گرانشی را که زمین و ماه به یکدیگر وارد می‌کنند پیدا کنید.

پاسخ : فاصلهٔ دو کره در این مثال خیلی بزرگ‌تر از قطر کره‌هاست. بنابراین می‌توان کره‌ها را ذره فرض کرد.

به کمک رابطهٔ ۲ــ۱۵، نیروی گرانشی را که زمین و ماه بر هم وارد می‌کنند محاسبه می‌کنیم :

$$F_{۱۲} = F_{۲۱} = G\frac{M_z M_m}{r^2} = (۶/۶۷ \times ۱۰^{-۱۱}\ \mathrm{N.m^۲/kg^۲})\frac{(۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴}\ \mathrm{kg})(۷/۳۶ \times ۱۰^{۲۲}\ \mathrm{kg})}{(۳/۸۴ \times ۱۰^{۸}\ \mathrm{m})^۲} = ۱/۹۹ \times ۱۰^{۲۰}\ \mathrm{N}$$

این نیرو سبب چرخش ماه به دور زمین می‌شود.

۱ــ اگر فاصلهٔ دو جسم از یکدیگر چنان زیاد باشد که بتوان از ابعاد هر یک از دو جسم در مقایسه با فاصلهٔ آنها چشم‌پوشی کرد، می‌توان دو جسم را به‌صورت ذره در نظر گرفت.

۲ــ Henry Cavendish

مثال ۲ــ۱۹

هدف از ارائه این مثال آن است که :

۱ــ دانش‌آموزان متوجه شوند نیروی گرانشی بین دو جسم معمولی (یعنی دو جسمی که جرم آنها خیلی زیاد نیست) ناچیز بوده و به همین دلیل در مسائل دینامیک این نیرو درنظر گرفته نمی‌شود. مثلاً یک فرد کنار یک خودرو ایستاده است، نیروی گرانشی بین شخص و خودرو محاسبه نمی‌شود.

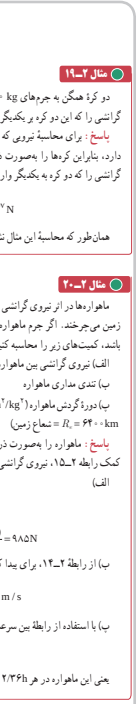
۲ــ وقتی کره‌ها همگن باشند؛ حتی اگر فاصلهٔ آنها زیاد هم نباشد، می‌توان جرم کل کره را در مرکز آن درنظر گرفت و از رابطه نیروی گرانشی بین دو ذره را محاسبه کرد.

مثال ۲ــ۲۰

مثال مهمی است که در آن دانش‌آموزان متوجه می‌شوند :

۱ــ نیروی مرکزگرای لازم برای چرخش ماهواره به دور زمین را نیروی گرانشی بین ماهواره و زمین تأمین می‌کند.

۲ــ با دانستن فاصلهٔ ماهواره از زمین، می‌توان تندی ماهواره،



فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

مثال ۲ــ۱۹

دو کرهٔ همگن به جرم‌های $۸۰/۰\ \mathrm{kg}$ و $۱۲۰/۰\ \mathrm{kg}$ را درنظر بگیرید که فاصلهٔ مرکز آنها از یکدیگر $۱/۰۰\ \mathrm{m}$ است. نیروی گرانشی را که این دو کره بر یکدیگر وارد می‌کنند محاسبه کنید.

پاسخ : برای محاسبهٔ نیروی که دو کرهٔ همگن به‌هم وارد می‌کنند می‌توانیم فرض کنیم همهٔ جرم‌های دو کره در مرکز آنها قرار دارد، بنابراین کره‌ها را به‌صورت ذراتی در نظر می‌گیریم که همان جرم کره‌ها را داشته باشند. به کمک رابطهٔ ۲ــ۱۵، نیروی گرانشی را که دو کره به یکدیگر وارد می‌کنند محاسبه می‌کنیم :

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} = (۶/۶۷ \times ۱۰^{-۱۱}\ \mathrm{N.m^۲/kg^۲})\frac{(۸۰/۰\ \mathrm{kg})(۱۲۰/۰\ \mathrm{kg})}{(۱/۰۰\ \mathrm{m})^۲} = ۶/۴۰ \times ۱۰^{-۹}\ \mathrm{N}$$

همان‌طور که محاسبهٔ این مثال نشان می‌دهد، نیروی گرانشی میان جسم‌های با جرم کوچک قابل ملاحظه نیست.

مثال ۲ــ۲۰

ماهواره‌ها در اثر نیروی گرانشی بین زمین و ماهواره، روی مدار تقریباً دایره‌ای به دور زمین می‌چرخند. اگر جرم ماهواره $۲۰۰/۰\ \mathrm{kg}$ و فاصلهٔ آن از سطح زمین $۲۶۰۰\ \mathrm{km}$ باشد، کمیت‌های زیر را محاسبه کنید :

الف) نیروی گرانشی بین ماهواره و زمین

ب) تندی مداری ماهواره

ب) دورهٔ گردش ماهواره ($M_z = ۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴}\ \mathrm{kg}$ ، $G = ۶/۶۷ \times ۱۰^{-۱۱}\ \mathrm{N.m^۲/kg^۲}$ ، $R_z = ۶۴۰۰\ \mathrm{km}$ شعاع زمین)

پاسخ : ماهواره را به‌صورت ذره و زمین را به‌صورت کره‌ای همگن که جرم آن در مرکزش قرار دارد در نظر می‌گیریم و به کمک رابطه ۲ــ۱۵، نیروی گرانشی بین آنها را محاسبه می‌کنیم.

الف)

$$r = R_z + h = ۶۴۰۰\ \mathrm{km} + ۲۶۰۰\ \mathrm{km} = ۹۰۰۰\ \mathrm{km} = ۹/۰۰۰ \times ۱۰^{۶}\ \mathrm{m}$$

$$F = G\frac{M_z m}{r^2} = (۶/۶۷ \times ۱۰^{-۱۱}\ \mathrm{N.m^۲/kg^۲})\frac{(۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴}\ \mathrm{kg})(۲۰۰/۰\ \mathrm{kg})}{(۹/۰۰۰ \times ۱۰^{۶}\ \mathrm{m})^۲} = ۹۸۵\ \mathrm{N}$$

ب) از رابطهٔ ۲ــ۱۴، برای پیدا کردن تندی ماهواره استفاده می‌کنیم :

$$F_{net} = m\frac{v^۲}{r} \Rightarrow ۹۸۵\ \mathrm{N} = (۲۰۰/۰\ \mathrm{kg})\frac{v^۲}{۹/۰۰۰ \times ۱۰^{۶}\ \mathrm{m}} \Rightarrow v = ۶/۶۶ \times ۱۰^{۳}\ \mathrm{m/s}$$

ب) با استفاده از رابطهٔ بین سرعت و دوره یعنی رابطهٔ ۲ــ۱۲، می‌توانیم دوره را محاسبه کنیم :

$$T = \frac{۲\pi r}{v} = \frac{۲(۳/۱۴\ \mathrm{rad})(۹/۰۰۰ \times ۱۰^{۶}\ \mathrm{m})}{۶/۶۶ \times ۱۰^{۳}\ \mathrm{m/s}} = ۸/۴۹ \times ۱۰^{۳}\ \mathrm{s} = ۲/۳۶\ \mathrm{h}$$

یعنی این ماهواره در هر ۲/۳۶h یک بار به دور زمین می‌چرخد.

دوره ماهواره و شتاب مرکزگرای ماهواره را محاسبه کرد.

۳ــ با اینکه وزن ماهواره در این فاصله نسبتاً کم است (وزن ماهواره در سطح زمین حدود ۱۹۶۰N و در این فاصله ۹۸۵N است) امّا همین نیروی کم، نیروی لازم برای گردش ماهواره روی مدار را تأمین می‌کند.

پاسخ تمرین ۲ــ۱۱

هدف از ارائه این تمرین آشنایی دانش‌آموزان با مهم‌ترین مدار ماهواره‌ای است. توضیح و کارکرد این مدار در خود تمرین آمده است. این مدار آن قدر مهم است که با هماهنگی سازمان ملل برای هر کشوری سهمیه‌ای برای استفاده و قرار دادن ماهواره درنظر گرفته شده است.

الف)

$$F = m\frac{v^2}{} \rightarrow G\frac{M_e m}{r^2} = m\frac{{}^2 r}{T^2} \rightarrow$$

$$r^3 = \frac{GM_eT^2}{4\pi^2} \rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{GM_eT^2}{4\pi^2}}$$

$$= \sqrt[3]{\frac{(6/67\times10^{-11}\,\mathrm{N.m^2/kg^2})(5/98\times10^{24}\,\mathrm{kg})(86400\,\mathrm{s})^2}{4(3/14)^2}}$$

$$= 10^5\sqrt[3]{75497/5974}\ \ \mathrm{m} \simeq 4/23\times10^7\,\mathrm{m}$$

ب)

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\pi(4/23\times10^7\,\mathrm{m})}{86400\,\mathrm{s}} = 3/08\times10^3\,\mathrm{m/s}$$

فیزیک ۳

تمرین ۲ــ۱۱

مدار همگام با زمین[1] و ماهواره‌های مخابراتی: از دیدگاه مخابراتی، باقی ماندن ماهواره در یک محل نسبت به مکانی در روی زمین (مثلاً بالای ایران) امتیاز محسوب می‌شود. این در صورتی رخ می‌دهد که دورهٔ گردش ماهواره به دور زمین با مدت زمان یک دور چرخش زمین به دور خودش، یعنی ۲۴/۰ h یکسان باشد.

الف) در چه فاصله‌ای از زمین می‌توان این مدار همگام با زمین را یافت؟

ب) تندی مداری این ماهواره چقدر است؟

پرسش ۲ــ۱۱

نشان دهید مربع دورهٔ گردش ماهواره‌ها به دور زمین متناسب با مکعب فاصلهٔ ماهواره از مرکز زمین است.

وزن و نیروی گرانشی: در بخش ۲ــ۲، در مورد وزن یک جسم مطالبی را آموختیم. در آنجا گفتیم وزن یک جسم روی زمین برابر با نیروی گرانشی است که زمین بر جسم وارد می‌کند (شکل ۲ــ۲۶). اگر جرم جسم را با m، جرم زمین را با M_e و شعاع زمین را با R_e نمایش دهیم، وزن جسم روی سطح زمین از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$W = G\frac{M_e m}{R_e^2} \qquad \text{(وزن جسم در سطح زمین)} \qquad (۱۶ــ۲)$$

شکل ۲ــ۲۶ وزن نیروی گرانشی است که زمین بر جسم وارد می‌کند

تمرین ۲ــ۱۲

نشان دهید شتاب گرانشی روی زمین برابر است با : $g = G\frac{M_e}{R_e^2}$

تمرین ۲ــ۱۳

تلسکوپ فضایی هابل با تندی ۷۵۶۰ m/s گرد زمین می‌چرخد.

الف) فاصلهٔ این تلسکوپ از سطح زمین چند کیلومتر است؟

ب) وزن این تلسکوپ در این ارتفاع چند برابر وزن آن روی زمین است؟

ب) دورهٔ تناوب این تلسکوپ را پیدا کنید. (R_e=۶۳۸۰ km)

۱ــ Orbital of Synchronous Satellites

۵۶

پاسخ پرسش ۲ــ۱۱

متناسب بودن T^2 با r^3 قانون سوم کپلر است که به کمک قانون گرانش نیوتون به سادگی به‌دست می‌آید :

$$F = m\frac{v^2}{r} = m\frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

$$G\frac{M_e m}{r^2} = m\frac{4\pi^2 r}{T^2} \rightarrow 4\pi^2 r^3 = GM_eT^2 \rightarrow T^2 \alpha\, r^3$$

وزن و نیروی گرانشی

به کمک رابطهٔ نیروی گرانشی می‌توانیم وزن یک جسم را در هر فاصله‌ای از مرکز زمین به‌دست آوریم. مثلاً وزن یک جسم به جرم m در ارتفاع h از سطح زمین از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود :

$$W = G\frac{M_e m}{(R_e + h)^2}$$

پاسخ تمرین ۲ــ۱۲

به کمک رابطهٔ وزن داده شده، شتاب گرانشی را می‌توان در ارتفاع h از سطح زمین یا در سطح زمین به‌دست آورد :

$$W = mg \rightarrow G\frac{M_e m}{(R_e + h)^۲} = mg \rightarrow g = \frac{GM_e}{(R_e + h)^۲}$$

اگر $h = ۰ \rightarrow g = \frac{GM_e}{R_e^۲}$

تمرین ۲ــ۱۱

مدار هنگام با زمین[۱] و ماهواره‌های مخابراتی : از دیدگاه مخابراتی، باقی ماندن ماهواره در یک محل نسبت به مکانی در روی زمین (مثلاً بالای ایران) امتیاز محسوب می‌شود . این در صورتی رخ می‌دهد که دورهٔ گردش ماهواره به دور زمین با مدت زمان یک دور چرخش زمین به دور خودش، یعنی ۲۴/۰ h یکسان باشد .

الف) در چه فاصله‌ای از زمین می‌توان این مدار هنگام با زمین را یافت؟

ب) تندی مداری این ماهواره چقدر است؟

پرسش ۲ــ۱۱

نشان دهید مربع دورهٔ گردش ماهواره‌ها به دور زمین متناسب با مکعب فاصلهٔ ماهواره از مرکز زمین است.

وزن و نیروی گرانشی : در بخش ۲ــ۲، در مورد وزن یک جسم مطالبی را آموختیم. در آنجا گفتیم وزن یک جسم روی زمین برابر با نیروی گرانشی است که زمین بر جسم وارد می‌کند (شکل ۲ــ۲۶). اگر جرم جسم را با m، جرم زمین را با M_e و شعاع زمین را با R_e نمایش دهیم، وزن جسم روی سطح زمین از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$W = G\frac{M_e m}{R_e^۲} \qquad (۲ــ۱۶) \quad \text{(وزن جسم در سطح زمین)}$$

شکل ۲ــ۲۶ وزن نیروی گرانشی است که زمین بر جسم وارد می‌کند.

تمرین ۲ــ۱۲

نشان دهید شتاب گرانشی روی زمین برابر است با : $g = G\frac{M_e}{R_e^۲}$

تمرین ۲ــ۱۳

تلسکوپ فضایی هابل با تندی ۷۵۶۰ m/s گرد زمین می‌چرخد.

الف) فاصلهٔ این تلسکوپ از سطح زمین چند کیلومتر است؟

ب) وزن این تلسکوپ در این ارتفاع چند برابر وزن آن روی زمین است؟

پ) دورهٔ تناوب این تلسکوپ را پیدا کنید. $(R_e = ۶۳۸۰\ \text{km})$

۱ــ Orbital of Synchronous Satellites

پاسخ تمرین ۲ــ۱۳ : الف)

$$F = m\frac{v^۲}{r} \rightarrow G\frac{M_e m}{r^۲} = \frac{mv^۲}{r} \rightarrow v^۲ = \frac{GM_e}{r} \rightarrow r = \frac{GM_e}{v^۲} \rightarrow$$

$$r = \frac{(۶/۶۷\times ۱۰^{-۱۱}\ \text{N.m}^۲/\text{kg}^۲)(۵/۹۸\times ۱۰^{۲۴}\ \text{kg})}{(۷۵۶۰\ \text{m/s})^۲} = ۶۹۸\times ۱۰^{۴}\ \text{m} = ۶/۹۸\times ۱۰^{۳}\ \text{km}$$

$$r = R_e + h \rightarrow h = r - R_e = ۶/۹۸\times ۱۰^{۳}\ \text{km} - ۶۴۰۰\ \text{km}$$

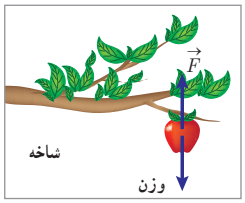
$$h = ۵۸۰\ \text{km}$$

ب)
$$\frac{W}{W_۰} = \frac{\text{Re}^۲}{(R_e + h)^۲} = \left(\frac{۶۳۸۰\ \text{km}}{۶۹۸۰\ \text{km}}\right)^۲ = ۰/۸۳۵$$

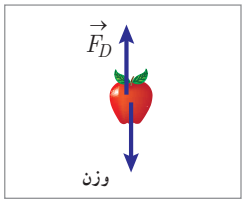
پ)
$$T = \frac{۲\pi r}{v} = \frac{۲\times ۳/۱۴\times ۶/۹۸\times ۱۰^{۳}\times ۱۰^{۳}\ \text{m}}{۷۵۶۰\ \text{m/s}} = ۵/۸\times ۱۰^{۳}\ \text{s} = ۱/۶\ \text{h}$$

راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

۱ الف) وقتی سیب به شاخه آویزان است، نیرویی از طرف شاخه به طرف بالا به سیب وارد می‌شود و نیروی وزن که از طرف زمین به سیب وارد می‌شود به طرف پایین است. در این حالت این دو نیرو هم اندازه بوده و متوازن‌اند. وقتی سیب از درخت جدا می‌شود و در حال سقوط کردن است، نیروی وزن به طرف پایین و نیروی مقاومت هوا به طرف بالا بر سیب وارد می‌شود.



ب) در حالتی که سیب به درخت آویزان است : واکنش نیروی شاخه $\vec{F}$ نیرویی است که از طرف سیب به شاخه وارد می‌شود و شاخه را به طرف پایین می‌کشد ($\vec{F}'_{\text{شاخه}}$).



واکنش وزن سیب، نیروی گرانشی است که از طرف سیب به زمین وارد شده و آن را به طرف بالا می‌کشد ($\vec{W}'$).

در حالتی که سیب در حال سقوط کردن است :

واکنش نیروی $\vec{f}_D$ نیرویی است که از طرف سیب به هوا به طرف پایین وارد می‌شود ($\vec{f}'_D$). واکنش وزن سیب، نیروی گرانشی است که از طرف سیب به زمین وارد شده و آن را به طرف بالا می‌کشد ($\vec{W}'$).

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

۲ـ۱ و ۲ـ۲ قوانین حرکت نیوتون و معرفی برخی از نیروهای خاص

۱. سیبی را در نظر بگیرید که به شاخهٔ درختی آویزان است و سیب از درخت جدا می‌شود.
الف) با رسم شکل نیروهای وارد بر سیب را قبل و بعد از جدا شدن از درخت نشان دهید. ب) در هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟

۲. دانش‌آموزی به جرم ۵۰/۰ kg روی یک ترازوی فنری در آسانسور ایستاده است. در هر یک از حالت‌های زیر این ترازو چند نیوتون را نشان می‌دهد؟ ($g=9/8\cdot N/kg$)
الف) آسانسور ساکن است.
ب) آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند.
پ) آسانسور با شتاب $1/2 m/s^2$ به طرف بالا شروع به حرکت می‌کند.
ت) آسانسور با شتاب $1/2 m/s^2$ به طرف پایین شروع به حرکت می‌کند.

۳. در شکل نشان داده شده، شخصی با نیروی ۲۰۰ N جسم ۹۰/۰ کیلوگرمی را هُل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی ۳۰۰ N جسم را هُل می‌دهد، جسم در آستانهٔ حرکت قرار می‌گیرد.

الف) نیروی اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح در هر حالت چقدر است؟
ب) ضریب اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح چقدر است؟
پ) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی ۲۰۰ N جسم را هُل دهد و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم ۰/۲۰ باشد، شتاب حرکت جسم چقدر خواهد شد؟

۴. در شکل روبه‌رو وقتی وزنهٔ ۲/۰ kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر ۱۲/۰ cm می‌شود، و وقتی وزنهٔ ۵/۰ kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر ۱۵/۰ cm می‌شود.

الف) ثابت فنر چقدر است؟ ب) طول عادی فنر (بدون وزنه) چند سانتی‌متر است؟

۵. در هر یک از موارد زیر، نیروهای وارد بر جسم را مشخص کنید. واکنش هر یک از این نیروها به چه جسمی وارد می‌شود؟
الف) خودرویی با سرعت ثابت در یک مسیر مستقیم افقی در حال حرکت است.
ب) کشتی‌ای با سرعت ثابت در حال حرکت است.
پ) قایقرانی در حال پارو زدن است.
ت) جت‌بازی در هوای آرام و در امتداد قائم در حال سقوط است.
ث) هواپیمایی در یک سطح پروازی افقی با سرعت ثابت در حال حرکت است.
ج) توپی در راستای قائم به زمین برخورد می‌کند و برمی‌گردد.

۶. راننده خودرویی که با سرعت ۷۲/۰ km/h در یک مسیر مستقیم در حال حرکت است، با دیدن مانعی اقدام به ترمز می‌کند و خودرو پس از طی مسافت ۲۰/۰ m متوقف می‌شود.
الف) شتاب خودرو در مدت ترمز چقدر است؟
ب) از لحظهٔ ترمز تا توقف کامل خودرو، چقدر طول می‌کشد؟
پ) نیروی اصطکاک بین لاستیک‌ها و سطح چقدر است؟
جرم خودرو را ۱۲۰۰ kg فرض کنید.

۷. جت‌بازی از یک بالگرد تقریباً ساکن که در ارتفاع نسبتاً زیادی قرار دارد، به بیرون می‌پرد و پس از مدتی چتر خود را باز می‌کند و در امتداد قائم سقوط می‌کند. حرکت جت‌باز را از لحظهٔ پرش تا رسیدن به زمین تحلیل کنید و نموداری تقریبی از تندی آن بر حسب زمان رسم کنید.

۵۷

۲ جهت محور را رو به بالا انتخاب می‌کنیم و نیروهای وارد بر شخص را تعیین و از قانون دوم برای حل مسئله استفاده می‌کنیم.

الف)

$$F_N - W = ma \rightarrow F_N = W + ma = mg + ma$$

$$a = 0$$

$$F_N = mg + 0 = (50/0\,kg)\,(9/8\,N/kg) = 490\,N$$

ب) وقتی آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند باز هم شتاب صفر است ($a = 0$)

$$F_N = mg + 0 = (50/0\,kg)\,(9/80\,N/kg) = 490\,N$$

پ)

$$a = +1/2\ m/s^2$$

$$F_N = mg + ma = (50/0\,kg)\,(9/80\,N/kg) + (50/0\,kg)\,(1/2\,m/s^2) = 550\,N$$

ت)

$$a = -1/2\ m/s^2$$

$$F_N = mg + ma = (50/0\,kg)\,(9/80\,N/kg) + (50/0\,kg)\,(-1/2\,m/s^2) = 430\,N$$

۳ الف) در هر دو حالت جسم ساکن است و نیروی اصطکاک ایستایی در خلاف جهت نیروی $\vec{F}$ بر جسم وارد می‌شود.

$$F_۱ = ۲۰۰\,\text{N}\ ,\ a = ۰\ ,\ v = ۰$$

$$F - f_s = ma \rightarrow f_s = F = ۲۰۰\ \text{N}$$

$$F_۲ = ۳۰۰\,\text{N}\ ,\ a = ۰\ ,\ v = ۰$$

$$F_۲ - f_{s\ ,\ max} = ma \rightarrow f_{s\ ,\ max} = F_۲ = ۳۰۰\ \text{N}$$

ب)

$$f_{s\ ,\ max} = \mu_s F_N\ ,\ F_N = mg \rightarrow ۳۰۰\,\text{N} = \mu_s\,(۹۰/۰\,\text{kg}) \times (۹/۸۰\,\text{N/kg})$$

$$\mu_s = \frac{۳۰۰N}{(۹۰/۰\text{kg})(۹/۸۰\text{N/kg})} = ۰/۳۴$$

پ)

$$f_k = \mu_k F_N = \mu_k\,(mg) = (۰/۲۰)\ (۹۰/۰\text{kg})\ (۹/۸۰\ \text{N/kg}) = ۱۷۶/۲\ \text{N}$$

جهت محور افقی را به طرف راست انتخاب می‌کنیم :

۴

$$F - f_k = ma \rightarrow a = \frac{F - f_k}{m} = \frac{۲۰۰\text{N} - ۱۷۶/۲\text{N}}{۹۰/۰\text{kg}} = ۰/۲۶\ \text{m/s}^۲$$

$$F_e - mg = ma\ ,\ a = ۰ \Rightarrow F_e = mg$$

$$F_e = kx\ ,\ x = l_۲ - l_۱ \Rightarrow k\,(l - l_۰) = mg$$

الف)

$$k\,(۱۴/۰\times ۱۰^{-۲}\,m - l_۰) = (۴/۰\text{kg})(۹/۸۰\text{N/kg})$$

$$k\,(۱۵/۰\times ۱۰^{-۲}\,m - l_۰) = (۵/۰\text{kg})(۹/۸۰\text{N/kg})$$

$$k\,(۱۵/۰\times ۱۰^{-۲}\,m - ۱۴/۰\times ۱۰^{-۲}\,m) = ۹/۸۰\text{N} \rightarrow k = ۹۸۰\text{N/m}$$

ب) مقدار به‌دست آمده را در یکی از روابط بالا قرار می‌دهیم :

$$(۹۸۰\text{N/m})\ (۱۴/۰ \times ۱۰^{-۲} - l_۰) = (۴/۰\text{kg})\ (۹/۸۰\text{N/kg})$$

$$l_۰ = ۱۰/۰ \times ۱۰^{-۲}\ m = ۱۰/۰\ \text{cm}$$

۵ الف) فرض می‌کنیم خودرو گیربکس جلو بوده، یعنی انتقال قدرت موتور به چرخ‌های جلو صورت می‌گیرد؛ در این صورت چرخ‌های جلو هنگام شروع به حرکت و در طول حرکت می‌خواهند روی زمین بچرخند. در نتیجه زمین را به طرف عقب هل می‌دهند (به علت برهم کنش بین لاستیک و سطح زمین نیروی اصطکاک ایستایی بین آنها به‌وجود می‌آید؛ $\vec{f}_s$)زمین نیز چرخ‌ها را به جلو هُل می‌دهد که به این نیرو، نیروی پیشران می‌گویند ($\vec{F}_{\text{پیشران}}$).

وقتی خودرو شروع به حرکت می‌کند نیروی مقاومت هوا به خودرو نیرویی در خلاف جهت حرکت نیروی $\vec{f}_s$ وارد می‌کند. خودرو نیز نیروی $\vec{f}'_D$ را به هوا و در خلاف جهت $\vec{f}_D$ وارد می‌کند. به لاستیک‌های عقب خودرو که به تبع حرکت خودرو می‌چرخند، نیروی اصطکاک در

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

۲ـ۱ و ۲ـ۲ قوانین حرکت نیوتون و معرفی برخی از نیروهای خاص

۱. سیبی را در نظر بگیرید که به شاخهٔ درختی آویزان است و سپس از درخت جدا می‌شود.
الف) با رسم شکل نیروهای وارد بر سیب را قبل و بعد از جداشدن از درخت نشان دهید. ب) در هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟

۲. دانش‌آموزی به جرم ۵۰/۰ kg روی یک ترازوی فنری در آسانسور ایستاده است. در هر یک از حالت‌های زیر این ترازو چند نیوتون را نشان می‌دهد؟ (g=۹/۸۰ N/kg)
الف) آسانسور ساکن است.
ب) آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند.
پ) آسانسور با شتاب ۱/۲ m/s^۲ به طرف بالا شروع به حرکت می‌کند.
ت) آسانسور با شتاب ۱/۲ m/s^۲ به طرف پایین شروع به حرکت می‌کند.

۳. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی ۲۰۰ N جسم ۹۰/۰ کیلوگرمی را هُل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی ۳۰۰ N جسم را هُل می‌دهد، جسم در آستانهٔ حرکت قرار می‌گیرد.

الف) نیروی اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح در هر حالت چقدر است؟
ب) ضریب اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح چقدر است؟
پ) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی ۲۰۰ N جسم را هُل دهد و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم ۰/۲۰ باشد، شتاب حرکت جسم چقدر خواهد شد؟

۴. در شکل روبه‌رو وقتی وزنهٔ ۴/۰ kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر ۱۴/۰ cm می‌شود، و وقتی وزنهٔ ۵/۰ kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر ۱۵/۰ cm می‌شود.
الف) ثابت فنر چقدر است؟ ب) طول عادی فنر (بدون وزنه) چند سانتی‌متر است؟

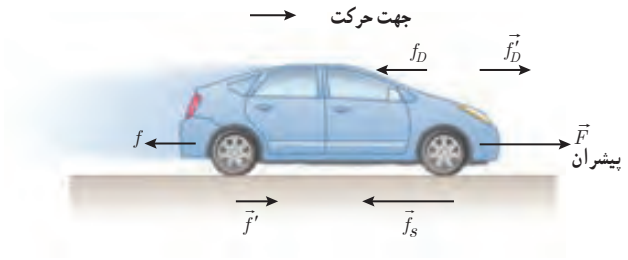
۵. در هر یک از موارد زیر، نیروهای وارد بر جسم را مشخص کنید. واکنش هر یک از این نیروها به چه جسمی وارد می‌شود؟
الف) خودرویی با سرعت ثابت در یک مسیر مستقیم افقی در حال حرکت است.
ب) کتنی‌ای با سرعت ثابت در حال حرکت است.
پ) قایقرانی در حال پارو زدن است.
ت) چتربازی در هوای آرام و در امتداد قائم در حال سقوط است.
ث) هواپیمایی در یک سطح پروازی افقی با سرعت ثابت در حال حرکت است.
ج) توپی در راستای قائم به زمین برخورد می‌کند و برمی‌گردد.

۶. راننده خودرویی که با سرعت ۷۲/۰ km/h در یک مسیر مستقیم در حال حرکت است، با دیدن مانعی اقدام به ترمز می‌کند و خودرو پس از طی مسافت ۲۰/۰ m متوقف می‌شود.
الف) شتاب خودرو در مدت ترمز چقدر است؟
ب) از لحظهٔ ترمز تا توقف کامل خودرو، چقدر طول می‌کشد؟
پ) نیروی اصطکاک بین لاستیک‌ها و سطح چقدر است؟
جرم خودرو را ۱۲۰۰ kg فرض کنید.

۷. چتربازی از یک بالگرد تقریباً ساکن که در ارتفاع نسبتاً زیادی قرار دارد، به بیرون می‌پرد و پس از مدتی چتر خود را باز می‌کند و در امتداد قائم سقوط می‌کند. حرکت چترباز را از لحظهٔ پرش تا رسیدن به زمین تحلیل کنید و نموداری تقریبی از تندی آن بر حسب زمان رسم کنید.

برخلاف جهت حرکت خودرو از طرف زمین وارد می‌شود ($\vec{f}$). لاستیک‌ها نیز نیرویی در خلاف جهت $\vec{f}$ به زمین وارد می‌کنند ($\vec{f'}$).

از طرف سطح زمین نیروی عمودی سطح $\vec{F_N}$ روبه بالا بر خودرو وارد می‌شود که واکنش آن از طرف خودرو به طرف پایین به سطح زمین وارد می‌شود. همچنین وزن خودرو از طرف زمین بر آن به طرف مرکز زمین وارد می‌شود ($\vec{W}$) و واکنش وزن از طرف خودرو به زمین رو به بالا وارد می‌شود ($\vec{W'}$).

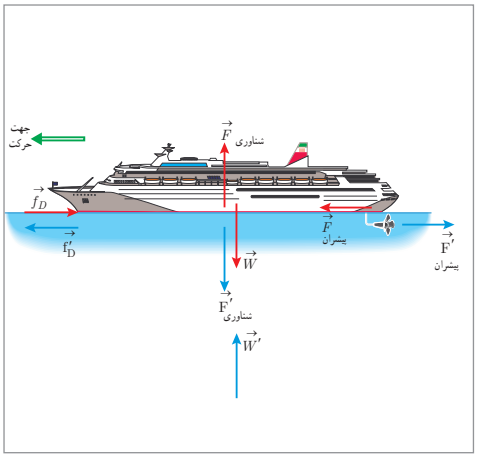


ب) $\vec{f_D}$:نیروی مقاومت شاره (آب) در خلاف جهت حرکت از طرف شاره بر کشتی وارد می‌شود.

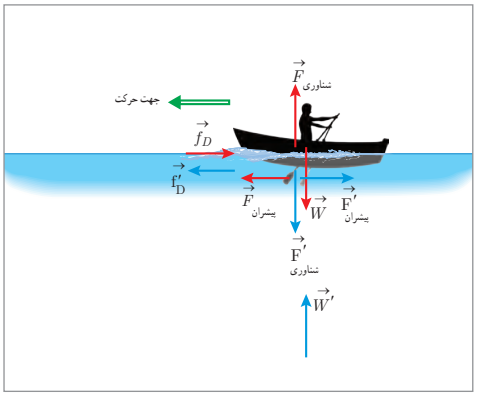
$\vec{F}$ شناوری : نیروی شناوری که از طرف شاره (آب) به طرف بالا بر کشتی وارد می‌شود.

$\vec{W}$: نیروی وزن که از طرف زمین به جسم به طرف پایین وارد می‌شود.

$\vec{F}$ پیشران : نیرویی که از طرف شاره به کشتی به طرف جلو وارد می‌شود. این نیرو به علت مثلاً چرخش پروانه‌ها و هُل دادن آب به طرف عقب حاصل می‌شود یعنی وقتی موتور کشتی سبب چرخش پره‌ها می‌شود، در چرخش پره‌ها، آب دریا به طرف عقب هُل داده می‌شود و آب نیز پره‌ها را به طرف جلو هُل می‌دهد که به این نیرو، نیروی پیشران می‌گوییم. واکنش این نیروها در شکل مشخص شده است. ضمناً از نیروی مقاومت هوا می‌توانیم صرف‌نظر کنیم.



پ) قایقران با پارو آب را به طرف عقب هُل می‌دهد، آب نیز به پارو نیرویی رو به جلو وارد می‌کند که می‌توانیم نام آن را نیروی پیشران ($F_{\text{پیشران}}$) بگذاریم. نیروی وزن، شناوری و نیروی مقاومت شاره نیروهای دیگری هستند که به قایق وارد می‌شوند. این نیروها و واکنش آنها روی شکل نشان داده شده است.



پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

۲ـ۱ و ۲ـ۲ قوانین حرکت نیوتون و معرفی برخی از نیروهای خاص

۱. سیبی را در نظر بگیرید که به شاخهٔ درختی آویزان است و سیبی از درخت جدا می‌شود.
الف) با رسم شکل نیروهای وارد بر سیب را قبل و بعد از جداشدن از درخت نشان دهید. ب) در هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟

۲. دانش‌آموزی به جرم ۵۰/۰ kg روی یک ترازوی فنری در آسانسور ایستاده است. در هر یک از حالت‌های زیر این ترازو چند نیوتون را نشان می‌دهد؟ ($g=9/8\frac{N}{kg}$)
الف) آسانسور ساکن است.
ب) آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند.
پ) آسانسور با شتاب $1/2\frac{m}{s^2}$ به طرف بالا شروع به حرکت می‌کند.
ت) آسانسور با شتاب $1/2\frac{m}{s^2}$ به طرف پایین شروع به حرکت می‌کند.

۳. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی ۲۰۰N جسم ۹۰/۰ کیلوگرمی را هُل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی ۳۰۰N جسم را هُل می‌دهد، جسم در آستانهٔ حرکت قرار می‌گیرد.

الف) نیروی اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح در هر حالت چقدر است؟
ب) ضریب اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح چقدر است؟
پ) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی ۲۰۰N جسم را هُل دهد و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم ۰/۲۰ باشد، شتاب حرکت جسم چقدر خواهد شد؟

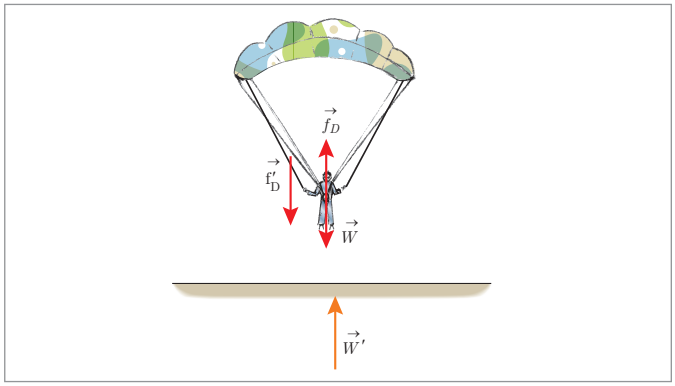
۴. در شکل روبه‌رو وقتی وزنهٔ ۴/۰ kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر ۱۲/۰ cm می‌شود، و وقتی وزنهٔ ۵/۰ kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر ۱۵/۰ cm می‌شود.
الف) ثابت فنر چقدر است؟ ب) طول عادی فنر (بدون وزنه) چند سانتی‌متر است؟

۵. در هر یک از موارد زیر، نیروهای وارد بر جسم را مشخص کنید. واکنش هر یک از این نیروها به چه جسمی وارد می‌شود؟
الف) خودرویی با سرعت ثابت در یک مسیر مستقیم افقی در حال حرکت است.
ب) کشتی‌ای با سرعت ثابت در حال حرکت است.
پ) قایقرانی در حال پارو زدن است.
ت) چتربازی در هوای آرام و در امتداد قائم در حال سقوط است.
ث) هواپیمایی در یک سطح پروازی افقی با سرعت ثابت در حال حرکت است.
ج) توپی در راستای قائم به زمین برخورد می‌کند و برمی‌گردد.

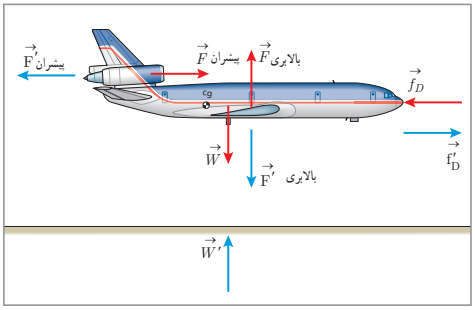
۶. راننده خودرویی که با سرعت ۷۲/۰ km/h در یک مسیر مستقیم در حال حرکت است، با دیدن مانعی اقدام به ترمز می‌کند و خودرو پس از طی مسافت ۲۰/۰ m متوقف می‌شود.
الف) شتاب خودرو در مدت ترمز چقدر است؟
ب) از لحظهٔ ترمز تا توقف کامل خودرو، چقدر طول می‌کند؟
پ) نیروی اصطکاک بین لاستیک‌ها و سطح چقدر است؟
جرم خودرو را ۱۲۰۰kg فرض کنید.

۷. چتربازی از یک بالگرد تقریباً ساکن که در ارتفاع نسبتاً زیادی قرار دارد، به بیرون می‌پرد و پس از مدتی چتر خود را باز می‌کند و در امتداد قائم سقوط می‌کند. حرکت چترباز را از لحظهٔ پرش تا رسیدن به زمین تحلیل کنید و نموداری تقریبی از تندی آن بر حسب زمان رسم کنید.

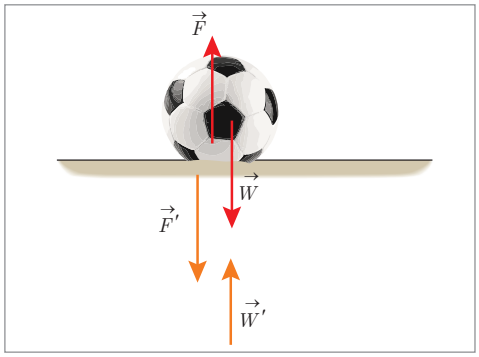
ت) بر چترباز (شخص و چتر) دو نیروی وزن و مقاومت هوا وارد می‌شود که روی شکل این نیروها و واکنش آنها رسم شده است.



ث) علاوه بر وزن و مقاومت هوا، دو نیروی دیگر نیز بر هواپیما وارد می‌شود. نیروی بالابری ($\vec{F}_{\text{بالابری}}$) که به علت اختلاف فشار لایه هوایی زیر بال و بالای بال به‌وجود می‌آید و نیروی پیشران وقتی موتور هواپیما روشن بوده و کار می‌کند، مخلوط سوخت و هوا با شدت زیادی به طرف عقب هُل داده می‌شود (رانده می‌شود) و در نتیجه این مخلوط نیز به هواپیما به طرف جلو نیرو وارد می‌کند که به آن نیروی پیشران هواپیما گویند و با $\vec{F}_{\text{پیشران}}$ نشان می‌دهند. در مورد هواپیماهای ملخی هوا به عقب هُل داده می‌شود و نیروی واکنش مربوط به هوای هل داده شده سبب حرکت هواپیما به سمت جلو می‌شود. این نیروها و واکنش آنها روی شکل نشان داده شده است.



ج) هنگام برخورد توپ با زمین، بر توپ دو نیروی وزن و نیروی زمین وارد می‌شود. این نیروها و واکنش آنها روی شکل نشان داده شده است.



۶

الف) $v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \rightarrow a = \dfrac{v^2 - v_0^2}{2\Delta x} = \dfrac{0 - (20/0\,\text{m/s})^2}{2(20/0\,\text{m})} = -10/0\,\text{m/s}^2$

ب) $\Delta x = \dfrac{v + v_0}{2} t \rightarrow t = \dfrac{v + v_0}{2\Delta x} = \dfrac{0 + (20/0\,\text{m/s})}{2(20/0\,\text{m})} = 0/50\,\text{s}$

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

۲ـ۱ و ۲ـ۲ قوانین حرکت نیوتون و معرفی برخی از نیروهای خاص

۱. سیبی را در نظر بگیرید که به شاخهٔ درختی آویزان است و سیبی از درخت جدا می‌شود.
الف) با رسم شکل نیروهای وارد بر سیب را قبل و بعد از جداشدن از درخت نشان دهید. ب) در هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟

۲. دانش‌آموزی به جرم ۵۰/۰ kg روی یک ترازوی فنری در آسانسور ایستاده است. در هر یک از حالت‌های زیر این ترازو چند نیوتون را نشان می‌دهد؟ ($g=9/80\,\text{N/kg}$)
الف) آسانسور ساکن است.
ب) آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند.
پ) آسانسور با شتاب $1/2\,\text{m/s}^2$ به طرف بالا شروع به حرکت می‌کند.
ت) آسانسور با شتاب $1/2\,\text{m/s}^2$ به طرف پایین شروع به حرکت می‌کند.

۳. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی ۲۰۰ N جسم ۹۰/۰ کیلوگرمی را هُل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی ۳۰۰ N جسم را هُل می‌دهد، جسم در آستانهٔ حرکت قرار می‌گیرد.

الف) نیروی اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح در هر حالت چقدر است؟
ب) ضریب اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح چقدر است؟
پ) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی ۲۰۰ N جسم را هُل دهد و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم ۰/۲۰ باشد، شتاب حرکت جسم چقدر خواهد شد؟

۴. در شکل روبه‌رو وقتی وزنهٔ ۴/۰ kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر ۱۴/۰ cm می‌شود، و وقتی وزنهٔ ۵/۰ kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر ۱۵/۰ cm می‌شود.
الف) ثابت فنر چقدر است؟ ب) طول عادی فنر (بدون وزنه) چند سانتی‌متر است؟

۵. در هر یک از موارد زیر، نیروهای وارد بر جسم را مشخص کنید. واکنش هر یک از این نیروها به چه جسمی وارد می‌شود؟
الف) خودرویی با سرعت ثابت در یک مسیر مستقیم افقی در حال حرکت است.
ب) کشتی‌ای با سرعت ثابت در حال حرکت است.
پ) قایقرانی در حال پارو زدن است.
ت) چتربازی در هوای آرام و در امتداد قائم در حال سقوط است.
ث) هواپیمایی در یک سطح پروازی افقی با سرعت ثابت در حال حرکت است.
ج) توپی در راستای قائم به زمین برخورد می‌کند و برمی‌گردد.

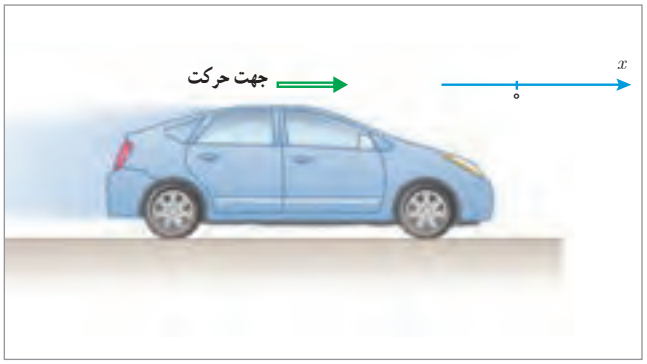
۶. راننده خودرویی که با سرعت ۷۲/۰ km/h در یک مسیر مستقیم در حال حرکت است، با دیدن مانعی اقدام به ترمز می‌کند و خودرو پس از طی مسافت ۲۰/۰ m متوقف می‌شود.
الف) شتاب خودرو در مدت ترمز چقدر است؟
ب) از لحظهٔ ترمز تا توقف کامل خودرو، چقدر طول می‌کشد؟
پ) نیروی اصطکاک بین لاستیک‌ها و سطح چقدر است؟
جرم خودرو را ۱۲۰۰ kg فرض کنید.

۷. چتربازی از یک بالگرد تقریباً ساکن که در ارتفاع نسبتاً زیادی قرار دارد، به بیرون می‌پرد و پس از مدتی چتر خود را باز می‌کند و در امتداد قائم سقوط می‌کند. حرکت چترباز را از لحظهٔ پرش تا رسیدن به زمین تحلیل کنید و نموداری تقریبی از تندی آن بر حسب زمان رسم کنید.

پ) جرم خودرو را ۱۲۰۰kg درنظر می‌گیریم. پس از ترمز در راستای افقی، فقط نیروی اصطکاک در خلاف جهت حرکت بر خودرو وارد می‌شود. بنابراین قانون دوم را در این راستا می‌نویسیم :

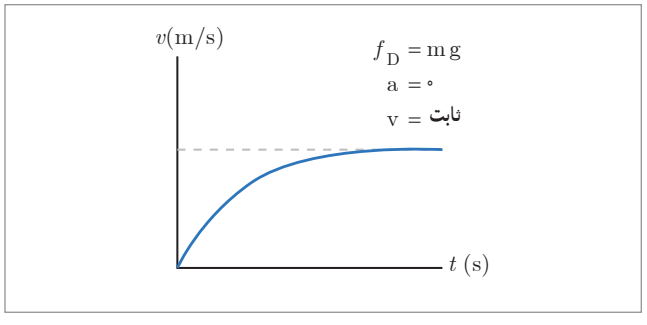
$$\circ - f_{\text{اصطکاک}} = ma \rightarrow \circ - f_{\text{اصطکاک}} = (۱۲۰۰\text{kg})\,(-۱۰/۰\text{m/s}^۲)$$

$$f_{\text{اصطکاک}} = ۱/۲۰ \times ۱۰^۴\text{N}$$



۷ حرکت چترباز را در سه حالت بحث می‌کنیم. در همهٔ حالت‌ها فرض می‌کنیم چترباز روی مسیر مستقیم حرکت می‌کند و اثر باد و عوامل دیگر را درنظر نمی‌گیریم.

الف) چترباز بلافاصله پس از پرش، چتر خود را باز می‌کند. در این حالت نیروی مقاومت هوا در ابتدا ناچیز است. با افزایش تندی چتر باز این نیرو افزایش پیدا می‌کند تا اینکه اندازهٔ این نیرو با اندازهٔ وزن برابر شود. در این حالت شتاب چترباز صفر شده و چترباز با تندی حدی به حرکت خود ادامه می‌دهد تا به زمین برسد.



پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

۲ـ۱ و ۲ـ۲ قوانین حرکت نیوتون و معرفی برخی از نیروهای خاص

۱. سیبی را در نظر بگیرید که به شاخهٔ درختی آویزان است و سپس از درخت جدا می‌شود.
الف) با رسم شکل نیروهای وارد بر سیب را قبل و بعد از جداشدن از درخت نشان دهید. ب) در هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟

۲. دانش‌آموزی به جرم ۵۰/۰ kg روی یک ترازوی فنری در آسانسور ایستاده است. در هر یک از حالت‌های زیر این ترازو چند نیوتون را نشان می‌دهد؟ (g=۹/۸۰ N/kg)
الف) آسانسور ساکن است.
ب) آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند.
پ) آسانسور با شتاب ۱/۲m/s² به طرف بالا شروع به حرکت می‌کند.
ت) آسانسور با شتاب ۱/۲m/s² به طرف پایین شروع به حرکت می‌کند.

۳. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی ۲۰۰N جسم ۹۰/۰ کیلوگرمی را هُل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی ۳۰۰N جسم را هُل می‌دهد، جسم در آستانهٔ حرکت قرار می‌گیرد.

الف) نیروی اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح در هر حالت چقدر است؟
ب) ضریب اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح چقدر است؟
پ) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی ۲۰۰N جسم را هُل دهد و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم ۰/۲۰ باشد، شتاب حرکت جسم چقدر خواهد شد؟

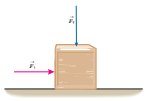
۴. در شکل روبه‌رو وقتی وزنهٔ ۴/۰ kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر ۱۲/۰cm می‌شود، و وقتی وزنهٔ ۵/۰ kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر ۱۵/۰cm می‌شود.
الف) ثابت فنر چقدر است؟ ب) طول عادی فنر (بدون وزنه) چند سانتی‌متر است؟

۵. در هر یک از موارد زیر، نیروهای وارد بر جسم را مشخص کنید. واکنش هر یک از این نیروها به چه جسمی وارد می‌شود؟
الف) خودرویی با سرعت ثابت در یک مسیر مستقیم افقی در حال حرکت است.
ب) کشتی‌ای با سرعت ثابت در حال حرکت است.
پ) قایقرانی در حال پارو زدن است.
ت) چتربازی در هوای آرام و در امتداد قائم در حال سقوط است.
ث) هواپیمایی در یک سطح پروازی افقی با سرعت ثابت در حال حرکت است.
ج) توپی در راستای قائم به زمین برخورد می‌کند و برمی‌گردد.

۶. راننده خودرویی که با سرعت ۷۲/۰km/h در یک مسیر مستقیم در حال حرکت است، با دیدن مانعی اقدام به ترمز می‌کند و خودرو پس از طی مسافت ۲۰/۰ m متوقف می‌شود.
الف) شتاب خودرو در مدت ترمز چقدر است؟
ب) از لحظهٔ ترمز تا توقف کامل خودرو، چقدر طول می‌کشد؟
پ) نیروی اصطکاک بین لاستیک‌ها و سطح چقدر است؟
جرم خودرو را ۱۲۰۰kg فرض کنید.

۷. چتربازی از یک بالگرد تقریباً ساکن که در ارتفاع نسبتاً زیادی قرار دارد، به بیرون می‌پرد و پس از مدتی چتر خود را باز می‌کند و در امتداد قائم سقوط می‌کند. حرکت چترباز را از لحظهٔ پرش تا رسیدن به زمین تحلیل کنید و نموداری تقریبی از تندی آن بر حسب زمان رسم کنید.

۸. در شکل زیر، نیروی F_1 به بزرگی ۲۰/۰N بر جعبه وارد شده است، اما جعبه همچنان ساکن است. اگر در همین حالت بزرگی نیروی قائم $\vec{F}_2$ که جعبه را به زمین می‌فشارد از صفر شروع به افزایش کند، کمیت‌های زیر چگونه تغییر می‌کنند؟



الف) اندازهٔ نیروی عمودی سطح وارد بر جعبه
ب) اندازهٔ نیروی اصطکاک ایستایی وارد بر جعبه
پ) اندازهٔ بیشینهٔ نیروی اصطکاک ایستایی
ت) نیروی خالص وارد بر جسم

۹. می‌خواهیم به جسمی که جرم آن ۵/۰ kg است، شتاب ۲/۰ m/s² بدهیم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیرویی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌شود.
الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند.
ب) جسم روی سطح افقی با ضریب اصطکاک ۰/۲۰ به طرف راست حرکت کند، و شتابش نیز به طرف راست باشد.
پ) جسم در راستای قائم با شتاب رو به بالا شروع به حرکت کند.
ت) جسم در راستای قائم با شتاب رو به پایین شروع به حرکت کند.

۱۰. قطعه‌جوبی را با سرعت افقی ۱۰/۰m/s روی سطحی افقی پرتاب می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح ۰/۲۰ است.
الف) چوب پس از پیمودن چه مسافتی می‌ایستد؟
ب) اگر از یک قطعه‌چوب دیگر استفاده کنیم که جرم آن دو برابر جرم قطعه‌چوب اول و ضریب اصطکاک جنبشی آن با سطح افقی با اولی یکسان باشد و با همان سرعت پرتاب شود، مسافت پیموده شدهٔ آن چند برابر می‌شود؟

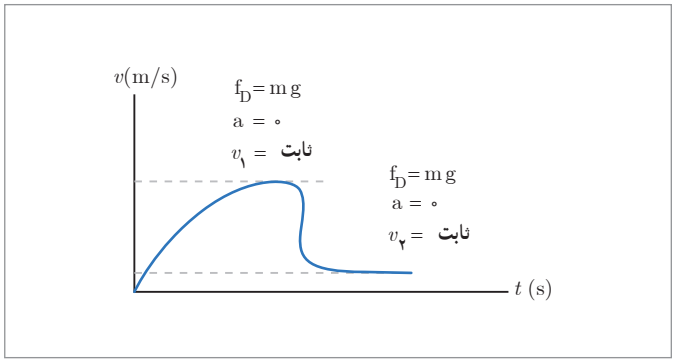
۱۱. وزنه‌ای به جرم ۲/۰ kg را به انتهای فنری به طول ۱۲cm که ثابت آن ۲۰N/cm است می‌بندیم و فنر را از سقف یک آسانسور آویزان می‌کنیم. طول فنر را در حالت‌های زیر محاسبه کنید.
الف) آسانسور ساکن است.
ب) آسانسور با سرعت ثابت ۲/۰m/s رو به پایین در حرکت است.
پ) آسانسور با شتاب ثابت ۲/۰m/s² از حال سکون رو به پایین شروع به حرکت کند.
ت) آسانسور با شتاب ثابت ۲/۰m/s² از حال سکون رو به بالا شروع به حرکت کند.

۱۲. برای یک راننده دانستن کل مسافت توقف خودرو اهمیت دارد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد کل مسافت توقف، دو قسمت دارد؛ مسافت واکنش (مسافتی که خودرو از لحظهٔ دیدن مانع تا ترمزگرفتن طی می‌کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظهٔ ترمزگرفتن تا توقف کامل طی می‌کند).

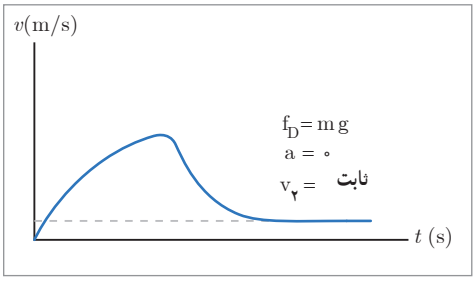
الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.
ب) زمان واکنش راننده‌ای ۰/۶۰s است. در طی این زمان، خودرو مسافت ۱۸m را طی می‌کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازهٔ آن را حساب کنید.
پ) اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از ۵/۰s متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.
ت) وقتی خودرو ترمز می‌کند، نیروی خالص وارد بر آن چقدر است؟ جرم خودرو را ۱۵۰۰kg فرض کنید.

۱۳. یک خودروی باری با طناب افقی محکمی، یک خودروی سواری به جرم ۱۵۰۰kg را می‌کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری ۲۲۰N و

ب) چترباز مدتی پس از پرش، چترش را باز می‌کند. در این حالت تندی چترباز زیاد و زیادتر می‌شود و نیروی مقاومت هوا در تندی‌های خیلی زیاد با وزن هم‌اندازه می‌شود (تندی حدی اولیه). پس از باز کردن چتر، ناگهان نیروی مقاومت هوا به علت افزایش مساحت در آن تندی زیاد به شدت زیاد می‌شود و حرکت چترباز کُند خواهد شد و نیروی مقاومت هوا آن قدر کاهش پیدا می‌کند تا با وزن هم‌اندازه شود، در این حالت به تندی حدی ثانویه می‌رسد.



اگر چترباز قبل از رسیدن به تندی حدی اولیه چترش را باز کند، نمودار به‌صورت شکل روبه‌رو خواهد شد.



۸ نیروهای وارد بر جسم متوازن‌اند. بنابراین $a = 0$ است و داریم :

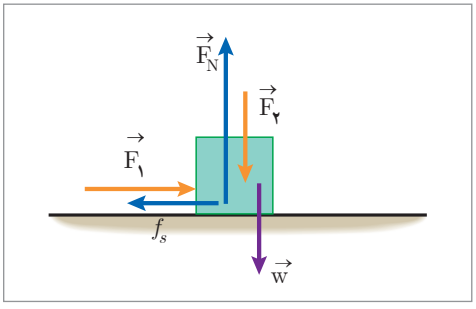
$$F_N = W + F_2 \;,\; F_1 = f_s$$

الف) افزایش می‌یابد ($F_N \Uparrow = F_2 \uparrow + W$)

ب) ثابت می‌ماند (ثابت $= F_1 \rightarrow = f_s$)

پ) افزایش می‌یابد ($f_{s,max} \Uparrow = \mu_s F_N = \mu_s (F_2 \uparrow + W)$)

ت) ثابت می‌ماند (نیروی خالص در همهٔ حالت‌ها صفر باقی می‌ماند)



۹

الف) $F - \cancel{f_k}^{\,0} = ma \rightarrow F = ma = (5/0\,\text{kg})(2/0\,\text{m/s}^2) = 10\,\text{N}$

ب) $F_N = mg = (5/0\,\text{kg})\,(9/80\,\text{N/kg}) = 49\,\text{N}$

$f_k = \mu_k F_N = (0/20)\,(49\,\text{N}) = 9/8\,\text{N}$

فیزیک ۳

۸. در شکل زیر، نیروی F_1 به بزرگی ۲/۰ N بر جعبه وارد شده است، اما جعبه همچنان ساکن است. اگر در همین حالت بزرگی نیروی قائم $\vec{F}_2$ که جعبه را به زمین می‌فشارد از صفر شروع به افزایش کند، کمیت‌های زیر چگونه تغییر می‌کنند؟

الف) اندازهٔ نیروی عمودی سطح وارد بر جعبه
ب) اندازهٔ نیروی اصطکاک ایستایی وارد بر جعبه
پ) اندازهٔ بیشینهٔ نیروی اصطکاک ایستایی
ت) نیروی خالص وارد بر جسم

۹. می‌خواهیم به جسمی که جرم آن ۵/۰ kg است، شتاب ۲/۰ m/s² بدهیم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیرویی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌شود.
الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند.
ب) جسم روی سطح افقی با ضریب اصطکاک ۰/۲۰ به طرف راست حرکت کند، و شتابش نیز به طرف راست باشد.
پ) جسم در راستای قائم با شتاب رو به بالا شروع به حرکت کند.
ت) جسم در راستای قائم با شتاب رو به پایین شروع به حرکت کند.

۱۰. قطعه‌چوبی را با سرعت افقی ۱۰/۰ m/s روی سطحی افقی پرتاب می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح ۰/۲۰ است.
الف) چوب پس از پیمودن چه مسافتی می‌ایستد؟
ب) اگر از یک قطعه‌چوب دیگر استفاده کنیم که جرم آن دو برابر جرم قطعه‌چوب اول و ضریب اصطکاک جنبشی آن با سطح افقی با اولی یکسان باشد و با همان سرعت پرتاب شود، مسافت پیموده شدهٔ آن چند برابر می‌شود؟

۵۸

۱۱. وزنه‌ای به جرم ۲/۰ kg را به انتهای فنری به طول ۱۲cm که ثابت آن ۲۰ N/cm است می‌بندیم و فنر را از سقف یک آسانسور آویزان می‌کنیم. طول فنر را در حالت‌های زیر محاسبه کنید.
الف) آسانسور ساکن است.
ب) آسانسور با سرعت ثابت ۲/۰ m/s رو به پایین در حرکت است.
پ) آسانسور با شتاب ثابت ۲/۰ m/s² از حال سکون رو به پایین شروع به حرکت کند.
ت) آسانسور با شتاب ثابت ۲/۰ m/s² از حال سکون رو به بالا شروع به حرکت کند.

۱۲. برای یک راننده دانستن کل مسافت توقف خودرو اهمیت دارد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد کل مسافت توقف، دو قسمت دارد: مسافت واکنش (مسافتی که خودرو از لحظهٔ دیدن مانع تا زمانی‌که ترمز گرفتن طی می‌کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظه ترمزگرفتن تا توقف کامل طی می‌کند).

کل مسافت توقف = مسافت ترمز + مسافت واکنش

الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.
ب) زمان واکنش راننده‌ای ۰/۶۰ s است. در طی این زمان، خودرو مسافت ۱۸m را طی می‌کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازهٔ آن را حساب کنید.
پ) اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از ۵/۰ s متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.
ت) وقتی خودرو ترمز می‌کند، نیروی خالصی وارد بر آن چقدر است؟ جرم خودرو را ۱۵۰۰ kg فرض کنید.

۱۳. یک خودروی باری با طناب افقی محکمی، یک خودروی سواری به جرم ۱۵۰۰ kg را می‌کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری ۲۲۰ N و

فیزیک ۳

۸. در شکل زیر، نیروی F_1 به بزرگی ۲۰/۰N بر جعبه وارد شده است، اما جعبه همچنان ساکن است. اگر در همین حالت بزرگی نیروی قائم $\vec{F}_2$ که جعبه را به زمین می‌فشارد از صفر شروع به افزایش کند، کمیت‌های زیر چگونه تغییر می‌کنند؟

الف) اندازهٔ نیروی عمودی سطح وارد بر جعبه
ب) اندازهٔ نیروی اصطکاک ایستایی وارد بر جعبه
پ) اندازهٔ بیشینهٔ نیروی اصطکاک ایستایی
ت) نیروی خالص وارد بر جسم

۹. می‌خواهیم به جسمی که جرم آن ۵/۰kg است، شتاب ۲/۰m/s² بدهیم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیرویی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌شود.
الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند.
ب) جسم روی سطح افقی با ضریب اصطکاک ۰/۲۰ به طرف راست حرکت کند، و شتابش نیز به طرف راست باشد.
پ) جسم در راستای قائم با شتاب رو به بالا شروع به حرکت کند.
ت) جسم در راستای قائم با شتاب رو به پایین شروع به حرکت کند.

۱۰. قطعه‌جوبی را با سرعت افقی ۱۰/۰m/s روی سطحی افقی پرتاب می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح ۰/۲۰ است.
الف) چوب پس از پیمودن چه مسافتی می‌ایستد؟
ب) اگر از یک قطعه‌چوب دیگر استفاده کنیم که جرم آن دو برابر جرم قطعه‌چوب اول و ضریب اصطکاک جنبشی آن با سطح افقی با اولی یکسان باشد و با همان سرعت پرتاب شود، مسافت پیموده شدهٔ آن چند برابر می‌شود؟

۵۸

۱۱. وزنه‌ای به جرم ۲/۰ kg را به انتهای فنری به طول ۱۲cm که ثابت آن ۲۰N/cm است می‌بندیم و فنر را از سقف یک آسانسور آویزان می‌کنیم. طول فنر را در حالت‌های زیر محاسبه کنید.
الف) آسانسور ساکن است.
ب) آسانسور با سرعت ثابت ۲/۰m/s رو به پایین در حرکت است.
پ) آسانسور با شتاب ثابت ۲/۰m/s² از حال سکون رو به پایین شروع به حرکت کند.
ت) آسانسور با شتاب ثابت ۲/۰m/s² از حال سکون رو به بالا شروع به حرکت کند.

۱۲. برای یک راننده دانستن کل مسافت توقف خودرو اهمیت دارد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد کل مسافت توقف، دو قسمت دارد: مسافت واکنش (مسافتی که خودرو از لحظهٔ دیدن مانع تا ترمزگرفتن طی می‌کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظه ترمزگرفتن تا توقف کامل طی می‌کند).

کل مسافت توقف = مسافت ترمز + مسافت واکنش

الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.
ب) زمان واکنش راننده‌ای ۰/۶۰s است. در طی این زمان، خودرو مسافت ۱۸m را طی می‌کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازهٔ آن را حساب کنید.
پ) اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از ۵/۰s متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.
ت) وقتی خودرو ترمز می‌کند، نیروی خالصی وارد بر آن چقدر است؟ جرم خودرو را ۱۵۰۰kg فرض کنید.

۱۳. یک خودروی باری با طناب افقی محکمی، یک خودروی سواری به جرم ۱۵۰۰kg را می‌کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری ۲۲۰N و

$$F - f_k = ma \rightarrow F = f_k + ma = (۹/۸\text{N}) + (۵/۰\text{kg})(۲/۰\text{m/s}^۲) = ۱۹/۸\text{N}$$

(پ)

$$F - mg = ma \rightarrow F = mg + ma = m\,(g + a) = (۵/۰\text{kg})\,(۹/۸۰\ \text{m/s}^۲ + ۲/۰\ \text{m/s}^۲) = ۵۹\text{N}$$

(ت)

$$F - mg = ma\ ,\ a = -۲/۰\text{m/s}^۲$$

$$F = m\,(g + a) = (۵/۰\text{kg})\,(۹/۸۰\text{m/s}^۲ + (-۲/۰\text{m/s}^۲)) = ۳۹\text{N}$$

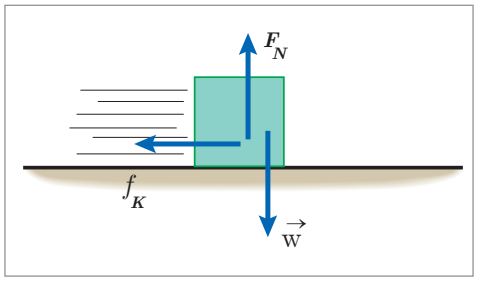
خوب است پس از حل این مسئله، از دانش‌آموزان بخواهیم که بگویند از حل آن چه نتیجه‌ای گرفتند؟

۱۰

الف) نیروها در راستای قائم متوازن‌اند :

$$F_N - mg = ۰ \rightarrow F_N = mg$$

قانون دوم را در راستای حرکت به‌کار می‌بریم :



$$۰ - f_k = ma \rightarrow -\mu_k F_N = ma \rightarrow -\mu_k mg = ma \rightarrow a = -\mu_k g$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شتاب حرکت مستقل از جرم است.

$$a = ۰/۲۰\ (۹/۸۰\ \text{m/s}^۲) = -۱/۹۶\text{m/s}^۲$$

$$v^۲ - v_۰^۲ = ۲a\Delta x \rightarrow \Delta x = \frac{v^۲ - v_۰^۲}{۲a} = \frac{۰ - v_۰^۲}{-۲\mu_k g} = \frac{v_۰^۲}{۲\mu_k g}$$

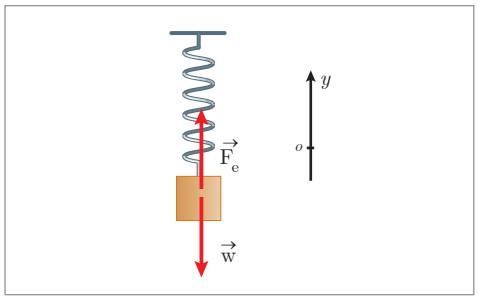
همان‌طور که ملاحظه می‌شود مسافت طی شده نیز مستقل از جرم است.

$$\Delta x = \frac{(۱۰/۰\text{m/s})^۲}{۲(۰/۲۰)(۹/۸۰\text{m/s}^۲)} = ۲۵/۵\text{m}$$

ب) همان‌طور که در قسمت الف گفته شد، شتاب و جابه‌جایی مستقل از جرم هستند.

۱۱

الف و ب) برای سادگی g را $۱۰\text{m/s}^۲$ فرض می‌کنیم.



$$F_e - W = ma\ ,\ a = ۰$$

$$F_e = W \rightarrow k\,(l - l_۰) = mg$$

$$(۲۰ \times ۱۰^۲\text{N/m})\,(l - ۱۲ \times ۱۰^{-۲}\text{m}) = (۲/۰\ \text{kg})\,(۱۰\text{m/s}^۲)$$

$$l - ۱۲ \times ۱۰^{-۲}\text{m} = ۱/۰ \times ۱۰^{-۲}\text{m} \rightarrow l = ۱۳ \times ۱۰^{-۲}\text{m}$$

$$l = ۱۳\text{cm}$$

پ)

$$a = -۲/۰\,\mathrm{m/s^۲}$$

$$F_e - mg = ma \rightarrow F_e = mg + ma = m(g+a)$$

$$k(l-l_۰) = m(g+a) \rightarrow (۲۰\times۱۰^{-۲}\mathrm{N/m})(l-۱۲\times۱۰^{-۲}\mathrm{m}) = (۲/۰\,\mathrm{kg})(۱۰\,\mathrm{m/s^۲} - ۲/۰\,\mathrm{m/s^۲})$$

$$l - ۱۲\times۱۰^{-۲}\mathrm{m} = \frac{۱۶\mathrm{N}}{۲۰\times۱۰^{۲}\,\mathrm{N/m}} = ۰/۸۰\times۱۰^{-۲}\mathrm{m}$$

$$l = ۱۲/۸\times۱۰^{-۲}\mathrm{m} = ۱۲/۸\,\mathrm{cm}$$

ت)

$$a = +۲/۰\,\mathrm{m/s^۲}$$

$$F_e = m(g+a) \rightarrow k(l-۱۲\times۱۰^{-۲}\mathrm{m}) = (۲/۰\,\mathrm{kg})(۱۰\,\mathrm{m/s^۲} + ۲/۰\,\mathrm{m/s^۲})$$

$$l - ۱۲\times۱۰^{-۲}\mathrm{m} = \frac{۲۴\mathrm{N}}{۲۰\times۱۰^{۲}\,\mathrm{N/m}} \rightarrow l = ۱۳/۲\times۱۰^{-۲}\mathrm{m} = ۱۳/۲\mathrm{cm}$$

فیزیک ۳

۸. در شکل زیر، نیروی $F_۱$ به بزرگی ۲۰/۰N بر جعبه وارد شده است، اما جعبه همچنان ساکن است. اگر در همین حالت بزرگی نیروی قائم $\vec{F}_۲$ که جعبه را به زمین می‌فشارد از صفر شروع به افزایش کند، کمیت‌های زیر چگونه تغییر می‌کنند؟

الف) اندازهٔ نیروی عمودی سطح وارد بر جعبه
ب) اندازهٔ نیروی اصطکاک ایستایی وارد بر جعبه
پ) اندازهٔ بیشینهٔ نیروی اصطکاک ایستایی
ت) نیروی خالص وارد بر جسم

۹. می‌خواهیم به جسمی که جرم آن ۵/۰kg است، شتاب ۲/۰m/s² بدهیم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیرویی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌شود.
الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند.
ب) جسم روی سطح افقی با ضریب اصطکاک ۰/۲۰ به طرف راست حرکت کند، و شتابش نیز به طرف راست باشد.
پ) جسم در راستای قائم با شتاب رو به بالا شروع به حرکت کند.
ت) جسم در راستای قائم با شتاب رو به پایین شروع به حرکت کند.

۱۰. قطعه‌چوبی را با سرعت اولیهٔ ۱۰/۰m/s روی سطحی افقی پرتاب می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح ۰/۲۰ است.
الف) چوب پس از پیمودن چه مسافتی می‌ایستد؟
ب) اگر از یک قطعه‌چوب دیگر استفاده کنیم که جرم آن دو برابر جرم قطعه‌چوب اول و ضریب اصطکاک جنبشی آن با سطح افقی با اولی یکسان باشد و با همان سرعت پرتاب شود، مسافت پیموده شدهٔ آن چند برابر می‌شود؟

۱۱. وزنه‌ای به جرم ۲/۰ kg را به انتهای فنری به طول ۱۲cm که ثابت آن ۲۰N/cm است می‌بندیم و فنر را از سقف یک آسانسور آویزان می‌کنیم. طول فنر را در حالت‌های زیر محاسبه کنید.
الف) آسانسور ساکن است.
ب) آسانسور با سرعت ثابت ۲/۰m/s رو به پایین در حرکت است.
پ) آسانسور با شتاب ثابت ۲/۰m/s² از حال سکون رو به پایین شروع به حرکت کند.
ت) آسانسور با شتاب ثابت ۲/۰m/s² از حال سکون رو به بالا شروع به حرکت کند.

۱۲. برای یک راننده دانستن کل مسافت توقف خودرو اهمیت دارد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد کل مسافت توقف، دو قسمت دارد: مسافت واکنش (مسافتی که خودرو از لحظهٔ دیدن مانع تا ترمزگرفتن طی می‌کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظه ترمزگرفتن تا توقف کامل طی می‌کند).

کل مسافت توقف = مسافت ترمز + مسافت واکنش

الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.
ب) زمان واکنش راننده‌ای ۰/۶۰s است. در طی این زمان، خودرو مسافت ۱۸m را طی می‌کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازهٔ آن را حساب کنید.
پ) اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از ۵/۰s متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.
ت) وقتی خودرو ترمز می‌کند، نیروی خالص وارد بر آن چقدر است؟ جرم خودرو را ۱۵۰۰kg فرض کنید.

۱۳. یک خودروی باری با طناب افقی محکمی، یک خودروی سواری به جرم ۱۵۰۰kg را می‌کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری ۲۲۰N و

۵۸

۱۲

الف) اندازهٔ سرعت خودرو و زمان واکنش (طبق رابطهٔ $\Delta x = v\Delta t$)

ب)

$$\Delta x = v\Delta t \rightarrow v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{۱۸\,\mathrm{m}}{۰/۶۰\,\mathrm{s}} = ۳۰\,\mathrm{m/s} = ۱۰۸\,\mathrm{km/h}$$

پ)

$$\Delta x = \left(\frac{v+v_۰}{۲}\right)\Delta t = \left(\frac{۰+۳۰\,\mathrm{m/s}}{۲}\right)(۵/۰\,\mathrm{s}) = ۷۵\,\mathrm{m}$$

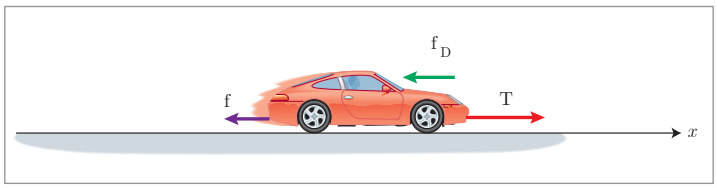
$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v-v_۰}{\Delta t} = \frac{۰-۳۰\,\mathrm{m/s}}{۵/۰\,\mathrm{s}} = -۶/۰\,\mathrm{m/s^۲}$$

ت)

$$\text{نیروی خالص} = F_{net} = ma = (۱۵۰۰\,\mathrm{kg})(-۶/۰\,\mathrm{m/s^۲}) = -۹/۰\times۱۰^{۳}\mathrm{N}$$

علامت منفی نشان می‌دهد جهت نیروی خالص در خلاف جهت حرکت خودرو است.

۱۳



الف)

$$T - (f + f_D) = ma\,,\ a = ۰$$

$$T = f + f_D = ۲۲۰\mathrm{N} + ۳۸۰\mathrm{N} = ۶۰۰\mathrm{N}$$

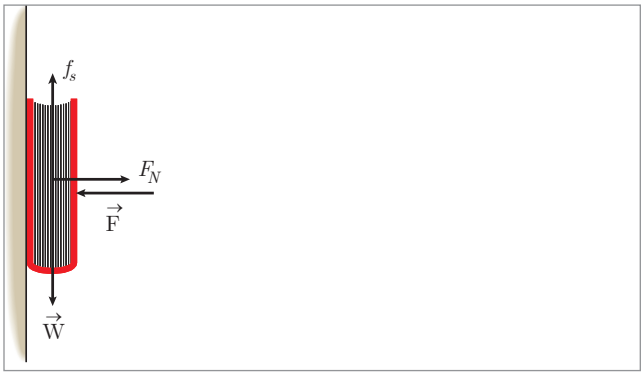
ب)

$$T - (f + f_D) = ma \rightarrow T - ۶۰۰\mathrm{N} = (۱۵۰۰\,\mathrm{kg})(۲/۰\,\mathrm{m/s^۲})$$

$$T = ۳۶۰۰\mathrm{N}$$

۱۴

الف)



ب) $f_s - W = ma \;,\; a = 0$

$f_s = W = mg = (۲/۵\text{kg})\,(۹/۸۰\text{m/s}^۲) = ۲۴/۵\text{N}$

پ) خیر تغییر نمی‌کند زیرا f_s هم‌اندازه با وزن است. بنابراین با افزایش F فقط F_N زیاد می‌شود زیرا $F_N = F$ است.

۱۵ الف) علت این پدیده‌ها، ویژگی لختی است. یعنی در حالت اول که خودرو شروع به حرکت می‌کند، شما تمایل دارید همچنان حالت سکون خود را حفظ کنید و به همین علت به صندلی فشرده می‌شوید. در حالت دوم شما تمایل دارید همچنان به حرکت خود ادامه دهید و به همین علت به جلو پرتاب می‌شوید.

ب) کمربند ایمنی دو نقش دارد؛ اول آنکه از پرت شدن شما (جدا شدن از صندلی) به جلو، جلوگیری می‌کند. دوم آنکه زمان برخورد را (حدود ۱۰ برابر) افزایش می‌دهد. کیسه هوا نیز دو نقش دارد؛ اول آنکه زمان برخورد شما را افزایش می‌دهد (حدود ۱۰ برابر) و دوم آنکه سطح برخورد شما را با جلوی خودرو زیاد می‌کند (به مساحت حدود $۰/۵\text{m}^۲$ می‌رساند).

با توجه به رابطهٔ $F_{av} = \dfrac{\Delta p}{\Delta t}$ اگر Δt افزایش پیدا کند، نیروی وارد بر سرنشین کاهش پیدا می‌کند. مثلاً اگر کمربند ایمنی و کیسهٔ هوا سبب افزایش ۲۰ برابری زمان برخورد شوند، نیروی وارد بر سرنشین، ۲۰ برابر کاهش پیدا می‌کند و این سبب کاهش شدید آسیب به سرنشین می‌شود. (البته این افزایش زمان در کنار افزایش مساحت برخورد جراحت‌های ناشی از برخورد را کاهش می‌دهد)

۱۶

الف) $\Delta p = m\Delta v \;,\; v_۱ = ۱۵/۰\text{m/s} \;,\; v_۲ = -۲۲/۰\text{m/s}$

$\Delta p = (۰/۲۸۰\text{kg})\,(-۲۲/۰\text{m/s} - (+۱۵/۰\text{m/s}) = -۱۰/۳۶\text{kg.m/s} \simeq -۱۰/۴\text{kg.m/s} \;\Rightarrow |\Delta p| = ۱۰/۴\ \text{kg.m/s}$

ب) $F_{av} = \dfrac{|\Delta p|}{\Delta t} = \dfrac{۱۰/۳۶\,\text{kg.m/s}}{۰/۰۶۰۰\,\text{s}} = ۱۷۲/۶N \simeq ۱۷۳\text{N}$

۱۷ تغییر تکانه توپ برابر با مساحت سطح زیر نمودار $F-t$ است :

$$\Delta p = S = \frac{(۲/۵\times۱۰^{-۳}\text{s} - ۱/۰\times۱۰^{-۳}\text{s})(۲۰/۰\times۱۰^{۳}\text{N})}{۲} = ۱۵\text{kg.m/s}$$

$$F_{av} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{۱۵\,\text{kg.m/s}}{۱/۵\times۱۰^{-۳}\text{s}} = ۱/۰\times۱۰^{۴}\text{N}$$

۱۸

الف)

$$T=\frac{t}{n}=\frac{۶۰/۰\text{s}}{۱۰۰۰\text{دور}}=۰/۰۶۰\text{s}$$

ب)

$$v_{\text{وسط}}=\frac{۲\pi r_{\text{وسط}}}{T}=\frac{۲\pi(۲/۰\text{m})}{۰/۰۶۰\text{s}}=\frac{۲۰۰\pi}{۳/۰}\text{m/s}\simeq ۲۰۹\text{m/s}$$

$$v_{\text{نوک}}=\frac{۲\pi r_{\text{نوک}}}{T}=\frac{۲\pi(۴/۰\text{m})}{۰/۰۶۰\text{s}}=\frac{۴۰۰\pi}{۳/۰}\text{m/s}\simeq ۴۱۸/۶\text{m/s}\simeq ۴۱۹\text{m/s}$$

در وسط پره : $a_c=\frac{v^۲}{r_{\text{وسط}}}=\frac{۴\pi^۲ r_{\text{وسط}}}{T^۲}=\frac{۴(۳/۱۴)^۲(۲/۰\text{m})}{(۰/۰۶۰\text{s})^۲}=۴۳۸۲۰\text{m/s}^۲$ ۴ ۴×۱۰

$$\simeq ۴/۴\times۱۰^{۴}\text{m/s}^۲$$

در نوک پره : $a_c=\frac{۴\pi^۲ r_{\text{نوک}}}{T^۲}=\frac{۴(۳/۱۴)^۲(۴/۰\text{m})}{(۰/۰۶۰\text{s})^۲}=۸۷۶۴۰$ ×

$$\simeq ۸/۸\times۱۰^{۴}\text{m/s}^۲$$

۱۹

$$f_s=m\frac{v^۲}{r}\rightarrow f_{s,\max}=m\frac{v^۲}{r}\rightarrow \mu_s F_N=m\frac{v^۲}{r}\rightarrow \mu_s(mg)=m\frac{v^۲}{r}\rightarrow \mu_s=\frac{v^۲}{rg}$$

$$\mu_s=\frac{(۱۵\text{m/s})^۲}{(۵۰\text{m})(۱۰\text{m/s}^۲)}=۰/۴۵$$

۲۰

$$F=G\frac{m_۱ m_۲}{r^۲}\Rightarrow m_۱=\frac{Fr^۲}{Gm_۲}=\frac{(۱/۰۰\times۱۰^{-۸}\text{N})(۲۰/۰\text{m})^۲}{(۶/۶۷\times۱۰^{-۱۱}\frac{\text{N.m}^۲}{\text{kg}^۲})(۵۰/۰\text{kg})}=$$

$$=۱۱۹۹/۴\text{kg}\simeq ۱/۲\times۱۰^{۳}\text{kg}$$

۲۱

الف)

$$F=G\frac{M_e m}{r^۲},\ r=R_e+h$$

$$F=(۶/۶۷\times۱۰^{-۱۱}\frac{\text{N.m}^۲}{\text{kg}^۲})\frac{(۵/۹۸\times۱۰^{۲۴}\text{kg})(۶۰۰\text{kg})}{(۹۲۰۰\times۱۰^{۳}\text{m})^۲}$$

$$=۲/۸۲۷۵\times۱۰^{۳}\text{N}\simeq ۲/۸۳\times۱۰^{۳}\text{N}$$

۵-۳ نیروی گرانشی

۱۰. دو جسم در فاصلهٔ ۲۰/۰m از هم، یکدیگر را با نیروی گرانشی کوچک $۱/۰۰\times۱۰^{-۸}\text{N}$، جذب می‌کنند. اگر جرم یکی از اجسام ۵۰/۰kg باشد، جرم جسم دیگر چقدر است؟

۱۱. ماهواره‌ای به جرم ۶۰۰kg در مداری دایره‌ای به ارتفاع ۲۸۰۰ کیلومتر از سطح زمین، به دور آن می‌چرخد.
الف) نیروی گرانشی وارد بر ماهواره
ب) شتاب ماهواره
پ) تندی ماهواره
ت) دورهٔ تناوب ماهواره را در این ارتفاع به‌دست آورید.
($M_e=۵/۹۸\times۱۰^{۲۴}\text{kg}$ و $R_e=۶۴۰۰\text{km}$)

۱۲. الف) در چه ارتفاعی از سطح زمین، وزن یک شخص به نصف مقدار خود در سطح زمین می‌رسد؟
ب) اگر جرم ماهواره‌ای ۲۵۰kg باشد، وزن آن در ارتفاع ۳۶۰۰۰ کیلومتری از سطح زمین چقدر خواهد شد؟

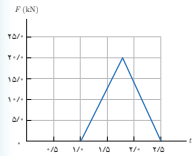
۱۳. الف) شتاب گرانشی ناشی از خورشید در سطح زمین چقدر است؟
ب) شتاب گرانشی ناشی از ماه در سطح زمین چقدر است؟
($M_{\text{ماه}}=۷/۳۶\times۱۰^{۲۲}\text{kg}$ و $M_{\text{خ}}=۱/۹۹\times۱۰^{۳۰}\text{kg}$
$۱۴۹/۶\times۱۰^{۶}\text{km}$ = فاصلهٔ زمین تا خورشید
$۳/۸۴\times۱۰^{۵}\text{km}$ =فاصلهٔ زمین تا ماه

۱۴. الف) سفینه‌ای به جرم $۳/۰۰\times۱۰^{۳}\text{kg}$ در وسط فاصلهٔ بین زمین و ماه قرار دارد. نیروی گرانشی خالصی را که از طرف زمین و ماه به این سفینه در این مکان وارد می‌شود به‌دست آورید (از داده‌های مسئله‌های قبل استفاده کنید).
ب) در چه فاصله‌ای از زمین، نیروی گرانشی ماه و زمین بر سفینه، یکدیگر را خنثی می‌کنند؟

الف) علت این پدیده‌ها را توضیح دهید. ب) نقش کمربند ایمنی و کیسهٔ هوا در کوتاه‌شدن آسیب‌ها در تصادف‌ها را بیان کنید.

۱۶. توپی به جرم ۲۸۰g با تندی ۱۵/۰m/s به‌طور افقی به بازیکنی زدیک می‌شود. بازیکن با مشت به توپ ضربه می‌زند و باعث می‌شود توپ با تندی ۲۲/۰m/s در جهت مخالف برگردد.
الف) اندازهٔ تغییر تکانهٔ توپ را محاسبه کنید.
ب) اگر مشت بازیکن ۰/۰۶۰s با توپ در تماس باشد، اندازهٔ نیروی متوسط وارد بر مشت بازیکن از طرف توپ را به دست آورید.

۱۷. شکل زیر، منحنی نیروی خالص برحسب زمان را برای توپ بیسبالی که با چوب بیسبال به آن ضربه زده شده است، نشان می‌دهد. تغییر تکانهٔ توپ و نیروی خالص متوسط وارد بر آن را به دست آورید.



۳-۴ حرکت دایره‌ای یکنواخت

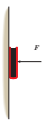
۱۸. پره‌های یک بالگرد در هر دقیقه، ۱۰۰۰ دور می‌چرخند. طول پره‌ها را ۴/۰m فرض کنید و کمیت‌های زیر را برای پره‌ها محاسبه کنید.
الف) دورهٔ تناوب پره‌ها
ب) تندی در وسط و نوک پره‌ها
پ) شتاب مرکز گرا در وسط و نوک پره‌ها

۱۹. حداقل ضریب اصطکاک ایستایی بین چرخ‌های خودرو و سطح جاده، چقدر باشد تا خودرو بتواند با تندی ۵۴ km/h پیچ افقی مسطحی را که شعاع آن ۵۰m است، دور بزند؟

۳۸۰N است.

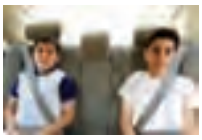
الف) اگر سرعت خودرو ثابت بماند نیروی کنش طناب چقدر است؟
ب) اگر خودرو با شتاب ثابت ۲/۰m/s² به طرف راست کشیده شود، نیروی کنش طناب چقدر است؟

۱۴. کتابی را مانند شکل با نیروی عمودی F به دیوار قائمی فشرده و ثابت نگه داشته‌ایم.
الف) نیروهای وارد بر کتاب را رسم کنید.
ب) اگر جرم کتاب ۲/۵kg باشد، اندازهٔ نیروی اصطکاک را به دست آورید.
پ) اگر کتاب را پیشتر به دیوار بفشاریم، آیا نیروی اصطکاک تغییر می‌کند؟ با این کار چه نیروهایی افزایش می‌یابد؟



۳-۲ نکانه و قانون دوم نیوتون

۱۵. وقتی در خودروی ساکنی نشسته‌اید و خودرو ناگهان شروع به حرکت می‌کند، به صندلی فشرده می‌شوید. همچنین اگر در خودروی در حال حرکتی نشسته باشید، در توقف ناگهانی به جلو پرتاب می‌شوید.



ب)

$$a=\frac{F}{m}=\frac{۲/۸۲۷۵\times۱۰^{۳}\,\mathrm{N}}{۶۰۰\,\mathrm{kg}}=۴/۷۱\,\mathrm{m/s^{۲}}$$

پ)

$$F=m\frac{v^{۲}}{r}\rightarrow G\frac{M_e m}{r^{۲}}=m\frac{v^{۲}}{r}\rightarrow v=\sqrt{\frac{GM_e}{r}}=$$

$$\sqrt{\frac{(۶/۶۷\times۱۰^{-۱۱}\,\frac{\mathrm{N.m^{۲}}}{\mathrm{kg^{۲}}})(۵/۹۸\times۱۰^{۲۴}\,\mathrm{kg})}{(۹۲۰۰\times۱۰^{۳}\,\mathrm{m})}}=۶/۵۸\times۱۰^{۳}\,\mathrm{m/s}$$

ت)

$$T=\frac{۲\pi r}{v}=\frac{۲(۳/۱۴)(۹۲۰۰\times۱۰^{۳}\,\mathrm{m})}{۶/۵۸\times۱۰^{۳}\,\mathrm{m/s}}=۸۷۸۰\,\mathrm{s}=۸/۷۸\times۱۰^{۳}\,\mathrm{s}$$

فیزیک ۳

۵-۳ نیروی گرانشی

۳۰. دو جسم در فاصلهٔ ۲۰/۰m از هم، یکدیگر را با نیروی گرانشی کوچک $۱/۰۰\times۱۰^{-۶}$N، جذب می‌کنند. اگر جرم یکی از اجسام ۵۰/۰kg باشد، جرم جسم دیگر چقدر است؟

۳۱. ماهواره‌ای به جرم ۶۰۰kg در مداری دایره‌ای به ارتفاع ۲۸۰۰ کیلومتر از سطح زمین، به دور آن می‌چرخد.
الف) نیروی گرانشی وارد بر ماهواره
ب) شتاب ماهواره
پ) تندی ماهواره
ت) دورهٔ تناوب ماهواره را در این ارتفاع به‌دست آورید.
($M_e=۵/۹۸\times۱۰^{۲۴}$kg و $R_e=۶۴۰۰$km)

۳۲. الف) در چه ارتفاعی از سطح زمین، وزن یک شخص به نصف مقدار خود در سطح زمین می‌رسد؟
ب) اگر جرم ماهواره‌ای ۲۵۰kg باشد، وزن آن در ارتفاع ۳۶۰۰۰ کیلومتری از سطح زمین چقدر خواهد شد؟

۳۳. الف) شتاب گرانشی ناشی از خورشید در سطح زمین چقدر است؟
ب) شتاب گرانشی ناشی از ماه در سطح زمین چقدر است؟
$M_{\odot}=۱/۹۹\times۱۰^{۳۰}$kg و $M_{\leftmoon}=۷/۳۶\times۱۰^{۲۲}$kg
$۱۴۹/۶\times۱۰^{۶}$km = فاصلهٔ زمین تا خورشید
$۳/۸۴\times۱۰^{۵}$km =فاصلهٔ زمین تا ماه

۳۴. الف) سفینه‌ای به جرم $۳/۰۰\times۱۰^{۳}$kg در وسط فاصلهٔ بین زمین و ماه قرار دارد. نیروی گرانشی خالصی را که از طرف زمین و ماه به این سفینه در این مکان وارد می‌شود به‌دست آورید (از داده‌های مسئله‌های قبل استفاده کنید).
ب) در چه فاصله‌ای از زمین، نیروی گرانشی ماه و زمین بر سفینه، یکدیگر را خنثی می‌کنند؟

۶۰

۳۲

الف)

$$\frac{W_۲}{W_۱}=\frac{\frac{GM_e m}{(R_e+h)^{۲}}}{\frac{GM_e m}{R_e^{۲}}}=(\frac{R_e}{R+h})^{۲}\rightarrow\frac{۱}{۲}=(\frac{R_e}{R_e+h})^{۲}\rightarrow\sqrt{۲}R_e=R_e+h\rightarrow h=(\sqrt{۲}-۱)R_e\simeq۲۶۵۱\,\mathrm{km}$$

ب)

$$\frac{W_۲}{W_۱}=(\frac{R_e}{R_e+h})^{۲}\Rightarrow\frac{W_۲}{(۲۵۰\,\mathrm{kg})(۹/۸۰\,\mathrm{N/kg})}=(\frac{۶۴۰۰\,\mathrm{km}}{۶۴۰۰\,\mathrm{km}+۳۶۰۰۰\,\mathrm{km}})^{۲}\Rightarrow W_۲=۵۵/۸\,\mathrm{N}$$

۳۳

الف)

$$g_s=G\frac{M_s}{r^{۲}}=(۶/۶۷\times۱۰^{-۱۱}\,\frac{\mathrm{N.m^{۲}}}{\mathrm{kg^{۲}}})\frac{(۱/۹۹\times۱۰^{۳۰}\,\mathrm{kg})}{(۱۴۹/۶\times۱۰^{۹}\,\mathrm{m})^{۲}}=۵/۹\times۱۰^{-۳}\,\mathrm{N/kg}$$

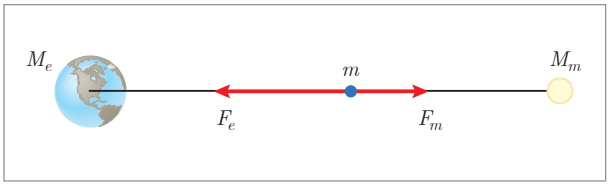
همان‌گونه که ملاحظه می‌شود این مقدار در مقابل شتاب گرانش زمین در سطح آن بسیار ناچیز است.

ب)

$$g_m=G\frac{M_m}{r^{۲}}=(۶/۶۷\times۱۰^{-۱۱}\,\frac{\mathrm{N.m^{۲}}}{\mathrm{kg^{۲}}})\frac{(۷/۳۶\times۱۰^{۲۲}\,\mathrm{kg})}{(۳/۸۴\times۱۰^{۸}\,\mathrm{m})^{۲}}=۳/۳۳\times۱۰^{-۵}\,\mathrm{N/kg}$$

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود این مقدار در مقابل شتاب گرانش زمین در سطح آن بسیار ناچیز است.

۲۴



الف)

$$F_{net} = F_{\text{زمین}} - F_{\text{ماه}} = G\frac{M_m m}{r^۲} - G\frac{M_e m}{r^۲} = G\frac{m}{r^۲}(M_e - M_m)$$

$$= (۶/۶۷\times۱۰^{-۱۱}\frac{\text{N.m}^۲}{\text{kg}^۲})\frac{(۳/۰۰\times۱۰^{۴}\text{kg})}{(\frac{۳۸۴}{۲}\times۱۰^{۶}\text{m})^۲}(۵/۹۸\times۱۰^{۲۴}\text{kg} -$$

$$۷/۳۶\times۱۰^{۲۲}\text{kg}) = ۳/۲\times۱۰^{۲}\text{N}$$

ب)

$$F_{\text{زمین}} = F_{\text{ماه}} \rightarrow G\frac{M_e m}{x^۲} = G\frac{M_m m}{(r-x)^۲} \rightarrow \frac{M_e}{x^۲} = \frac{M_m}{(r-x)^۲} \rightarrow \frac{x^۲}{(r-x)^۲} = \frac{M_e}{M_m}$$

$$\frac{x}{۳/۸۴\times۱۰^{۵}\text{km} - x} = \sqrt{\frac{M_e}{M_m}} = \sqrt{\frac{۵/۹۸\times۱۰^{۲۴}\text{kg}}{۷/۳۶\times۱۰^{۲۲}\text{kg}}} = ۹/۰۱$$

$$x = \frac{۹/۰۱\times۳/۸۴\times۱۰^{۵}\text{km}}{۱۰} = ۳/۴۶\times۱۰^{۵}\text{km}$$

۵ـ۲ نیروی گرانشی

۴۰. دو جسم در فاصلهٔ ۲۰/۰m از هم، یکدیگر را با نیروی گرانشی کوچک $۱/۰۰\times۱۰^{-۹}$N، جذب می‌کنند. اگر جرم یکی از اجسام ۵۰/۰kg باشد، جرم جسم دیگر چقدر است؟

۴۱. ماهواره‌ای به جرم ۶۰۰kg در مداری دایره‌ای به ارتفاع ۲۸۰۰ کیلومتر از سطح زمین، به دور آن می‌چرخد.
الف) نیروی گرانشی وارد بر ماهواره
ب) شتاب ماهواره
پ) تندی ماهواره
ت) دورهٔ تناوب ماهواره را در این ارتفاع به‌دست آورید.
($M_e = ۵/۹۸\times۱۰^{۲۴}$kg و $R_e = ۶۴۰۰$km)

۴۲. الف) در چه ارتفاعی از سطح زمین، وزن یک شخص به نصف مقدار خود در سطح زمین می‌رسد؟
ب) اگر جرم ماهواره‌ای ۲۵۰kg باشد، وزن آن در ارتفاع ۳۶۰۰۰ کیلومتری از سطح زمین چقدر خواهد شد؟

۴۳. الف) شتاب گرانشی ناشی از خورشید در سطح زمین چقدر است؟
ب) شتاب گرانشی ناشی از ماه در سطح زمین چقدر است؟
$M_{\text{خورشید}} = ۱/۹۹\times۱۰^{۳۰}$kg و $M_{\text{ماه}} = ۷/۳۶\times۱۰^{۲۲}$kg
فاصلهٔ زمین تا خورشید $= ۱۴۹/۶\times۱۰^{۶}$km
فاصلهٔ زمین تا ماه $= ۳/۸۴\times۱۰^{۵}$km

۴۴. الف) سفینه‌ای به جرم $۳/۰۰\times۱۰^{۴}$kg در وسط فاصلهٔ بین زمین و ماه قرار دارد. نیروی گرانشی خالصی را که از طرف زمین و ماه به این سفینه در این مکان وارد می‌شود به‌دست آورید (از داده‌های مسئله‌های قبل استفاده کنید).
ب) در چه فاصله‌ای از زمین، نیروی گرانشی ماه و زمین بر سفینه، یکدیگر را خنثی می‌کنند؟

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 می‌توان۱۴ جلسهٔ ۹۰ دقیقه‌ای به آموزش این فصل اختصاص داد.

۳
فصل

نوسان و موج

در طراحی و ساخت برج‌های بلند، توجه به قوانین فیزیکی نوسان و موج اهمیت زیادی دارد. در برخی از این برج‌ها آونگ‌های بسیار سنگینی (در حدود چند صد تن)، در طبقات بالایی نصب می‌کنند تا از نوسان‌های احتمالی برج کم کند. چگونه یک آونگ می‌تواند این نوسان‌ها را کاهش دهد؟

بخش‌ها

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

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*[۱] 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 *پترونا*س[۲] در مالزی است که در آن پلی هوایی به طول ۵۸/۴m و جرم ۷۵۰ تن که به دو ساق تکیه گاه 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

۲ــ Petronas 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 جرقهٔ (سیکل) نوسان گفته می‌شود. چنین نوسان‌هایی را که هر جرقهٔ آن در دوره‌های دیگر تکرار شود نوسان‌های دوره‌ای می‌نامند. مدت زمان یک جرقه، 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 ۳ـ۲ نمونه‌ای از نمودار الکتروقلب نگار[1] (نوار قلب) یک شخص[2]

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

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

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

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

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 :

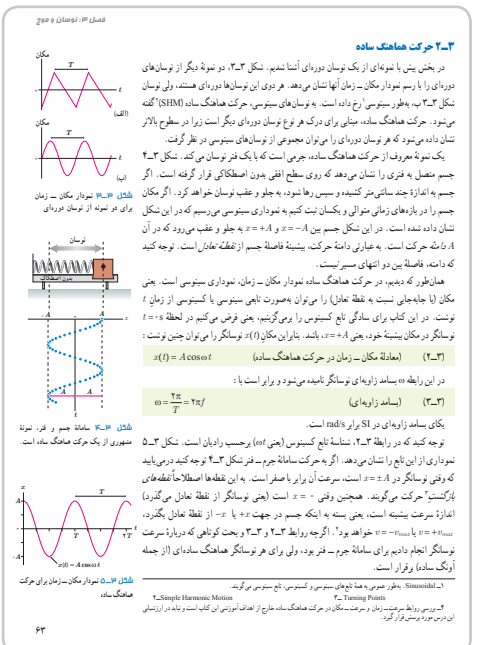
$$f=\frac{1}{T}=\frac{1}{0/92\text{s}}=1/09\ \text{Hz}\approx 1/1\text{Hz}$$

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.



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 ـ 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 نمودداری 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 دامنه حرکت است. به عبارتی دامنهٔ حرکت، بیشینهٔ فاصلهٔ جسم از نقطهٔ تعادل است. توجه کنید که دامنه، فاصله بین دو انتهای مسیر نیست.

همان‌طور که دیدیم، در حرکت هماهنگ ساده نمودار مکان ـ 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 مکان $x(t)$ نوسانگر را می‌توان چنین نوشت :

$$x(t)=A\cos\omega t \qquad \text{(معادلهٔ مکان ـ زمان در حرکت هماهنگ ساده)} \qquad (۳ـ۳)$$

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

$$\omega=\frac{2\pi}{T}=2\pi f \qquad \text{(بسامد زاویه‌ای)} \qquad (۳ـ۴)$$

یکای بسامد زاویه‌ای در SI برابر rad/s است.

توجه کنید که در رابطهٔ ۳ـ۳، تناسبهٔ تابع کسینوسی ($\cos\omega t$) برحسب رادیان است. شکل ۳ـ۵ نموداری از این تابع را نشان می‌دهد. اگر به حرکت سامانهٔ جرم ـ 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 ـ فنر بود، ولی برای هر نوسانگر هماهنگ ساده‌ای (از جمله آونگ ساده) برقرار است.

شکل ۳ـ۳ نمودار مکان ـ زمان برای دو نمونه از نوسان دوره‌ای

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

شکل ۳ـ۵ نمودار مکان ـ 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 بررسی روابط سرعت ـ زمان و سرعت ـ مکان در حرکت هماهنگ ساده، خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و جایه در ارزشیابی این درس مورد پرسش قرار گیرد.

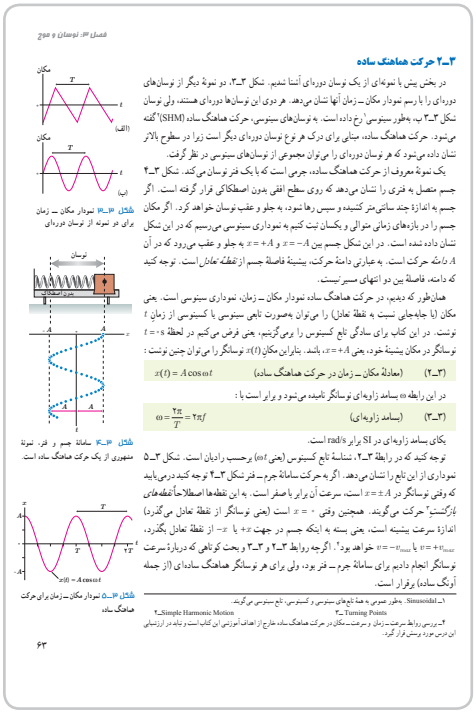
۶۳

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.

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.

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



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، 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 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 نمودداری 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 $t=0$ نوسانگر در مکان بیشینهٔ خود، یعنی $x=+A$، باشد. بنابراین مکان $x(t)$ نوسانگر را می‌توان چنین نوشت :

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

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

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

یکای بسامد زاویه‌ای در SI برابر rad/s است.

توجه کنید که در رابطهٔ ۳ــ۲، 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 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 ارزشیابی این درس مورد پرسش قرار گیرد.

۶۳

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.

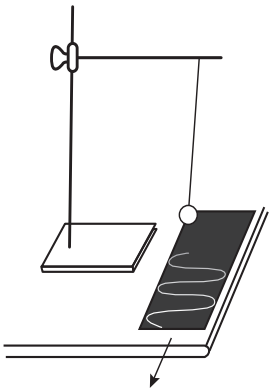
فیلم

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 ۱cm 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 درآورید 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 ۰/۲۰ Hz و دامنهٔ ۳/۰ cm 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؟

مکان (cm)

زمان (s)

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

که در آن:

$$A = 0/030\,m\ ,\ \omega = 2\pi f = 2\pi\,(0/20\,s^{-1}) = 0/40\pi\ rad/s\ ,\ t = 10/66\,s$$

در نتیجه، در یکای SI داریم[3]:

$$x = (0/030\,m)\cos(0/40\pi\ rad/s \times 10/66\,s) = 0/020\,m$$

تمرین ۳ــ۱

ذره‌ای در حال نوسان هماهنگ ساده با دورهٔ تناوب T است. با فرض اینکه در $t = 0\,s$ ذره در $x = +A$ باشد، تعیین کنید در هر یک از لحظات زیر، آیا ذره در $x = -A$، در $x = +A$، یا در $x = 0$ خواهد بود؟ الف) $t = 2/00\,T$ ب) $t = 3/50\,T$ پ) $t = 5/25\,T$

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

۱ـ Tuning Fork

۲ـ Oscillogram

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

۶۴

فیلم

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

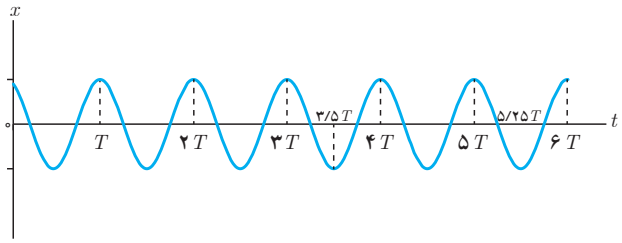
در اینجا خوب است توجه کنید در برخی از تمرین‌ها و مسئله‌های این مبحث، از جمله مثال ۳ــ۱، دانش‌آموزان ناگزیرند از ماشین‌حساب با قابلیت انجام محاسبه روابط مثلثاتی استفاده کنند و همان‌طور که در پانوشت کتاب نیز آمده است به دانش‌آموزان گوشزد کنید در این صورت توجه کنند که در محاسباتی از قبیل آنچه در مثال ۳ــ۱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

فیلم

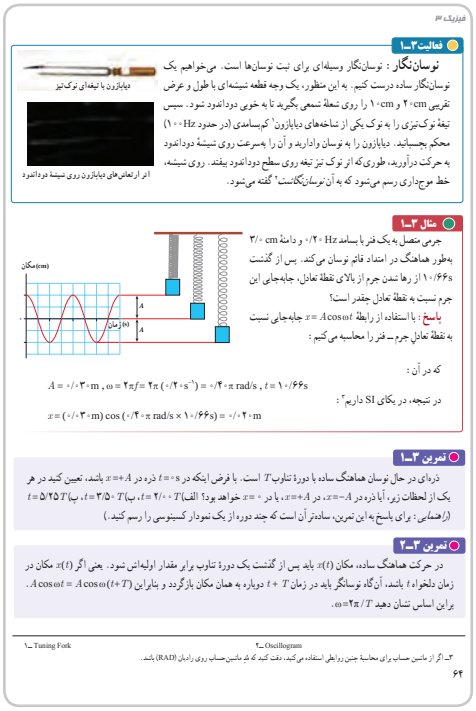
در این فیلم، نمایشی از رسم تابع سینوسی مثال ۳ــ۱ را می‌بینید.

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 شیشه‌ای با طول و عرض تقریبی ۲۰cm و ۱۰cm را روی شعلهٔ شمعی بگیرید تا به خوبی دوده‌نمود شود. سپس تیغهٔ نوک‌تیزی را به نوک یکی از شاخه‌های دیاپازون[1] کم‌بسامدی (در حدود ۱۰۰Hz) محکم بچسبانید. دیاپازون را به نوسان دادارید و آن را به‌سرعت روی سطح دوده‌نمود شیشه، به حرکت درآورید، طوری که از نوک تیز تیغه روی سطح دوده‌نمود بیفتد. روی شیشه، خط موج‌داری رسم می‌شود که به آن *نوسان‌نگاشت*[2] گفته می‌شود.

دیاپازون با تیغه‌ای نوک‌تیز

اثر ارتعاش‌های دیاپازون روی شیشهٔ دوده‌نمود

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 ـ فنر را محاسبه می‌کنیم :

که در آن :

$$A = ۰/۰۳۰\text{m}\ ,\ \omega = ۲\pi f = ۲\pi\,(۰/۲۰\text{s}^{-1}) = ۰/۴۰\pi\ \text{rad/s}\ ,\ t = ۱۰/۶۶\text{s}$$

در نتیجه، در یکای SI داریم[3] :

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

تمرین ۳ــ۱

ذره‌ای در حال نوسان هماهنگ ساده با دورهٔ تناوب T است. با فرض اینکه در $t = ۰$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 کار 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.

در این فیلم چگونگی ساختن فنرهای عظیم را می‌بینید.

فیلم

فصل ۳: نوسان و موج

آزمایش‌های متعدد با جرم و فنر نشان می‌دهد که افزایش جرم m در سامانهٔ جرم ــ فنر (یا 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 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 معین 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 معین 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 :

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

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

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

مثال ۳ــ۲

قطعه‌ای به جرم ۶۸۰ g به فنری با ثابت فنر $k = 65\ \mathrm{N/m}$ بسته شده است. قطعه را به اندازهٔ مشخصی از مکان تعادل خود روی یک سطح افقی بدون اصطکاک می‌کشیم و از حالت سکون رها می‌کنیم. الف) دورهٔ تناوب و ب) بسامد زاویه‌ای نوسان چقدر می‌شود؟

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

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

ب) بسامد زاویه‌ای از رابطهٔ ۳ــ۵ به‌دست می‌آید :

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

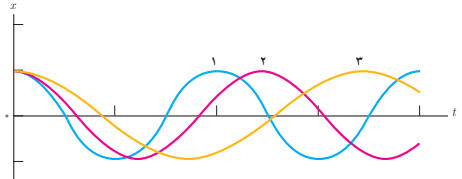
۶۵

هانریش هرتز (۱۸۹۴ــ۱۸۵۷ م.)
در آلمان به دنیا آمد. او در ابتدا به رشته‌های معماری و مهندسی علاقه‌مند بود، اما طیِ زود از این علاقه دست کشید و به علوم پایه دل بست. او در دانشگاه برلین تحصیل کرد و از شاگردان هرمن لودویگ فلمهولتز بود. هرتز پس از فارغ‌التحصیلی به تحقیق دربارهٔ نظریهٔ الکترومغناطیسی 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 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.

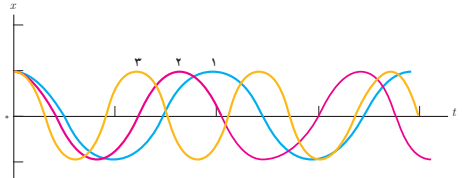
پاسخ فعالیت ۳ــ۲

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.

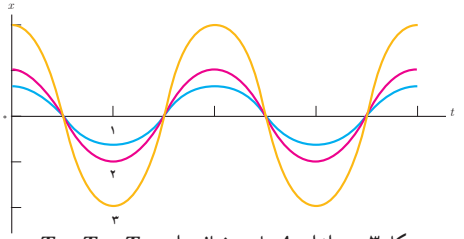
یک فعالیت پیشنهادی دیگر در امتداد این فعالیت این است که از دانش‌آموزان بخواهید با رسم نمودارهای $x-t$، یک‌بار برای سه جرم متفاوت و ثابت نگه داشتن k و A، یک‌بار برای سه ثابت فنر متفاوت و ثابت نگه داشتن m و A و یک‌بار برای سه دامنهٔ متفاوت و ثابت نگه داشتن m و k، دوره‌های تناوب را مقایسه کنند. آنها باید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



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



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



شکل ۳ــ به ازای Aهای 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 ۳ــ۲ 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 ــ فنر (یا 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 (kهای متفاوت) انجام دهیم، درمی‌یابیم که با افزایش ثابت فنر k دورهٔ تناوب Tی 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 معین 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 معین 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 :

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

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

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

مثال ۳ــ۲

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

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

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

ب) بسامد زاویه‌ای از رابطهٔ ۳ــ۵ به‌دست می‌آید :

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

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 لودویگ فردیناند هلمهولتز بود. هرتز پس از فارغ‌التحصیلی به تحقیق دربارهٔ نظریهٔ الکترومغناطیسی 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.

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 ۳ــ۴ 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 $1\,s$ حول مکان تعادل نوسان می‌کند. ثابت فنر درون این ترازو چقدر است؟

پاسخ : دوباره از رابطهٔ ۳ــ۴ 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 ۲۷۰ N/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 ۲/۰ s 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 :

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

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

ب) با استفاده از راهنمایی داریم :

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

که در آن

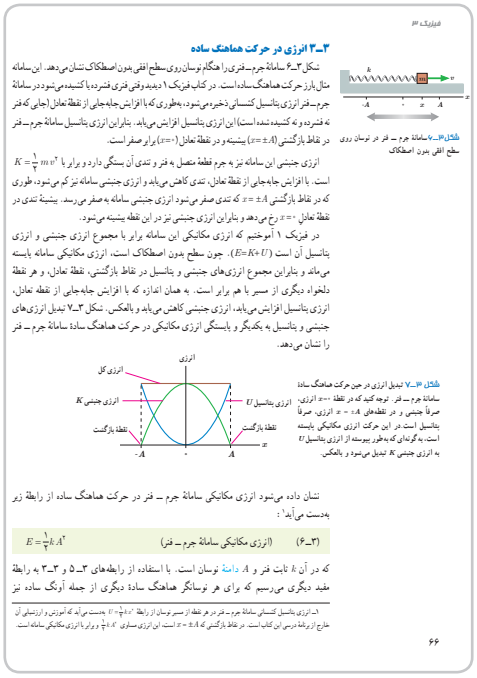
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{۲۷۰\,N/m}{۸۵/۰\,kg}} = ۱/۸۰\,rad/s$$

و در نتیجه :

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

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.



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 ۳ــ۷ تبدیل انرژی در حین حرکت هماهنگ ساده سامانهٔ جرم ــ فنر. توجه کنید که در نقطهٔ $x=-A$ انرژی، صرفاً جنبشی و در نقطه‌های $x=A$ و $x=-A$ انرژی، صرفاً پتانسیل است. در این حرکت انرژی مکانیکی بایسته است، به گونه‌ای که به‌طور بیوسته 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[۱]:

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

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

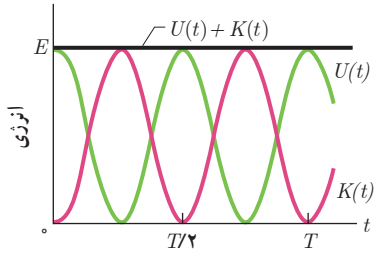
۱. انرژی پتانسیل کشسانی سامانهٔ جرم ــ فنر در هر نقطه از مسیر نوسان از رابطهٔ $U=\frac{1}{2}kx^2$ به‌دست می‌آید که آموزش و ارزشیابی آن خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است. در نقاط بازگشتی که $x=\pm A$ است، این انرژی برابر $E=\frac{1}{2}kA^2$ و برابر با انرژی مکانیکی سامانه است.

۶۶

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

فیلم

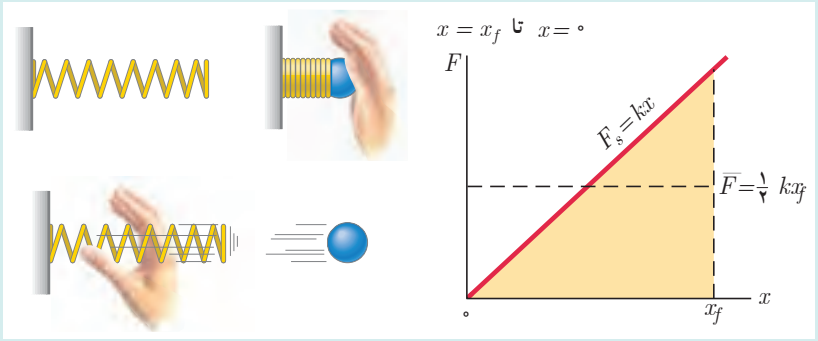
دراینجا حتماً اشاره شود که انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی نوسانگر به زمان وابسته است (شکل زیر) ولی انرژی مکانیکی سامانهٔ جرم ــ فنر ثابت و مستقل از زمان است.



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 $\overline{F} = \frac{F + ۰}{۲} = \frac{F}{۲}$ در نظر گرفت. آنگاه طبق تعریف کار، برای کار نیروی فنر داریم :

$$W = \overline{F} d \cos\theta = (\frac{F}{۲}) x \cos ۱۸۰^\circ = (\frac{kx}{۲})(x)(-۱) = -\frac{۱}{۲} kx^۲$$

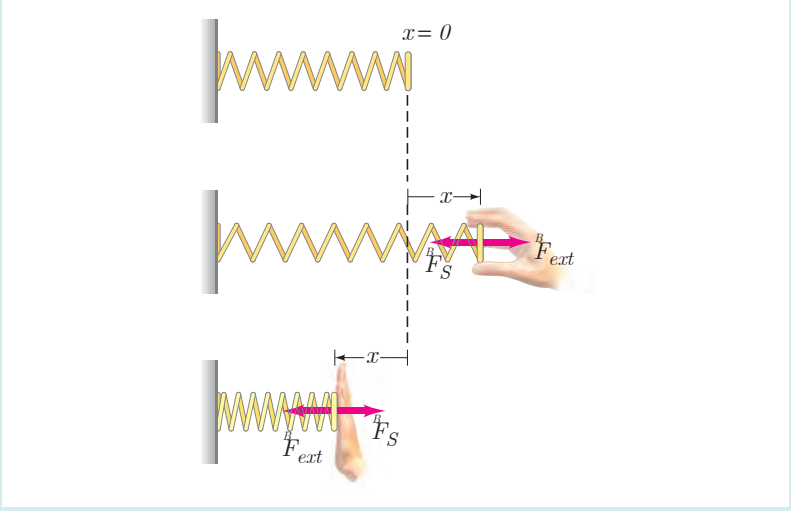
با توجه به اینکه تغییر انرژی پتانسیل فنر با منفی کار نیروی کشسانی فنر برابر است، داریم

$$\Delta U = -W$$

$$U - U_۰ = -(-\frac{۱}{۲} kx^۲) = \frac{۱}{۲} kx^۲$$

اگر انرژی پتانسیل فنر با طول واهلیده را صفر درنظر بگیریم ($U_۰ = ۰$)، برای فنر که به اندازهٔ x کشیده یا فشرده شده است خواهیم داشت.

$$U = \frac{۱}{۲} kx^۲$$



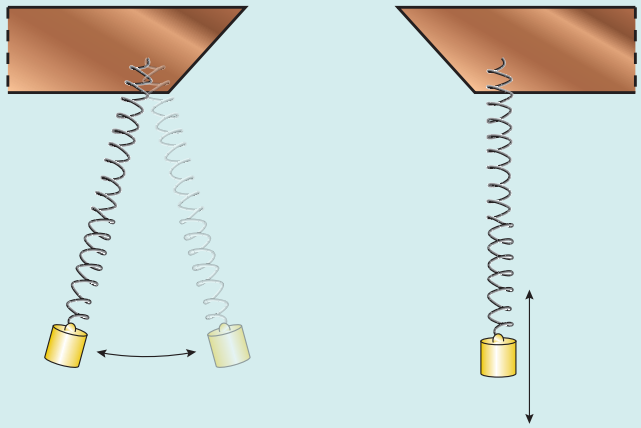
شکل ۲ـ (الف) فنر ابتدا در طول واهلیدهٔ خود است و سپس با اعمال نیروی خارجی $\vec{F}_{ext}$، کشیده و (ب) فشرده شده است.

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.

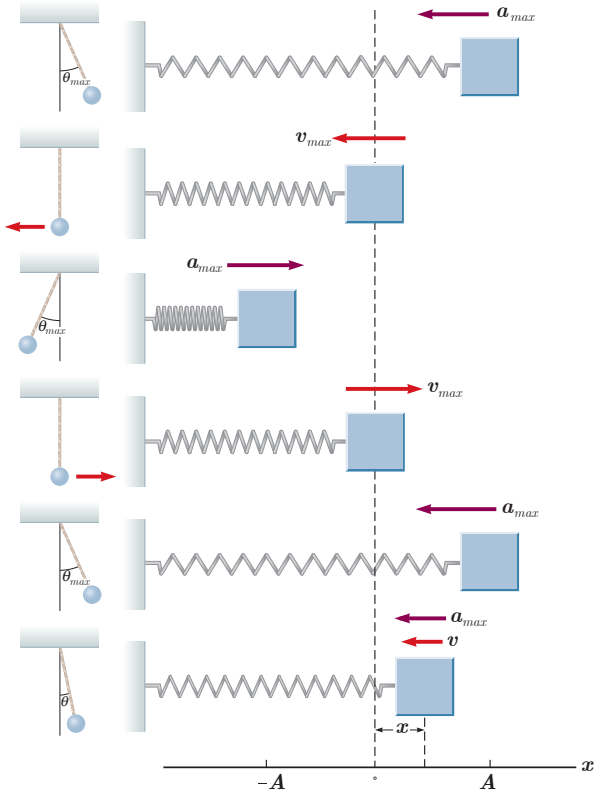
برای ساختن نوعی از آونگ‌های جفت شده دو نخ هم طول را به یک تختهٔ آویز وصل کنید و سپس با پیچیدن هر نخ دور یک میلهٔ افقی یا عبور دادن آن از این میله مانند شکل ب، انتهای دیگر هر نخ را بر وزنه‌های مشابهی وصل کنید به‌طوری که فاصلهٔ وزنه‌ها از میله حدوداً $\frac{۲}{۳}$ کل طول هر نخ باشد. حال اگر یکی از دو جرم 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.

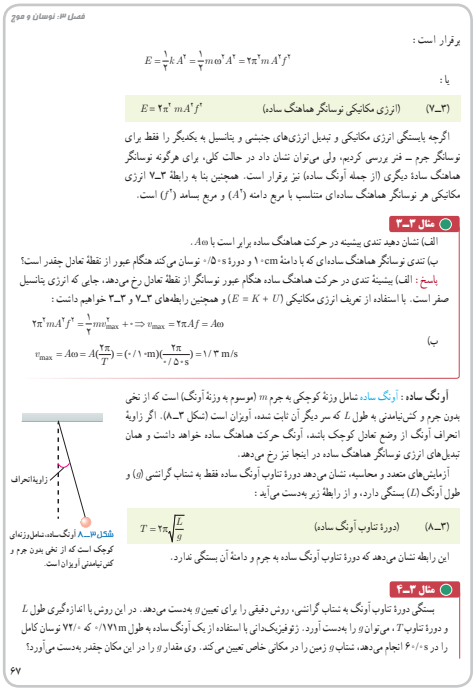


(ب) حرکت آونگی

(الف) نوسان فنرها

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:

$$E=2\pi^2mA^2f^2 \qquad (۳-۷)$$ (انرژی مکانیکی نوسانگر هماهنگ ساده)

اگرچه پایستگی انرژی مکانیکی و تبدیل انرژی‌های جنبشی و پتانسیل به یکدیگر را فقط برای نوسانگر جرم ــ فنر بررسی کردیم، ولی می‌توان نشان داد در حالت کلی، برای هرگونه نوسانگر هماهنگ سادهٔ دیگری (از جمله آونگ ساده) نیز برقرار است. همچنین بنا به رابطهٔ ۳ــ۷ انرژی مکانیکی هر نوسانگر هماهنگ ساده‌ای متناسب با مربع دامنه (A^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 ۱۰cm و دورهٔ ۰/۵۰s نوسان می‌کند هنگام عبور از نقطهٔ تعادل چقدر است؟

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

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

ب)

$$v_{max}=A\omega=A(\frac{2\pi}{T})=(0/1\,\text{m})(\frac{2\pi}{0/5\,\text{s}})=1/3\,\text{m/s}$$

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

زاویهٔ انحراف

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

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:

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

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

مثال ۳ــ۴

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

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:

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

که θ زاویهٔ انحراف آونگ است.

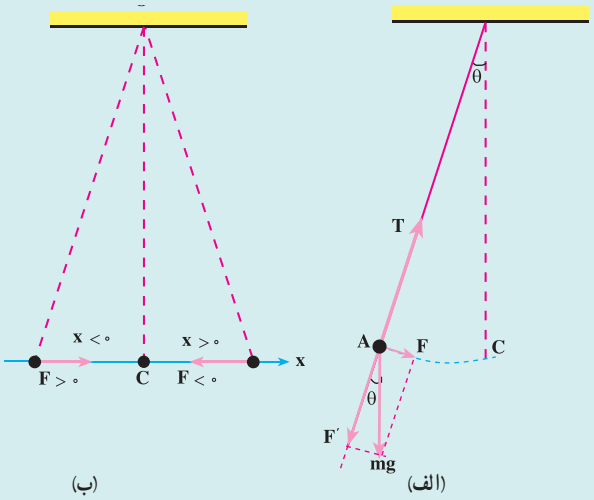
دانستنی معلم

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 :

$$a = \frac{F}{m} = \frac{-kx}{m} = -\frac{k}{m}x = -\omega^2 x \qquad (۲)$$

پس

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

و در نتیجه

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

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 ۲۰۰ g و به طول ۱/۰ m 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.

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

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

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 هل می‌دهیم. بدیهٔ تشدید را می‌توان با فعالیت سادهٔ زیر بررسی کرد.

فعالیت ۳ـ۳

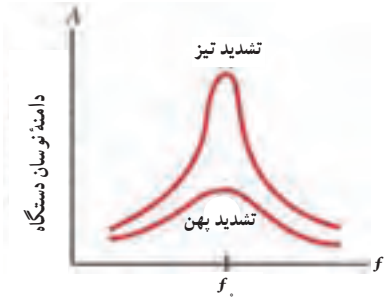
آونگ‌های بارتون[2]: یک آونگ با وزنهٔ سنگین و تعدادی آونگ سبک با طول‌های متفاوت را مطابق شکل سوار کنید. آونگ‌ها روی نخی سوار شده‌اند که هر دو انتهای آن توسط گیره‌هایی به تختهٔ آویز متصل شده است. به آونگ سنگین اصطلاحاً آونگ *وادارنده*[3] گفته می‌شود، زیرا به نوسان درآوردن این آونگ در صفحهٔ عمود بر صفحهٔ شکل، موجب تاب خوردن نخ آویز و در نتیجه به نوسان واداشتن سایر آونگ‌ها می‌شود. آونگ وادارنده را به نوسان درآورید و آنچه را مشاهده می‌کنید توضیح دهید.

۱ـ تداخلی پایین ۵ به معنی واداشته است.

۲ـ Barton's Pendulums

۳ـ Driver Pendulum

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

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 :

$$T=\frac{\text{زمان}}{\text{تعداد نوسان‌ها}}=\frac{۶۰/۰s}{۷۲۰}=۰/۸۳۳s$$

در نتیجه g چنین به‌دست می‌آید :

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

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 $f_0=\sqrt{k/m}/۲\pi$ 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[۱]. 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 هل 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[۲] : یک آونگ با وزنهٔ سنگین و تعدادی آونگ سبک با طول‌های متفاوت را مطابق شکل سوار کنید. آونگ‌ها روی نخی سوار شده‌اند که هر دو انتهای آن توسط گیره‌هایی به تختهٔ آویز متصل شده است. به آونگ سنگین اصطلاحاً آونگ *وادارنده*[۳] گفته می‌شود، زیرا به نوسان درآوردن این آونگ در صفحهٔ عمود بر صفحهٔ شکل، موجب تاب خوردن نخ آویز و در نتیجه به نوسان واداشتن سایر آونگ‌ها می‌شود. آونگ وادارنده را به نوسان درآورید و آنچه را مشاهده می‌کنید توضیح دهید.

۱ـ شاخص پایین d، برگرفتهٔ driven به معنی وادانشته است.

۲ـ Barton's Pendulums ۳ـ Driver Pendulum

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.

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.

فیلم

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 :

$$T=\frac{\text{زمان}}{\text{تعداد نوسان‌ها}}=\frac{۶۰/۰\,\text{s}}{۷۲۰}=۰/۸۳۳\,\text{s}$$

در نتیجه g چنین به‌دست می‌آید :

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

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 $f_۰=\sqrt{k/m}/۲\pi$ و بسامد طبیعی آونگ ساده $f_۰=\sqrt{g/L}/۲\pi$ است. اما این نوسانگرها می‌توانند با اعمال یک نیروی خارجی، با بسامدهای دیگری نیز به نوسان درآیند. به چنین نوسانی، نوسان وادانسته گفته می‌شود و بسامد این نوسان را با f_d نمایش می‌دهند[1]. مثالی از یک نوسان وادانسته، 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 وادانسته با بسامد طبیعی تاب برابر نشده است. در چنین وضعیتی ($f_d\neq f_۰$) اصطلاحاً گفته می‌شود که برای نوسانگر تشدید (رزونانس) رخ داده است. اگر تاب را با بسامدهایی بیشتر یا کمتر از بسامد طبیعی آن هُل دهیم، دامنهٔ نوسان کوچک‌تر از حالتی خواهد شد که آن را با بسامد طبیعی‌اش هل می‌دهیم. پدیدهٔ تشدید را می‌توان با فعالیت سادهٔ زیر بررسی کرد.

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

فعالیت ۳ــ۲

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.

۱ــ شاخص پایین d برگرفتهٔ driven به معنی وادانسته است.

۲ــ Barton's Pendulums ۳ــ 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.

در این فیلم تشدید آونگ‌های هم‌طول را می‌بینید.

فیلم

۱ــ beat

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.

فیلم

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 $mgL(۱ - \cos\alpha)$. 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 $\frac{\pi}{۲}$ نزدیک‌تر) باشد، مقدار انرژی‌ای که آونگ در نیم‌دوره دریافت می‌کند زیادتر است، یعنی دامنه به میزان بیشتری بزرگ‌تر می‌شود. چ

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.

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 :

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

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

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

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.

فصل ۳: نوسان و موج

تمرین ۳ــ۳

طول تعدادی آونگ ساده که از میله‌ای افقی آویزان‌اند، عبارت‌اند از: ۰/۴۰m ، ۰/۸۰m ، ۱/۲m ، ۲/۸m ، ۳/۵m. فرض کنید میله دستخوش 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 تشدید در بسامد مشخصی رخ می‌دهد، اما دامنهٔ نوسان در تزدیک این بسامد همچنان بزرگ است).

پرسش ۳ــ۲

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.

۳ــ۵ موج و انواع آن

هر گاه در ناحیه‌ای از یک محیط کشسان، ارتعاشی به‌وجود آید، موجب پدید آمدن ارتعاش‌های پی‌درپی دیگری می‌شود که از محل شروع ارتعاش دور و دورتر شد، 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 ۳ــ۱۰) و موج‌های صوتی ــ برای انتشار خود به یک محیط مادی نیاز دارند، و موج‌های الکترومغناطیسی ــ مانند نور مرئی، موج‌های رادیویی و تلویزیونی، میکروموج و پرتوهای x ــ برای انتشار خود به محیط مادی نیاز ندارند.

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

اگر مانند شکل ۳ــ۱۱ یک سر فنر بلند[۱] کشیده شده‌ای را به‌سرعت به جب و راست تکان دهید، موجی به شکل یک تپ در طول فنر منتشر می‌شود. وقتی سر آزاد فنر را مانند شکل ۳ــ۱۲ رو به بالا حرکت می‌دهید، بخش مجاور آن نیز از طریق کشش بین این دو بخش شروع به بالا رفتن می‌کند. وقتی بخش مجاور به بالا حرکت کند، این بخش نیز به نوبهٔ خود شروع به بالا کشیدن بخش بعدی می‌کند و این روند ادامه می‌یابد. به همین ترتیب، پایین کشیدن سر آزاد

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

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

شکل ۳ــ۱۱ نمایش ایجاد موج در یک فنر بلند کشیده

۶۹

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 ۳ــ۳ 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 تعدادی آونگ ساده که از میله‌ای افقی آویزان‌اند، عبارت‌اند از: ۰/۸۰m ،۰/۴۰m ،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 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 بایرجا 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.

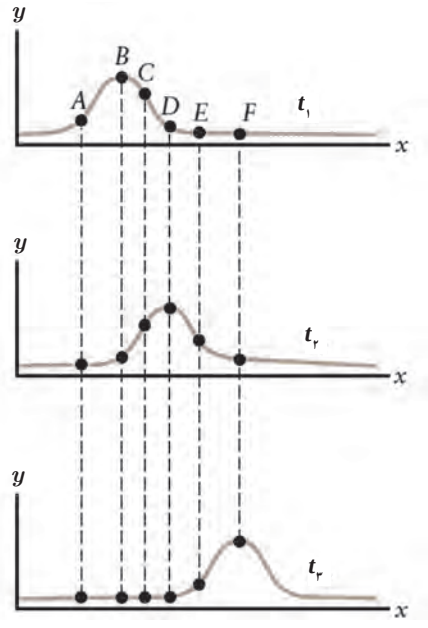
شکل ۳ـ۱۰ پارتاب سنگ در آب، فرورفتگی‌ها و برامدگی‌هایی دایره‌ای شکل بر سطح آب پخش می‌شوند.

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.



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

(ب) (الف)

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 دورتر شده، 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 قاعده‌های 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 ۳ـ۱۰ 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.

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.

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.

فیزیک ۳۲

راستای نوسان هر جزء فنر

راستای انتشار موج

شکل ۳ـ۱۲ در حالی که موج به سمت راست منتشر می‌شود هر جزء فنر عمود بر راستای انتشار موج، به بالا و پایین نوسان می‌کند.

شکل ۳ـ۱۳ تصویر 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 جلو و راست نوسان 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[1] در طول فنر حرکت می‌کند. اگر دست خود را پیاپی 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 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[1] در طول فنر به حرکت درمی‌آید. اگر به حرکت جزئی از فنر که در هنگام عبور این موج به جب 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 (جسمهٔ) نوسانی نیاز دارید و موج از این جسمه دور می‌شود، و اگر جسمه به‌طور هماهنگ ساده نوسان کند، اجزای محیط حول نقطهٔ تعادل خود با همان بسامد جسمه نوسان 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

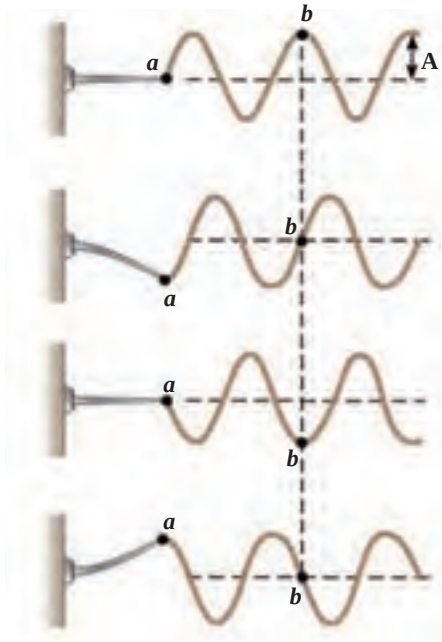
برای مطالعهٔ برخی از مشخصه‌های موج از وسیله‌ای موسوم به «تشت موج»[1] استفاده می‌شود. طرح ساده‌ای از این وسیله در شکل ۳ـ۱۵ نشان داده شده است. این وسیله شامل یک تشت شیشه‌ای کم‌عمق و یک نوسان‌ساز است. یک راه مشاهدهٔ رفتار موج، استفاده از سایه‌ای است که توسط لامب از سطح آب داخل تشت بر ورقهٔ کاغذی زیر تشت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

لامب — نوسان‌ساز — تشت موج — کاغذ سفید

شکل ۳ـ۱۵ طرحی از دستگاه تشت موج

۱ـ Ripple Tank

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

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 نمایی 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 جلو و راست نوسان 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 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 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 نوسان می‌کند دقت کنید، درمی‌یابید جابه‌جایی هر جزء نوسان‌کننده‌ای از فنر در راستای حرکت موج است (شکل ۳ـ۱۴). به همین دلیل است که به چنین موجی، موج طولی می‌گویند.

به موج‌های عرضی و طولی که تا اینجا بررسی شد، موج‌های پیش‌رونده گفته می‌شود. زیرا، هر دوی این موج‌ها از قطعه‌ای به قطعهٔ دیگر حرکت کرده و انرژی را با خود منتقل می‌کنند. توجه کنید *این موج‌ها از یک سر به سر دیگر حرکت می‌کنند نه ماده‌ای (در مثال‌های بالا فنر) که موج در آن حرکت می‌کند.* همچنین دریافتید که برای ایجاد چنین امواجی به یک جسم (چشمه) 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.

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[۱] 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

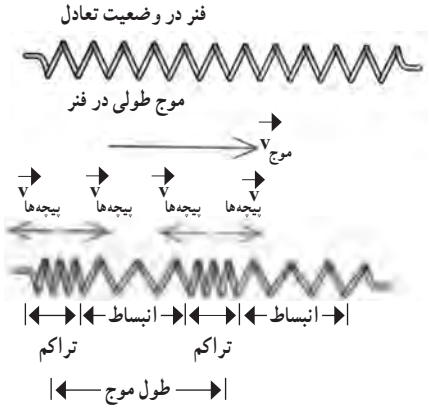
لامپ
نوسان‌ساز
تشت موج
کاغذ سفید

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.

در این فیلم یک ماشین سازندهٔ موج را می‌بینید.

فیلم

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

فیلم

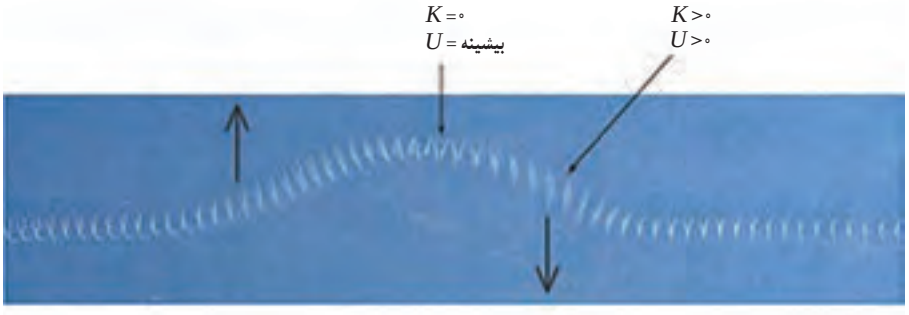
پاسخ پرسش ۳ـ۳

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. ۰/۸۰ s طول می‌کشد تا این تپ دوباره به وضعیت تعادل فنر بازگردد. اگر تپ با تندی ۲/۵m/s حرکت کند، طول تپ چقدر است؟

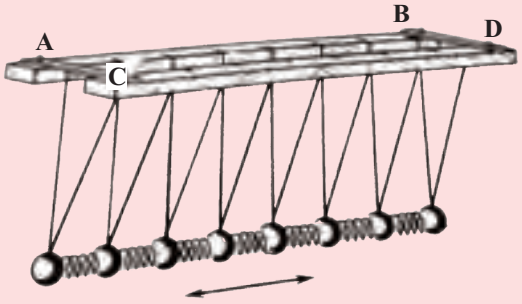
پاسخ : طول تپ از رابطه $l = v\Delta t$ به‌دست می‌آید :

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

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.

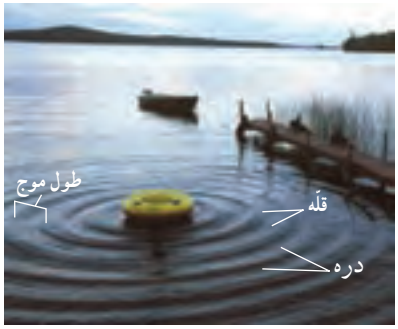
الف) تصویری واقعی از اسباب آزمایش

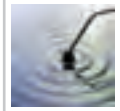


ب) طرحی از این اسباب آزمایش

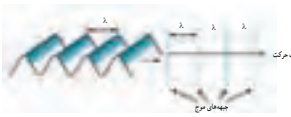
۲ ماشین سازندهٔ موج (Wave making machine) ماشین‌های سازندهٔ موج ابزاری جالب برای نمایش ایجاد موج هستند. مثلاً در شکل روبه‌رو شخصی با به نوسان درآوردن یک اسباب چوبی خودساخته، موجی پیشرونده ایجاد کرده است. با رجوع به وب‌گاه PracticalPhysics.org/ Building– wave– machine.html دانش‌آموزان را ترغیب کنید ماشین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

خوب است در کنار شکل ۳ــ۱۶، بلافاصله شکل‌هایی مانند شکلی که در مثال ۳ــ۵ آورده شده است را نیز به دانش‌آموزان نشان دهید تا با قله‌ها، دره‌ها و طول موج برای امواج دایره‌ای آشنا شوند.




شکل ۳ــ۱۷ تشکیل امواج دایره‌ای بر سطح آب یک تشت موج

روی سطح آب، به‌وضوح در سایهٔ تشکیل شده بر ورقهٔ کاغذ دیده می‌شود. اگر مانند شکل ۳ــ۱۵، 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 ۳ــ۱۶). در هر دو حالت، به هر یک از برآمدگی‌ها یا فرورفتگی‌های ایجادشده روی سطح آب، یک **جبههٔ موج** می‌گویند. به برآمدگی‌ها، **قله** (ستیغ) و به فرورفتگی‌ها **دَره** (یاستیغ) گفته می‌شود. فاصلهٔ بین دو برآمدگی یا دو فرورفتگی مجاور، **طول موج** نامیده می‌شود و آن را با λ نشان می‌دهند (شکل ۳ــ۱۷). طول‌موج λ برابر با مسافتی است که موج در مدت دورهٔ تناوب نوسان چشمه طی می‌کند.



شکل ۳ــ۱۷ طرحی از تشکیل جبه‌های موج تخت بر سطح آب یک تشت موج. جبه‌های 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 :

$$v=\frac{\lambda}{T}=\lambda f \qquad \text{(تندی انتشار موج)} \qquad (۳ــ۹)$$

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

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.

فیلم

مثال ۳ــ۵

امواج دایره‌ای تشکیل شده بر سطح آب تشت موج شکل ۳ــ۱۶ را در نظر بگیرید. آزمایش نشان داده است اگر گوی متحرک با دورهٔ تناوب 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 ۳ــ۹ به‌دست می‌آوریم.

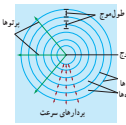
با قرار دادن $\lambda_1=0/05\,m$ و $T=0/1\,s$ در رابطهٔ ۳ــ۹ خواهیم داشت :

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

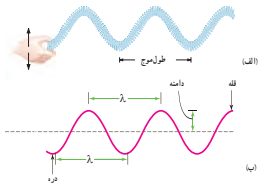
و با قرار دادن $\lambda_2=0/06\,m$ و $T=0/1\,s$ در رابطهٔ ۳ــ۹ خواهیم داشت :

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

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 ۳ــ۱۸ الف). امواج عرضی، همانند موج عرضی ایجاد شده در این فنر، در هر لحظه از زمانِ انتشار موج را می‌توان با شکل موجی سینوسی مانند شکل ۳ــ۱۸ ب مدل‌سازی کرد. در این شکل طول‌موج و دامنهٔ این موج عرضی، نیز نشان داده شده است.



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

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* [۱] (۱۹۳۴ــ ۱۸۴۹م.) ریاضی‌دان و فیزیک‌دان انگلیسی در سال ۱۸۹۵ میلادی، در کتاب *هیدرودینامیک* [۲] خود رابطه‌ای کلی برای تندی این امواج در شرایط آرمانی به‌دست آورد که این رابطه برای عمق‌های زیاد (بزرگ‌تر از نصف طول موج) به‌صورت

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

۱ــ Sir Horace Lamb

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

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

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

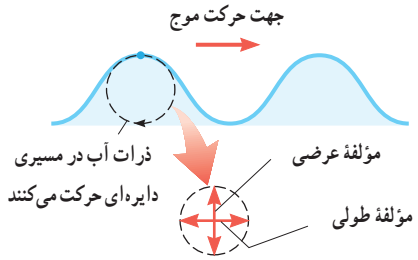
که در آنها g شتاب گرانشی است. به عبارت دیگر درمی‌یابیم تندی انتشار امواج سطحی برای عمق‌های کم با افزایش عمق زیاد می‌شود، درحالی که برای عمق‌های زیاد، این تندی نه به عمق آب، بلکه به طول موج بستگی دارد، به‌طوری که با افزایش طول موج، تندی افزایش می‌یابد. در حالت کلی این تندی از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید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

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

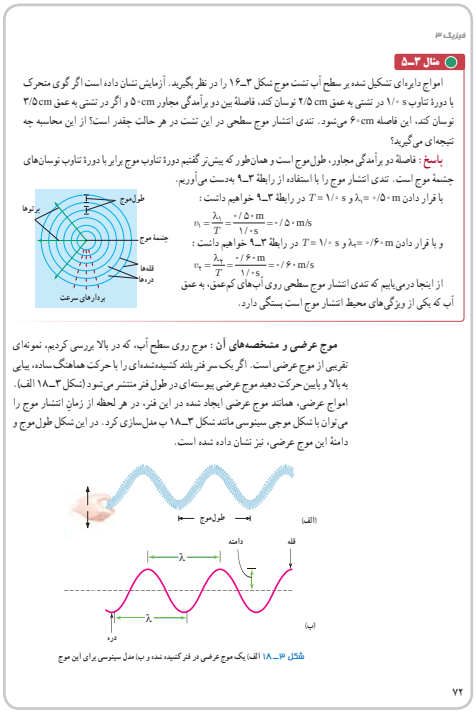
در این مبحث خواندن مقالهٔ زیر نیز خالی از لطف نیست

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 ۰/۱ s در تشتی به عمق ۲/۵ cm نوسان کند، فاصلهٔ بین دو برآمدگی مجاور ۵۰ cm و اگر در تشتی به عمق ۳/۵ cm نوسان کند، این فاصله ۶۰ cm می‌شود. تندی انتشار موج سطحی در این تشت در هر حالت چقدر است؟ از این محاسبه چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

پاسخ : فاصلهٔ دو برآمدگی مجاور، طول‌موج است و همان‌طور که پیش‌تر گفتیم دورهٔ تناوب موج برابر با دورهٔ تناوب نوسان‌های چشمهٔ موج است. تندی انتشار موج را با استفاده از رابطهٔ ۳ـ۹ به‌دست می‌آوریم.

با قرار دادن $\lambda_۱ = ۰/۵۰\,m$ و $T = ۱/۰\,s$ در رابطهٔ ۳ـ۹ خواهیم داشت :

$$v_۱ = \frac{\lambda_۱}{T} = \frac{۰/۵۰\,m}{۱/۰\,s} = ۰/۵۰\,m/s$$

و با قرار دادن $\lambda_۲ = ۰/۶۰\,m$ و $T = ۱/۰\,s$ در رابطهٔ ۳ـ۹ خواهیم داشت :

$$v_۲ = \frac{\lambda_۲}{T} = \frac{۰/۶۰\,m}{۱/۰\,s} = ۰/۶۰\,m/s$$

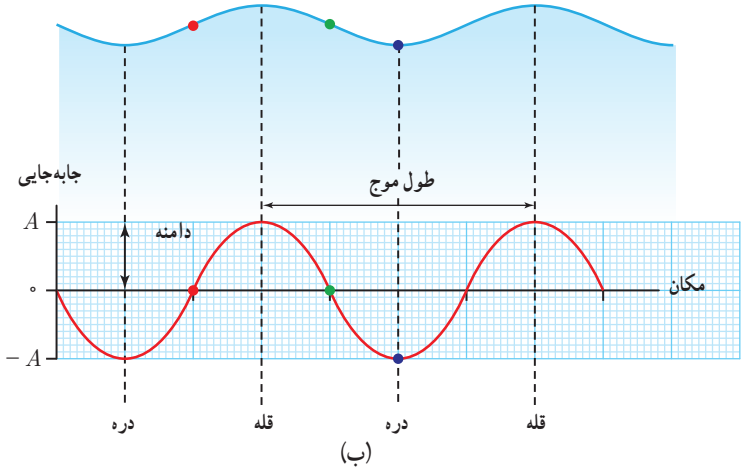
از اینجا درمی‌یابیم که تندی انتشار موج سطحی روی آب‌های کم‌عمق، به عمق آب که یکی از ویژگی‌های محیط انتشار موج است بستگی دارد.

طول‌موج
چشمهٔ موج
پرتوها
قله‌ها
دره‌ها
پرده‌های 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 هماهنگ‌ساده، 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

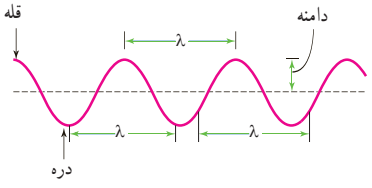


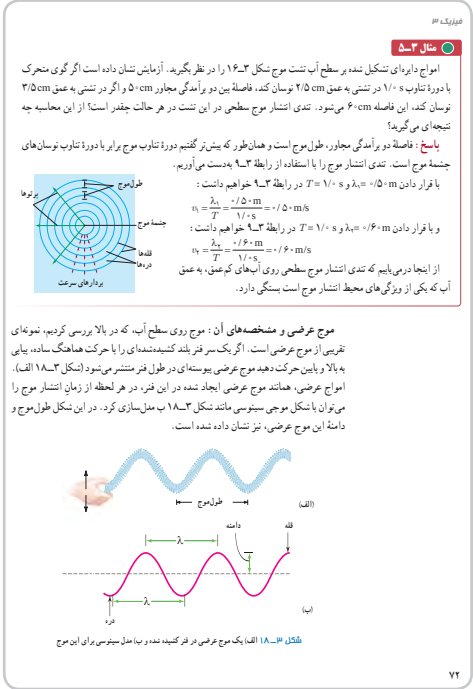
(ب)

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 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.

طول‌موج
پرتوها
جبهه موج
قله‌ها
دره‌ها
بردارهای 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 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.

طول‌موج
(الف)
دامنه
قله
λ
λ
دره
(ب)

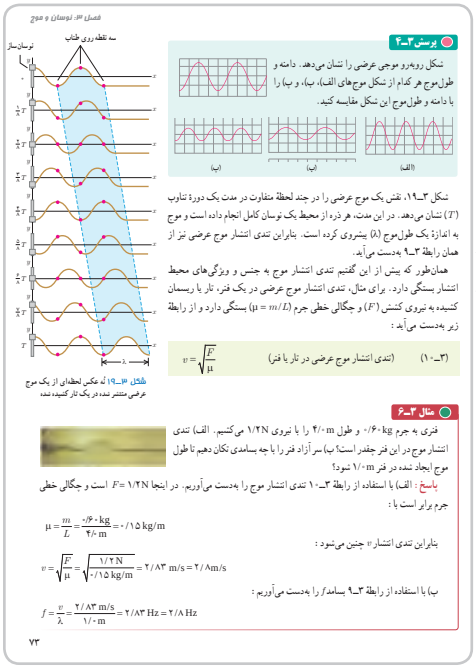
شکل ۳ـ۱۸ الف) یک موج عرضی در فنر کشیده شده و ب) مدل سینوسی برای این موج

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:

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

مثال ۳ــ۶

فنری به جرم ۰/۶۰ kg و طول ۲/۰ m را با نیروی ۱/۲ N 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 ۱/۰ m شود؟

پاسخ: الف) با استفاده از رابطهٔ ۳ــ۱۰ تندی انتشار موج را به‌دست می‌آوریم. در اینجا $F = 1/2\,N$ است و چگالی خطی جرم برابر است با:

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{0/60\,kg}{2/0\,m} = 0/30\,kg/m$$

بنابراین تندی انتشار v چنین می‌شود:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{1/2\,N}{0/30\,kg/m}} = 2/83\,m/s = 2/8\,m/s$$

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

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{2/83\,m/s}{1/0\,m} = 2/83\,Hz = 2/8\,Hz$$

۷۳

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

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 :

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

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

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

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

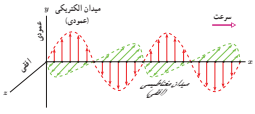
فیزیک ۳

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

انتقال انرژی در موج عرضی : هر موجی حامل انرژی است. وقتی در یک ریسمان یا فنر کشیده موجی عرضی را ایجاد می‌کنیم، در واقع، انرژی را برای ایجاد موج در ریسمان فراهم کرده‌ایم. با انتشار موج، این انرژی به‌صورت انرژی جنبشی و پتانسیل در ریسمان انتقال می‌یابد. انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل لازم برای حرکت و کشیدگی هر جزء ریسمان 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 (A²) و نیز مربع بسامد (f²) 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. 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 پدیده نتیجه گرفت که امواج الکترومغناطیسی باید لزوماً ناشی از تغییرات هم‌زمان 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.



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.

جیمز کلارک ماکسول (۱۸۷۹ــ۱۸۳۱ م.)
در شهر ادینبورگ اسکاتلند زاده شد. جیمز در دوران دانش‌آموزی بسیار کنجکاو بود و به ساختن اسباب‌ها و دستگاه‌های فنی علیق علاقه داشت و بدرش هم او را به این کار تشویق می‌کرد. وی در دانشگاه‌های ادینبورگ و کمبریج تحصیل نمود. ماکسول قدرت شگرفی در تجزیه و تحلیل مسائل ریاضی داشت و با استفاده از روش‌های ریاضی توانست روی مسئله‌های سیارزحل 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 دستگاه‌های مانند رادیو، تلویزیون، رادار و غیره گشود که همگی بر اساس امواج الکترومغناطیس کار می‌کنند.

۷۴

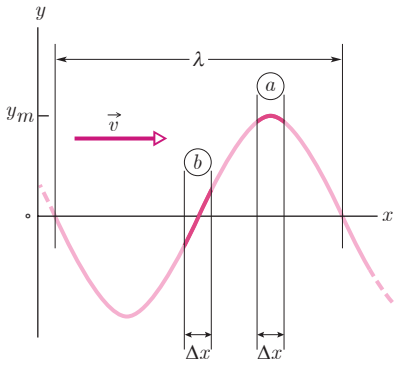
خوب است در انتهای تمرین ۳ــ۴ اشاره شود که انتشار موج‌های عرضی در طول یک تار کشیده در چگونگی کار سازهای موسیقایی زهی نظیر تار، گیتار، کمانچه، ویولن، پیانو، سنتور و... اهمیت دارد. در این سازها، تار توسط زخمه، آرشه، ضربه، چوب کمانه و... نواخته می‌شود. با سفت یا شل کردن تار، تندی انتشار موج عرضی در تار تغییر 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 داراست.

خوب است بدانید رابطهٔ دقیق متوسط انتقال انرژی در ریسمان به‌صورت $\overline{P} = 2\pi^2 \mu v f^2 A$ 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 هماند تار، کمانچه و گیتار با سفت یا شل کردن تار، تندی انتشار موج عرضی در تار تغییر می‌کند. در یک گیتار طول هر تار بین دو انتهای ثابت ۰/۶۴m 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؟

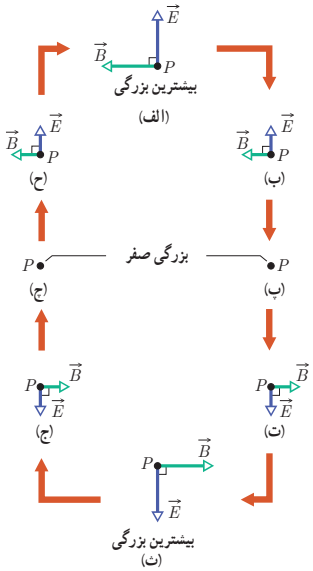
انتقال انرژی در موج عرضی : هر موجی حامل انرژی است. وقتی در یک ریسمان یا فنر کشیده موجی عرضی را ایجاد می‌کنیم، در واقع، انرژی را برای ایجاد موج در ریسمان فراهم کرده‌ایم. با انتشار موج، این انرژی به‌صورت انرژی جنبشی و پتانسیل در ریسمان انتقال می‌یابد. انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل لازم برای حرکت و کشیدگی هر جزء ریسمان با قدر را شخصی تأمین می‌کند که سر ریسمان با قدر 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 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 هم‌زمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (اصطلاحاً میدان الکترومغناطیسی) باشند. 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.

جیمز کلارک ماکسول (۱۸۳۱ـ۱۸۷۹ م.)
در شهر ادینبورگ اسکاتلند زاده شد. جیمز در دوران دانش‌آموزی بسیار کنجکاو بود و به ساختن اسباب‌ها و دستگاه‌های قشنگ علاقه داشت و هنرش هم از او را به آن کار تشویق می‌کرد. وی در دانشگاه‌های ادینبورگ و کمبریج تحصیل نمود. ماکسول قدرت سنگرفی در تجزیه و تحلیل مسائل ریاضی داشت و با استفاده از روش‌های ریاضی توانست روی معادله‌های سیارات حل 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 گفتگوهای 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.

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 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 ۶۳۲mm/۰ 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. 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 پدیده نتیجه گرفت که امواج الکترومغناطیسی باید لزوماً ناشی از تغییرات هم‌زمان 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.

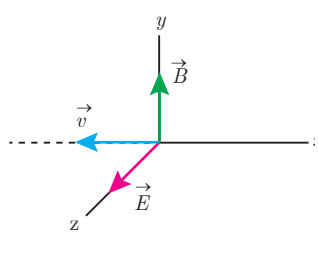
شکل ۳ــ۲۰ یک تصویر لحظه‌ای از موجی الکترومغناطیسی که میدان الکتریکی در امتداد قائم (y) و میدان مغناطیسی در امتداد افقی (z) و انتشار موج در جهت x است.

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

فیلم

پاسخ پرسش ۳ــ۵

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



فصل ۳: نوسان و موج

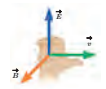
جند مشخصهٔ بارز چنین موجی به قرار زیر است:

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

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

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

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



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

پرسش ۳ــ۵

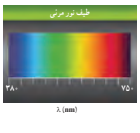
در یک لحظهٔ خاص، میدان الکتریکی مربوط به یک موج الکترومغناطیسی در نقطه‌ای از فضا در جهت $+z$ و میدان مغناطیسی مربوط به آن در جهت $+y$ است. جهت انتشار در کدام سو است؟ (جهت‌های $+x$، $-y$، $+y$ و $+z$ را مانند شکل ۳ــ۲۰ در نظر بگیرید.)

ماکسول با یک تحلیل ریاضی نشان داد که تندی انتشار امواج الکترومغناطیسی در خلأ از رابطهٔ $c=\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$ 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 $8/850\times10^{-12}\,C^2/N.m^2$ 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 (۱۸۱۹ــ۱۸۹۶م.) 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. هایریش 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 ۳ــ۷

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:

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

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

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

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.

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 هنگام 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 آرمانو 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 $7/9\times10^{14}\,Hz$ (نور بنفش) است. گسترهٔ طول موج‌های 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 :

$$\lambda_{\text{بنفش}}=\frac{c}{f_{\text{بنفش}}}=\frac{3/00\times10^8\,m/s}{7/9\times10^{14}\,s^{-1}}=3/80\times10^{-7}\,m=380\,nm$$

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

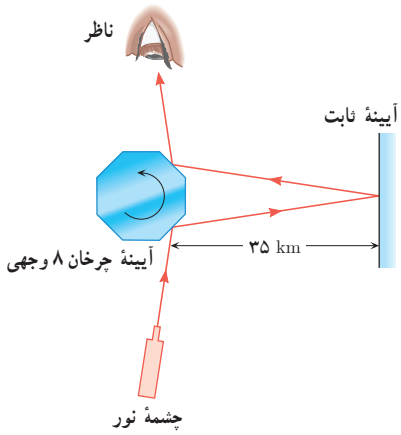
۷۵

دانستنی

اندازه‌گیری تندی نور

یک روش قدیمی برای اندازه‌گیری تندی نور، استفاده از چرخ دندانه‌دار چرخانی است. *آرماندلوئیس فیزو* (۱۸۹۶ ــ 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 ــ 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 ــ 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 ۲ـ 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 ($c = ۳/۰۰ \times ۱۰^{۸} \text{m/s}$) استفاده کنیم. از آنجا برای بسامد f خواهیم داشت:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{۴L} = \frac{۳/۰۰ \times ۱۰^{۸}\ \text{m/s}}{۴(۸/۵ \times ۱۰^{-۲}\ \text{m})} = ۸۸۲\ \text{MHz} \approx ۸/۸ \times ۱۰^{۸}\ \text{Hz}$$

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

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

فیلم

فیزیک ۳

تمرین ۳ــ۵

طول آنتن یک گوشی تلفن همراه قدیمی معمولاً $\frac{۱}{۴}$ طول‌موج دریافتی است. اگر طول جنین 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 نخلیهٔ هوای شیشه‌ای آویزان کنید. با برقراری تماس با گوشی، صدای آن را خواهید شنید. ولی با به کار افتادن پمپ نخلیهٔ 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 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

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 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 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.

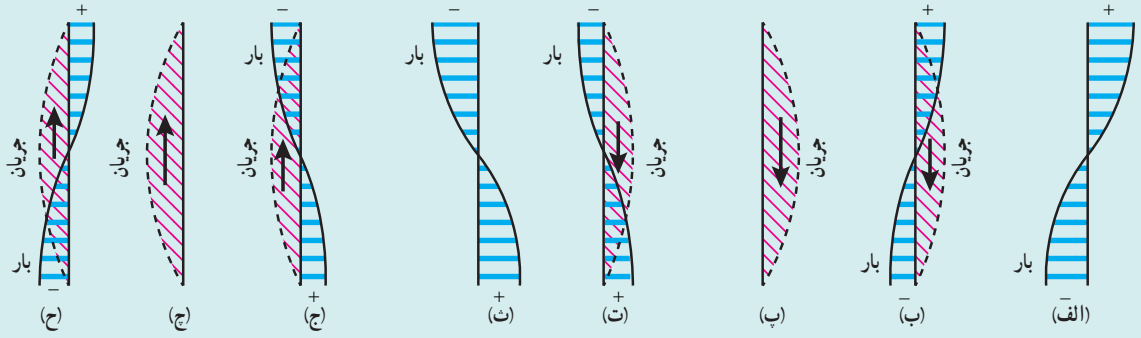
فیلم

در این فیلم طرحی از انتشار موج الکترومغناطیسی را می‌بینید.

فیلم

آنتن‌ها

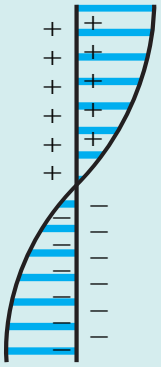
عامل اصل ایجاد موج‌های الکترومغناطیسی، ذرات باردار شتابدارند. در آنتن از یک منبع ولتاژ متناوب برای ایجاد نوسان بارالکتریکی استفاده می‌شود. از آنتن‌ها به‌عنوان چشمهٔ موج‌های الکترومغناطیسی در ایستگاه‌های رادیویی، مخابراتی و ... استفاده می‌شود. شکل ۱ چگونگی تولید یک موج الکترومغناطیسی را در یک آنتن نشان 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 حالی که 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).



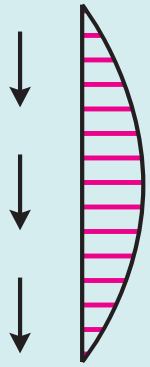
شکل ۱ــ نوسان‌های بار و جریان در نوسانگر (آنتن)

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 حالی که 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.

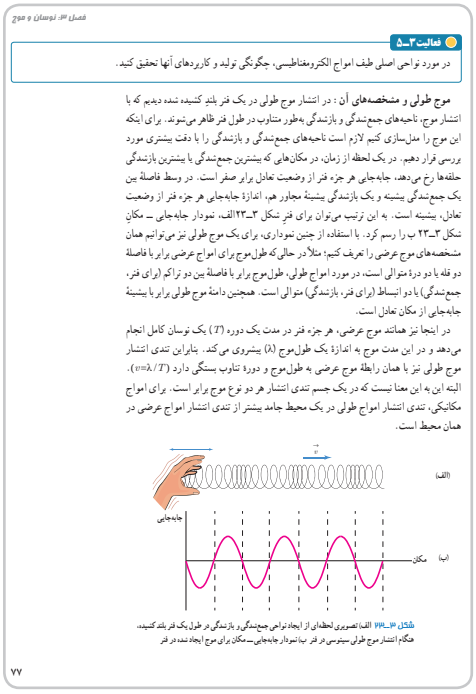
به این ترتیب، قوانین حاکم بر نوسان‌های الکتریکی در یک آنتن مشابه قوانین حاکم بر ارتعاش‌های کشسان تارند. به‌سهولت دیده می‌شود که توزیع جریان در آنتن (شکل ۳) دقیقاً همان توزیع دامنه در تاری است که در دو انتها ثابت شده باشد (شکل ۴ــ۳۷ فصل چهارم). توزیع بار در نوسانگر (شکل ۲) مشابه توزیع دامنهٔ ارتعاش ستون 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

$$l = \lambda/2$$

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 :

$$f = c/2l$$

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 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 مکان شکل ۳ــ۲۳ ب را رسم کرد. با استفاده از چنین نموداری، برای یک موج طولی نیز می‌توانیم همان مشخصه‌های موج عرضی را تعریف کنیم؛ مثلاً در حالی که طول‌موج برای امواج عرضی برابر با فاصلهٔ دو قله یا دو درهٔ متوالی است، در مورد امواج طولی، طول‌موج برابر با فاصلهٔ بین دو تراکم (یا فنر، جمع‌شدگی) یا دو انبساط (یا 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. نمودار جابه‌جایی ــ مکان برای موج ایجاد شده در فنر

۷۷

پاسخ فعالیت ۳ــ۵

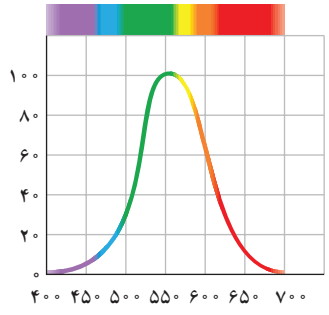
نواحی اصلی طیف امواج الکترومغناطیسی، به ترتیب از امواج کم‌بسامد تا امواج پُربسامد به قرار زیر هستند:

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.

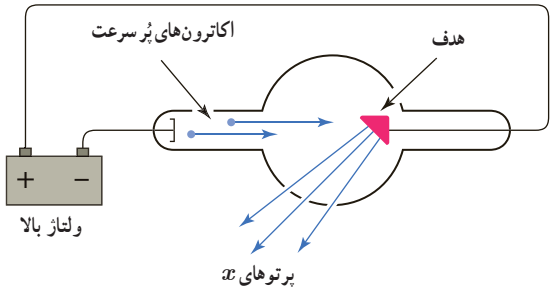
امواج نور مرئی: نور مرئی نوار باریکی از امواج الکترومغناطیسی را تشکیل می‌دهد که چشم عادی به آن واکنش می‌دهد. نور قرمز پایین‌ترین بسامد و بلندترین طول موج مرئی، و نور بنفش بیشترین بسامد و کوتاه‌ترین طول موج مرئی را دارد. در روشنایی، بیشترین حساسیت چشم مربوط به طول موج ۵۵۵nm است که به رنگ زرد ــ سبز تعلق 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 استریلیزه 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.

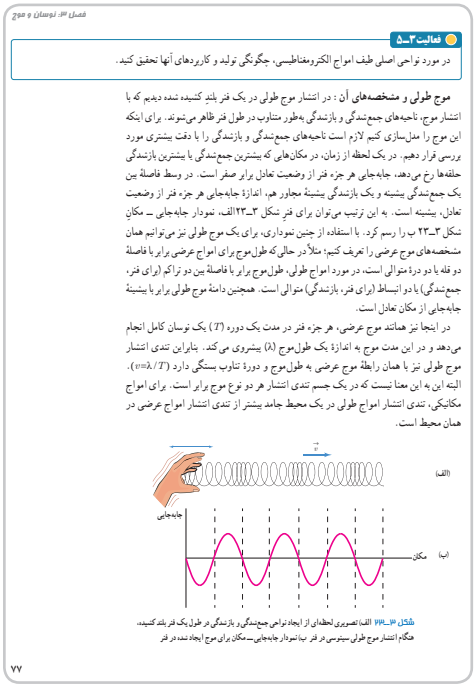
چون پرتوهای x به‌سادگی در بافت‌های زنده و اندام‌ها نفوذ و در نتیجه آنها را تخریب می‌کنند، باید مراقبت‌های ویژه‌ای برای پرهیز از دریافت غیرضروری این پرتوها صورت بگیرد. سرب با عدد اتمی ۸۲ محافظ خوبی برای مسدود کردن راه ورود پرتوهای x است.

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 (^{99}Tc)، ید ۱۲۵ (^{125}I)، ید ۱۳۱ (^{131}I)، کبالت (^{57}Co) و سزیم ۱۳۷ (^{137}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

خوب است در اینجا دوباره با اسباب فعالیت پیشنهادی بخش ۳ــ۵ 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.


فصل ۳: نوسان و موج

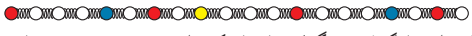
فعالیت ۳ــ۵

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

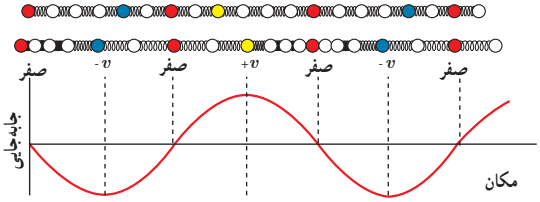
موج طولی و مشخصه‌های آن : در انتشار موج طولی در یک فنر بلند کشیده شده دیدیم که با انتشار موج، ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی به‌طور متناوب در طول فنر ظاهر می‌شوند. برای اینکه این موج را مدل‌سازی کنیم لازم است ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی را با دقت بیشتری مورد بررسی قرار دهیم. در یک لحظه از زمان، در مکان‌هایی 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 مکان شکل ۳ــ۲۳ ب را رسم کرد. با استفاده از چنین نموداری، برای یک موج طولی نیز می‌توانیم همان مشخصه‌های موج عرضی را تعریف کنیم؛ مثلاً در حالی که طول‌موج برای امواج عرضی برابر با فاصلهٔ دو قله یا دو درهٔ متوالی است، در مورد امواج طولی، طول‌موج برابر با فاصلهٔ بین دو تراکم (برای فنر، جمع‌شدگی) یا دو انبساط (برای فنر، بازشدگی) متوالی است. همچنین دامنهٔ موج طولی برابر با بیشینهٔ جابه‌جایی از مکان تعادل است.

در اینجا نیز همانند موج عرضی، هر جزء فنر در مدت یک دوره (T) یک نوسان کامل انجام می‌دهد و در این مدت موج به اندازهٔ یک طول‌موج (λ) پیشروی می‌کند. بنابراین تندی انتشار موج طولی نیز 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

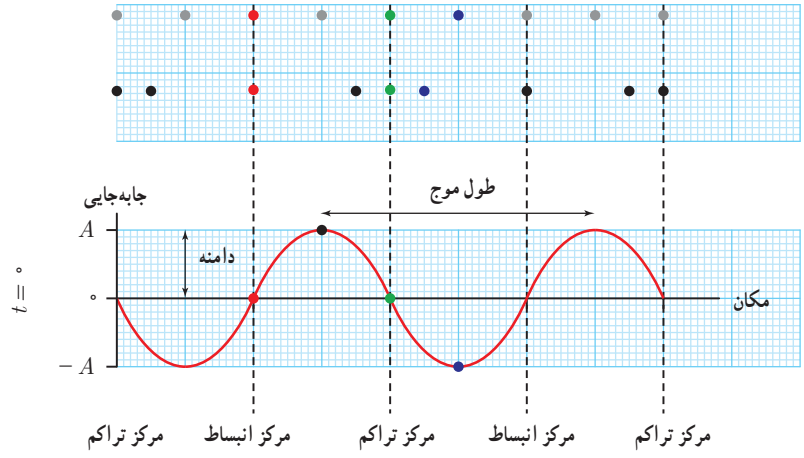


شکل الف) طرحی از گلوله‌های رنگی که در امتداد یک خط با فنرهایی به هم متصل شده‌اند.



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 ۳ـ۹ ($v=\lambda/f$) 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 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 فنر 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.

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

در این فیلم طرحی از انتشار موج طولی را می‌بینید.

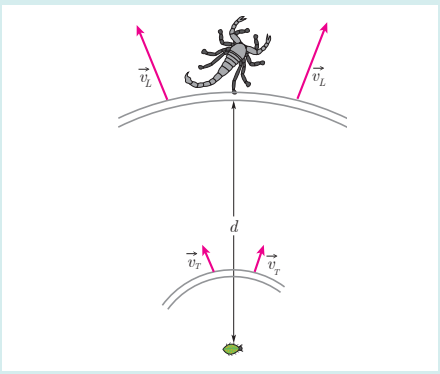
فیلم

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 5cm 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 ۳ـ۸

امواج لرزه‌ای 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[1] و امواج ثانویهٔ S[2] 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[3] 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

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

موج صوتی : صوت یک موج طولی است که توسط جسمی مرتعش از قبیل سیم گیتار، تارهای صوتی حنجره انسان، دیافازون، 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 ۳ـ۲۴ الف). پس از تولید یک ناحیهٔ متراکم، دیافراگم حرکتش

شکل ۳ـ۲۴ الف) با حرکت رو به بیرون دیافراگم، یک تراکم ایجاد می‌شود. ب) با حرکت رو به داخل دیافراگم، یک انبساط ایجاد می‌شود. این تراکم و انبساط شبیه به جمع‌شدگی و بازتندگی در یک فنر بلند است.

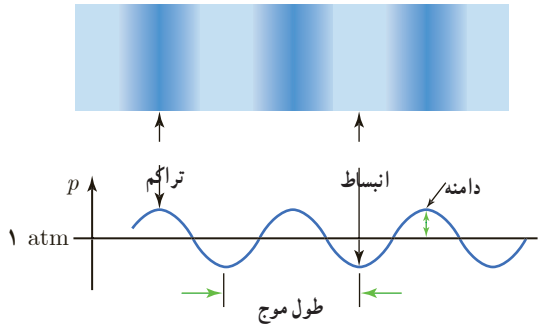
۱ـ Seismic Waves
۲ـ Primary Waves
۳ـ Secondary Waves
۴ـ Seismograph

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.

ارتعاش یک مولکول هوا

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

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 بازنندگی در یک فنر کشیده است که در آن موجی طولی روانه نشده است (شکل ۳ــ۲۴ب). توجه کنید، در حالی که موج از بلندگو به نشونده می‌رسد، هر مولکول هوا، با موج حرکت نمی‌کند، بلکه در مکان ثابتی به جلو و عقب نوسان می‌کند (شکل ۳ــ۲۵).

پرسش ۳ــ۶

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

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

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

جدول ۳ــ۱ تندی صوت در محیط‌های مختلف

محیط	تندی (m/s)
گازها*	
هوا (۰°C)	۳۳۱
هوا (۲۰°C)	۳۴۳
هلیم (۰°C)	۹۶۵
هیدروژن (۰°C)	۱۲۸۴
مایع‌ها	
متیل الکل (۲۵°C)	۱۱۴۳
آب (۰°C)	۱۴۰۲
آب (۲۰°C)	۱۴۸۲
آب دریا (۲۰°C و شوری ۳/۵٪)	۱۵۲۲
جامدها	
فولاد	۵۹۴۱
گرانیت	۶۰۰۰
آلومینیم	۶۴۲۰

* فشار همهٔ گازها ۱atm است.

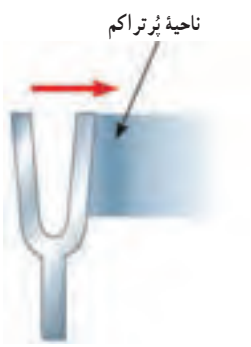
فعالیت ۳ــ۶

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

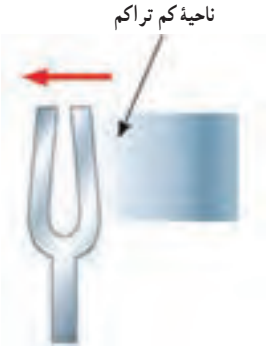
۱ــ Fast timer

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.



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



ب) وقتی شاخه‌های دیاپازون به هم نزدیک می‌شوند، لایهٔ هوای مجاور شاخه منبسط 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، منابه ناحیهٔ بازنمندگی در یک قفر کشیده است که در آن موجی طولی روانه نشده است (شکل ۳ـ۲۴ب). توجه کنید، درحالی که موج از بلندگو به شنونده می‌رسد، هر مولکول هوا، با موج حرکت نمی‌کند، بلکه در مکان تابی 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 دیابازون 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[۱] متصل کنید. این زمان‌سنج می‌تواند بازه‌های زمانی را با دقت میلی‌ثانیه اندازه‌گیری کند. وقتی چکش را به صفحهٔ فلزی بکوبیم، امواج صوتی که به سمت دو میکروفون روانه می‌شوند، نخست میکروفون نزدیک‌تر و سپس میکروفون دورتر را متأثر می‌سازند. اختلاف فاصلهٔ میکروفون‌ها از محل برخورد چکش با صفحهٔ فلزی را اندازه می‌گیریم. با استفاده از زمان‌سنج می‌توانیم تأخیر زمانی بین دریافت صوت توسط دو میکروفون را ثبت کنیم. اکنون با استفاده از رابطهٔ $v=\Delta x/\Delta t$ می‌توانیم تندی صوت را در هوا بیابیم. درصورتی که این اسباب را در مدرسه دارید با استفاده از آن، تندی صوت را در هوا اندازه بگیرید.

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 :

$$v = \frac{l}{t} = \frac{۱/۰\,\mathrm{m}}{۳/۰\times۱۰^{-۳}\,\mathrm{s}} = ۳۳۳\,\mathrm{m/s}$$

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، منابه ناحیهٔ بازنمندگی در یک قفر کشیده است که در آن موجی طولی روانه نشده است (شکل ۳ـ۲۴ب). توجه کنید، درحالی که موج از بلندگو به شنونده می‌رسد، هر مولکول هوا، با موج حرکت نمی‌کند، بلکه در مکان تابی 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 دیابازون 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

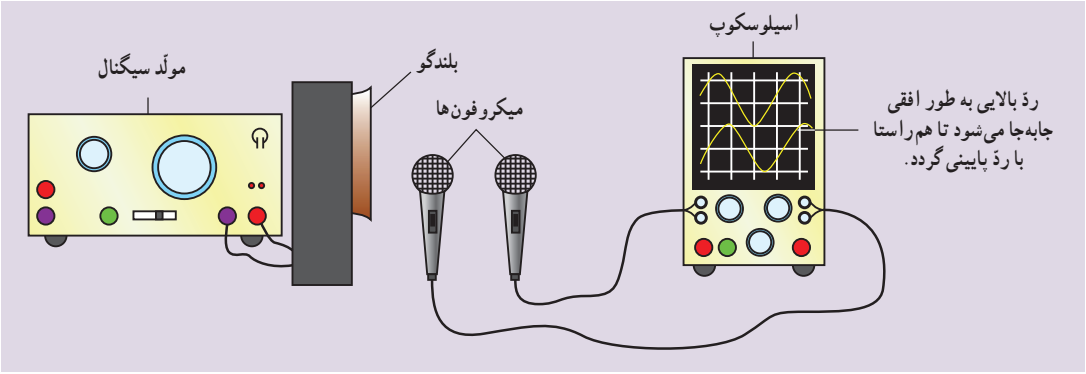
اندازه‌گیری تندی صوت : یک روش ساده برای اندازه‌گیری تندی صوت به این ترتیب است : دو میکروفون را مطابق شکل به یک زمان‌سنج حساس[۱] متصل کنید. این زمان‌سنج می‌تواند بازه‌های زمانی را با دقت میلی‌ثانیه اندازه‌گیری کند. وقتی چکش را به صفحهٔ فلزی بکوبیم، امواج صوتی که به سمت دو میکروفون روانه می‌شوند، نخست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

۱ــ 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، تحلیل گران 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 ۳ــ۶

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؟

شکل ۳ــ۳۷ با انتشار صوت از چشمه، انرژی به‌طور عمود، تخت از سطح ۱ و سپس از سطح ۲ که مساحت بیشتری دارد، می‌گذرد.

تندی 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. 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 ۳ــ۳۶).

$$I = \frac{\overline{P}}{A} \qquad (\text{تندی صوت}) \qquad (۳ــ۱۱)$$

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^{12} باشد (جدول ۳ــ۲). برای بررسی چنین گسترهٔ وسیعی از شدت‌ها راحت‌تر آن است که از لگاریتم (در پایهٔ ۱۰) استفاده کنیم. یعنی به‌جای شدت I یک موج صوتی، ساده‌تر این است که از **تراز شدت صوت (تراز صوتی)** که به‌صورت زیر تعریف می‌شود استفاده کنیم:

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

که در آن dB مخفف دسی‌بل، یکای تراز شدت صوت است که به افتخار الکساندر گراهام بل (۱۹۲۲ــ۱۸۴۷ م.) انتخاب شده است. همچنین I_0 شدت مرجع ($1/00\times10^{-12}\,W/m^2$) 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 ۳ــ۴، شدت‌ها و ترازهای شدت صوت را برای چند صدای متفاوت داده است.

جدول ۳ــ۴ 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
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 جاروبرقی	10^{-4}	۸۰
قطار در عبور از یک تقاطع	10^{-3}	۹۰
کارگاه ماشین‌آلات پر سروصدا	10^{-2}	۱۰۰
دستگاه پخش صوت در بیشترین صدای خود	10^{-1}	۱۱۰
مهٔ سنگ‌شکن	10^{0}	۱۲۰
موتور جت در فاصلهٔ 30m	10^{1}	۱۳۰

۸۰

پاسخ تمرین ۳ــ۶

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:

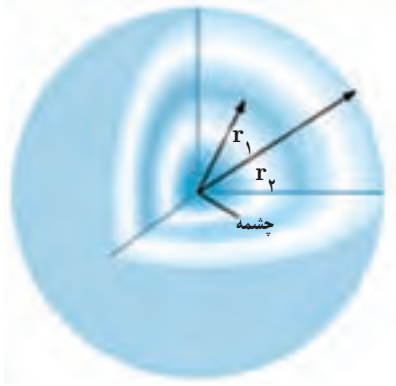
$$\Delta T = \frac{\Delta x}{v_a} - \frac{\Delta x}{v_b} = \frac{(v_b - v_a)\Delta x}{v_a v_b}$$

در نتیجه

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

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

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

نمونه 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 ۳ـ۳۷ با انتشار صوت از جسم، انرژی به‌طور عمود، تخت از سطح ۱ و سپس از سطح ۲ که مساحت بیشتری دارد، می‌گذرد.

تندی 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. 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).

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

که در آن $\overline{P}$ آهنگ متوسط انتقال انرژی و A مساحت سطحی است که صوت یا 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^{12} 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 :

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

که در آن dB مخفف دسی‌بل، یکای تراز شدت صوت است که به افتخار الکساندر گراهام بل (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 0dB دارد. جدول ۳ـ۲، شدت‌ها و تراز‌های شدت صوت را برای چند صدای متفاوت داده است.

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
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 پرسروصدا	10^{-5}	۷۰
در نزدیکی جاروبرقی	10^{-4}	۸۰
قطار در عبور از یک تقاطع	10^{-3}	۹۰
کارگاه ماشین‌آلات پرسروصدا	10^{-2}	۱۰۰
دستگاه پخش صوت در بیشترین صدای خود	10^{-1}	۱۱۰
مهٔ سنگ‌شکن	10^{0}	۱۲۰
موتور جت در فاصلهٔ 30m	10^{1}	۱۳۰

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.

این فیلم، یک دسی‌بل‌سنج را نشان می‌دهد.

فیلم

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؟

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

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).

$$I=\frac{\overline{P}}{A} \qquad \text{(شدت صوت)} \qquad (۱۱ـ۳)$$

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^{12} 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 :

$$\beta=(10\ dB)\log\left(\frac{I}{I_0}\right) \qquad \text{(تراز شدت صوت)} \qquad (۱۲ـ۳)$$

که در آن dB مخفف دسی‌بل، یکای تراز شدت صوت است که به افتخار الکساندر گراهام بل (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 ۰dB دارد. جدول ۳ـ۳، شدت‌ها و ترازهای شدت صوت را برای چند صدای متفاوت داده است.

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 ۳m	10^{-11}	۱۰
پچ‌پچ در فاصلهٔ ۱m	10^{-10}	۲۰
کتابخانه	10^{-9}	۳۰
خیابان بی‌سروصدا	10^{-8}	۴۰
رستوران ساکت	10^{-7}	۵۰
صحبت معمولی در فاصلهٔ ۱m	10^{-6}	۶۰
خیابان پرسروصدا	10^{-5}	۷۰
در تردیکی جاروبرقی	10^{-4}	۸۰
قطار در عبور از یک تقاطع	10^{-3}	۹۰
کارگاه ماشین‌آلات پرسروصدا	10^{-2}	۱۰۰
دستگاه پخش صوت در بیشترین صدای خود	10^{-1}	۱۱۰
مهٔ سنگ‌شکن	10^{0}	۱۲۰
موتور جت در فاصلهٔ ۳۰m	10^{1}	۱۳۰

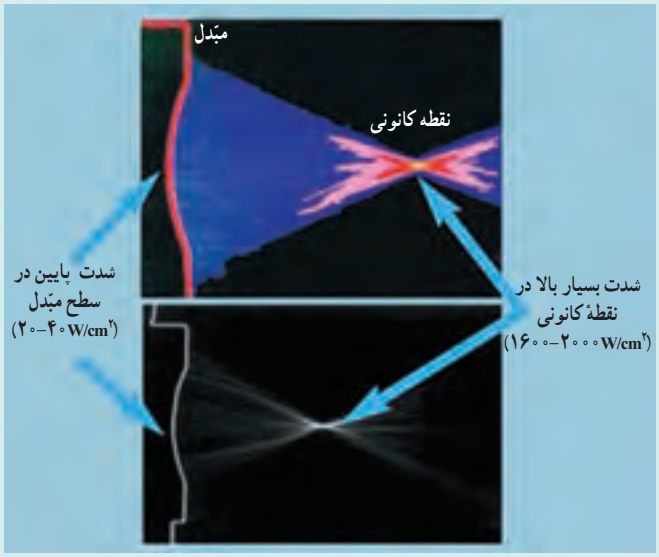
۸۰

دانستنی

هایفو[۱]

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 ۳ــ۶

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

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۳ــ۱۲ داریم :

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

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

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

$$(I/I_0) = 10^8 \Rightarrow I = 10^8 (100 \times 10^{-12}\,W/m^2) = 10^{-2}\,W/m^2$$

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 نوایی : 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 نُی موسیقی یا به‌اختصار نُت[1] گفته می‌شود. با شنیدن هر نُی، دو ویژگی را می‌توان از هم متمایز ساخت : ارتفاع[2] و بلندی[3] آن. ارتفاع و بلندی هر دو به ادراک نوایی ما مربوط می‌شوند. ارتفاع، بسامدی است که گوش انسان درک می‌کند؛ مثلاً اگر چند دیاپازون با بسامدهای مختلف به‌طور یکسان تواخته 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 وادارید، 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 نوایی انسان به بسامدهای متفاوت حساسیت‌های متفاوتی نشان می‌دهد، به‌طوری که بیشترین حساسیت گوش انسان به بسامدهایی در گسترهٔ ۲۰۰۰Hz تا ۵۰۰۰Hz است، در حالی که گوش انسان قادر به شنیدن نُی‌های صدای ۲۰Hz تا ۲۰۰۰۰Hz 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 :

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

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

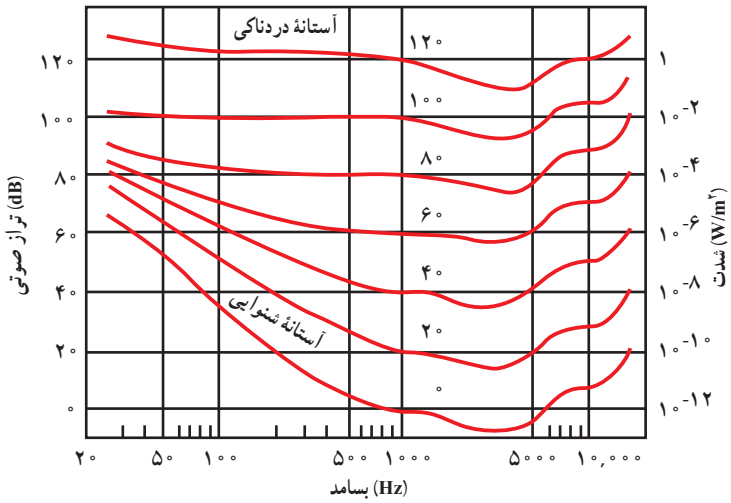
نسبت I_2/I_1 برابر ۱۰۰ داده شده است. بنابراین داریم :

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

$$= 20\,dB$$

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.



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

مثال ۳ـ۹

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

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۳ـ۱۲ داریم :

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

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

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

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

تمرین ۳ـ۷

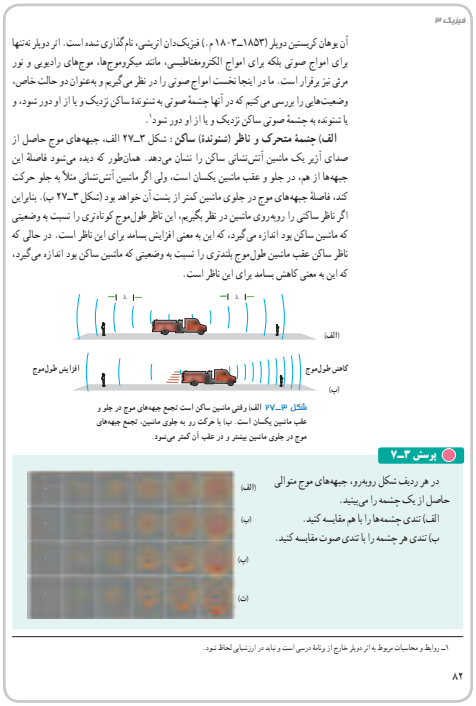
با زیاد کردن صدای تلویزیونی، شدت صوتی که به گوش ما می‌رسد ۱۰۰ برابر می‌شود. تراز شدت صوتی که می‌شنویم چند دسی‌بل افزایش یافته است؟

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 نشنیدن 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، مدتی است که گوش انسان از صوت درک می‌کند. اگر یک دیاپازون با بسامد مشخص را با ضربه‌هایی متفاوت به ارتعاش وادارید، با آنکه بسامد صدایی که می‌شنوید تغییر نمی‌کند، اما صداهایی با بلندی متفاوت را حس می‌کنید که این به شدت ضربه‌ها بستگی دارد. بلندی متفاوت با شدت است. شدت را می‌توان با یک آشکارساز اندازه گرفت، در حالی که بلندی چیزی است که شما حس می‌کنید. دستگاه شنوایی انسان به بسامدهای متفاوت حساسیت‌های متفاوتی نشان می‌دهد، به‌طوری که بیشترین حساسیت گوش انسان به بسامدهایی در گسترهٔ ۲۰۰۰Hz تا ۵۰۰۰Hz است، در حالی که گوش انسان قادر به شنیدن 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

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 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.

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.

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

۸۲

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

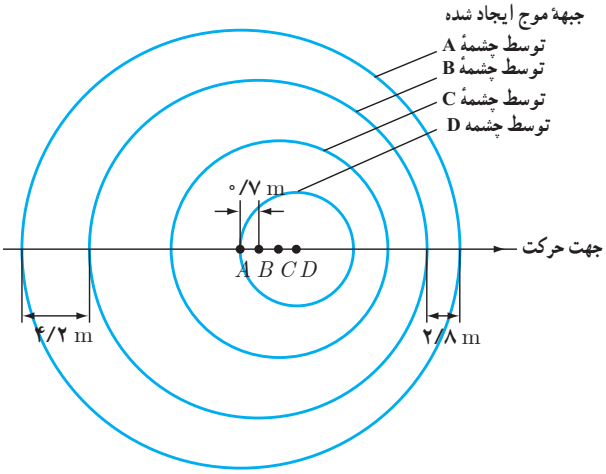
در این فیلم اثر دوپلر را با یک میلهٔ سوت‌زنهٔ چرخان می‌بینید.

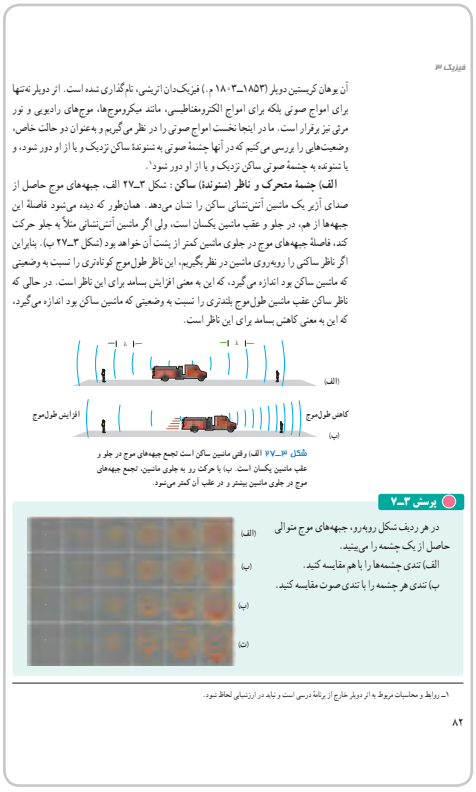
فیلم

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 دوبلر (۱۸۵۳ــ۱۸۰۳ م.) فیزیک‌دان اتریشی، نام‌گذاری نموده است. از دوبلر 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.

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

پرسش ۳ــ۷

در هر ردیف شکل روبه‌رو، جبهه‌های موج متوالی حاصل از یک چشمه را می‌بینید.
الف) تندی چشمه‌ها را با هم مقایسه کنید.
ب) تندی هر چشمه را با تندی صوت مقایسه کنید.

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

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 اَترینی، 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.

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.

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 حالی که 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 هماننده 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* 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

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.

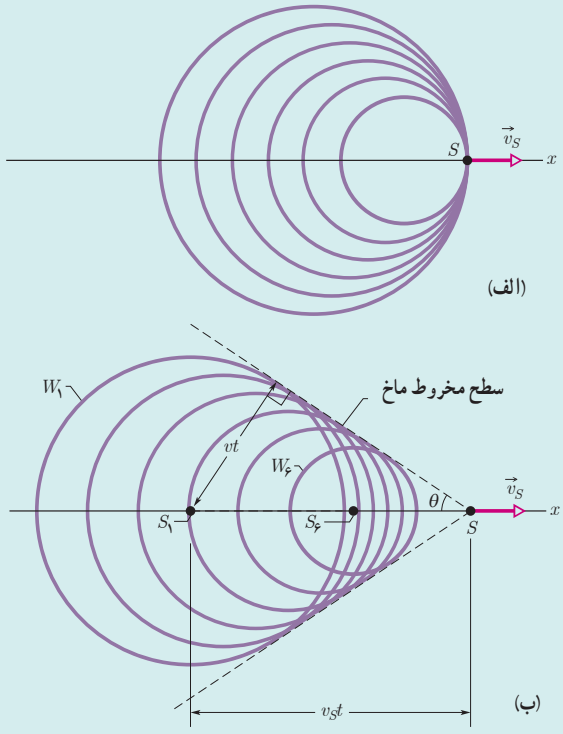
ب) اگر ناظر (آشکارساز) در جهت مثبت محور x حرکت کند، علامت پشت v_D منفی می‌شود و در صورتی که در خلاف جهت مثبت محور x حرکت کند، علامت پشت v_D مثبت می‌شود.

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 می کنند 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*[۱]، 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



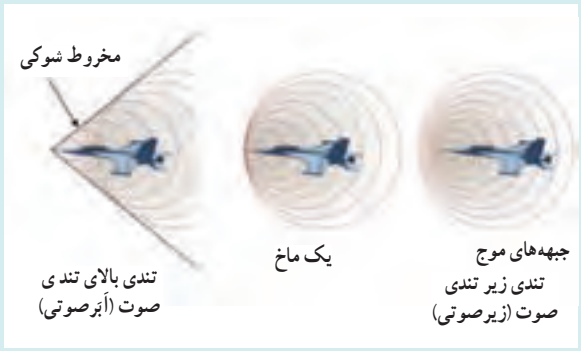
شکل ۱ (الف) چشمهٔ صوتی S با تندی v_S برابر با تندی صوت و در نتیجه با همان سرعتی که جبهه‌های موج ایجاد می‌شوند، حرکت می‌کند. (ب) چشمهٔ صوتی S با تندی v_S بزرگ‌تر از تندی صوت و در نتیجه سریع‌تر از جبهه‌های موج حرکت می‌کند. وقتی چشمه در مکان S_1 قرار دارد، جبههٔ موج W_1 و وقتی در مکان S_6 قرار دارد، جبههٔ موج W_6 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

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

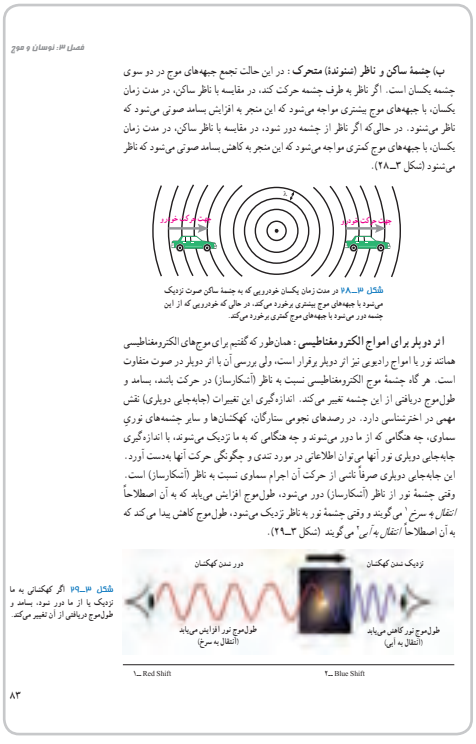
نسبت v_S/v را ***عدد ماخ*** می‌نامند. وقتی گفته می‌شود یک هواپیما با ۲/۳ ماخ پرواز می‌کند، به این معناست که تندی آن ۲/۳ برابر تندی صوت در هوایی است که هواپیما در آن پرواز می‌کند. موج‌های شوکی‌ای که توسط هواپیماهای اَبَرصوتی (شکل‌های ۲ الف و ب) یا موشک‌ها ایجاد می‌شوند، انفجاری از صدا موسوم به غرّش صوتی 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[۱] کوچک می‌شود که همان صدای شکستن شلاق است.



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 جگونگی 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*[۱] می‌گویند و وقتی چشمهٔ نور به ناظر نزدیک می‌شود، طول‌موج کاهش پیدا می‌کند که به آن اصطلاحاً *انتقال به آبی*[۲] 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 :

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

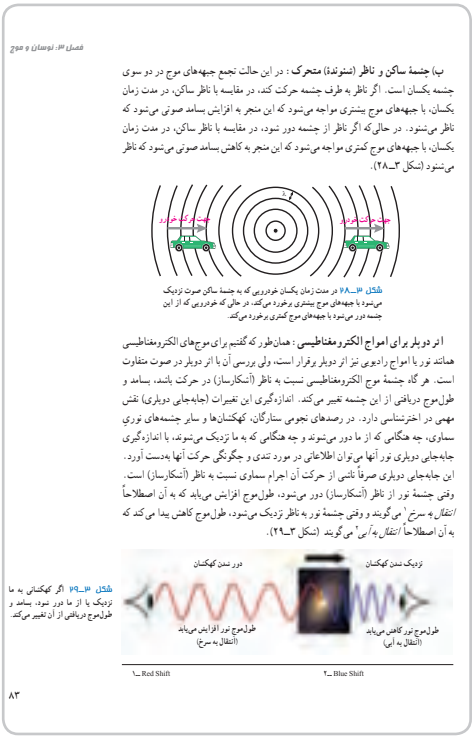
که برای وضعیت نزدیک شدن، علامت‌های β عوض می‌شود.

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.



فصل ۳: نوسان و موج

ب) چشمهٔ ساکن و ناظر (نشونده) 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 حالی که 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*[۱] می‌گویند و وقتی چشمهٔ نور به ناظر نزدیک می‌شود، طول‌موج کاهش پیدا می‌کند که به آن اصطلاحاً *انتقال به آبی*[۲] 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

۸۳

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 $f < f_s$ می‌شود.

فیزیک ۳

پرسش ۳ــ۸

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

۸۴

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 $20^\circ C$ است؟ (راهنمایی : تندی صوت در دمای $20^\circ C$ 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

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{۳/۷۵ \times ۱۰^۳ \text{ m}}{۱۱/۲ \text{ s}} = ۳۳۴/۸ \text{ m/s} \approx ۳۳۵ \text{ m/s}$$

این عدد از ۳۴۳m/s کمتر است. بنابراین دمای استادیوم کمتر از $20^\circ C$ است. محاسبه نشان می‌دهد مقدار آن برابر $6/4^\circ C$ 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؟

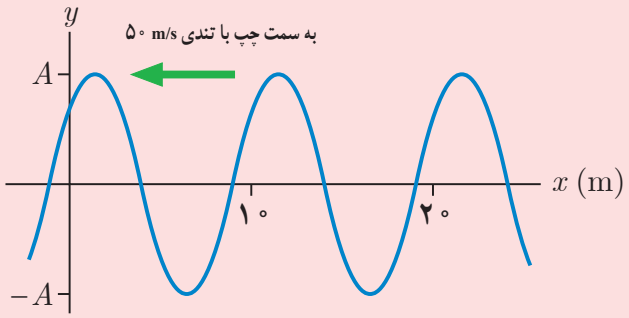
پاسخ : تختهٔ کوتاه‌تر با سرعت بیشتری ارتعاش می‌کند و صوت‌هایی با ارتفاع زیاد ایجاد می‌کند و بنابراین صدایی زیرتر تولید می‌کند. درحالی که تختهٔ بلندتر به آرامی ارتعاش می‌کند و صدایی که ایجاد بسامد کمتری داد و صدا بم‌تر به‌گوش می‌رسد. برای همین است که بال حشرات کوچک صدایی زیرتر از بال حشرات بزرگ ایجاد 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 **۳ــ۹** داریم :

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

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

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

و

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

در نتیجه

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

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

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

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 :

$$\lambda_{\text{بالا}} = \frac{c}{f_1} = \frac{۳/۰۰\times۱۰^{۸}\,\text{m/s}}{۵۴۰\times۱۰^{۳}\,\text{s}^{-۱}} = ۵/۵۵\times۱۰^{۲}\,\text{m}$$

$$\lambda_{\text{پایین}} = \frac{c}{f_2} = \frac{۳/۰۰\times۱۰^{۸}\,\text{m/s}}{۱۶۰۰\times۱۰^{۳}\,\text{s}^{-۱}} = ۱/۸۷\times۱۰^{۲}\,\text{m}$$

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

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

$$\lambda_{\text{بالا}} = \frac{c}{f_1} = \frac{۳/۰۰\times۱۰^{۸}\,\text{m/s}}{۸۸/۰\times۱۰^{۶}\,\text{s}^{-۱}} = ۳/۴۱\,\text{m}$$

$$\lambda_{\text{پایین}} = \frac{c}{f_2} = \frac{۳/۰۰\times۱۰^{۸}\,\text{m/s}}{۱۰۸\times۱۰^{۶}\,\text{s}^{-۱}} = ۲/۷۸\,\text{m}$$

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

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 :

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

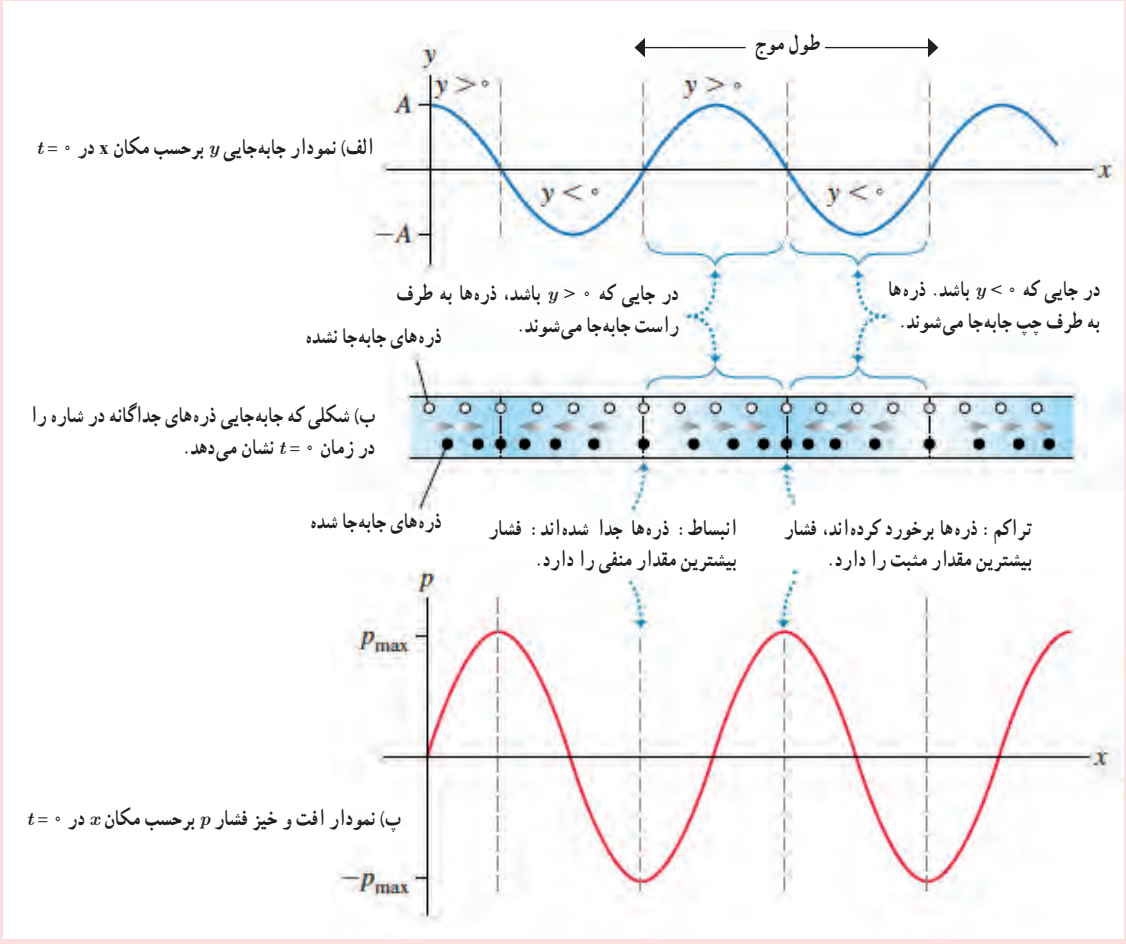
۵ یک موج صوتی را درنظر بگیرید که در لوله‌ای در حال انتشار است. جهت انتشار را محور xها فرض کنید. در یک لحظهٔ مشخص نمودارهای زیر را رسم کنید.

الف) نمودار جابه‌جایی y برحسب مکان x در $t=۰\,\text{s}$

ب) شکلی که جابه‌جایی ذره‌های جداگانه در شاره را در زمان $t=۰\,\text{s}$ نشان می‌دهد.

پ) نمودار افت و خیز فشار p برحسب مکان x در $t=۰\,\text{s}$

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 :

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

ب)

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

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

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 ۳ــ۱۲ استفاده می‌کنیم :

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

در نتیجه :

$$\log\frac{I}{I_۰} = ۹/۰۰ \Rightarrow \frac{I}{I_۰} = ۱/۰۰\times۱۰^۹$$

بدیهی است وقتی دو پتک باهم صدا می‌کنند خواهیم داشت :

$$\frac{I'}{I_۰} = ۲/۰۰\times۱۰^۹$$

بنابراین داریم :

$$\beta' = (۱۰\text{dB})\log\frac{I'}{I_۰} = (۱۰\text{dB})\log(۲/۰۰\times۱۰^۹) = ۹۳/۰\ \text{dB}$$

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 :

$$\beta_۲ - \beta_۱ = (۱۰\text{dB})\log\frac{r_۱^۲}{r_۲^۲} = (۱۰\text{dB})\log\frac{۱}{۴} = -۰/۶\text{dB}$$

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 :

$$P = IA = I(\pi r^۲) = (۳/۲ \times ۱۰^{-۶}\ \text{W/m}^۲)(\pi)(۳/۵\times۱۰^{-۳}\text{m})^۲$$

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

ا. 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؟

ب. 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؟

پ. 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 جاده‌ای می‌گذرد چقدر است؟ فرض کنید وزن خودرو به‌طور یکنواخت روی فنرهای چهارچرخ توزیع شده است.

ت. دامنهٔ 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.

ث. نمودار مکان ــ 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

ج. دامنهٔ 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.)

چ. جسمی به جرم ۱/۰kg 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) دامنهٔ نوسان و تندی بیشینهٔ جسم چقدر است؟ ب) وقتی تندی جسم ۱/۶m/s است، انرژی پتانسیل کشسانی آن چقدر است؟

ح. معادلهٔ حرکت هماهنگ سادهٔ 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؟

خ. دامنهٔ 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.

د. نمودار مکان ــ 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

ذ. دامنهٔ 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.)

ر. جسمی به جرم ۱/۰kg 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) دامنهٔ نوسان و تندی بیشینهٔ جسم چقدر است؟ ب) وقتی تندی جسم ۱/۶m/s است، انرژی پتانسیل کشسانی آن چقدر است؟

ز. معادلهٔ حرکت هماهنگ سادهٔ 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؟

ژ. 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؟ ($g_{\text{تهران}}=۹/۷۸\text{m/s}^۲$ و $g_{\text{استوا}}=۹/۷۸\text{m/s}^۲$)

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

۳ـ۴ تشدید

س. 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[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

۱ 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

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

در نتیجه :

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

$$=۰/۴۶\text{s}$$

۲ 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 $m=۱/۶\text{kg}$ به دست می‌آید.

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

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

$$=۰/۸۸۸\text{s}$$

و از آنجا

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

و

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

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

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

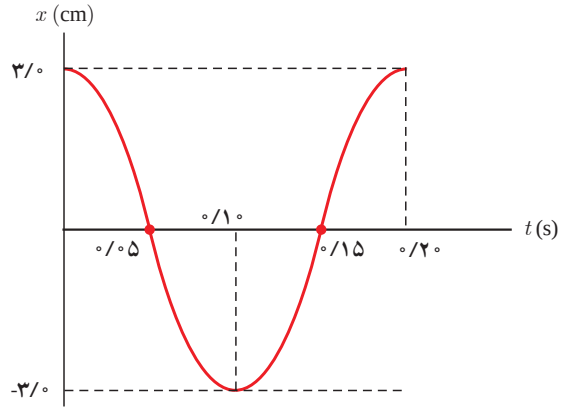
در نتیجه

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

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

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

بنابراین شکلی شبیه زیر خواهیم داشت



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

$$\frac{5T}{4} = 0/50\,s \Rightarrow T = 0/40\,s$$

در نتیجه

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0/40\,s} = 5\pi\,rad/s$$

بنابراین معادلهٔ حرکت نوسانگر چنین می‌شود

$$x = A\cos 5\pi t$$

ب) در زمان t_1، $x = A/2$ است و در نتیجه

$$\frac{A}{2} = A\cos 5\pi t_1$$

در نتیجه

$$\cos 5\pi t_1 = \frac{1}{2}$$

چون t_1 نخستین زمانی است که $x = A/2$ است، در رابطهٔ بالا $5\pi t_1$ را برابر $\pi/3$ می‌گذاریم. در نتیجه $t_1 = \frac{1}{15}\,s$ می‌شود.

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

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

و در نتیجه

$$|a| = \frac{k}{m}|x| = \omega^2|x| = (5\pi)^2|x|$$

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 :

$$x(t_1) = A\cos 5\pi t_1$$
$$= (0/04\,m)\cos(5\pi\frac{1}{15}) = (0/04\,m)\cos\frac{\pi}{3}$$
$$= 0/02\,m = 2/0\,cm$$

در نتیجه

$$|a| = (5\pi)^2\,(0/02\,m) = 4/93\,m/s^2 \approx 4/9\,m/s^2$$

۶ الف) انرژی کل نوسانگر برابر است با

$$E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}(74\,N/m)(0/080\,m)^2 = 0/2368\,J \approx 0/24\,J$$

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳

۳ــ۱ و ۳ــ۲ 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 $2/00\times10^4\,N/m$ 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 $3\times10^{-2}\,m$ 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.

۳ــ۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده

۷. دامنهٔ 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، $1/0^{-2}\times8/0^{-2}\,J$ باشد، انرژی جنبشی آن در این مکان چقدر است؟ (از نیروهای اتلافی چشم‌پوشی شود.)

۸. جسمی به جرم ۱/۰kg 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) دامنهٔ نوسان و تندی بیشینهٔ جسم چقدر است؟

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

۹. معادلهٔ حرکت هماهنگ ساده یک نوسانگر در SI به‌صورت $x = (0/050\,m)\cos 2\pi t$ 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؟

۱۰. 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 جلو افتادن در یک شبانه‌روز چقدر است؟ ($g_{تهران} = 9/78\,m/s^2$ و $g_{استوا} = 9/78\,m/s^2$)

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

۳ــ۴ تشدید

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

۱ــ Millennium bridge

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 ۲ N را از انتهای یک فنر قائم می‌آویزیم، فنر ۲ cm کشیده می‌شود. سپس این فنر را در حالی که به یک وزنهٔ ۵/۰ N متصل است روی میز بدون اصطکاک 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 ۲/۰ s نوسان می‌کند. اگر جرم این جسم ۲/۰ kg افزایش یابد، دورهٔ تناوب ۳/۰ s می‌شود. مقدار m چقدر است؟

۳. جرم خودرویی همراه با سرنشینان آن ۱۶۰۰ kg 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 فنرهای چهارگوش توزیع شده است.

۴. دامنهٔ نوسان یک حرکت هماهنگ ساده $۳/۰\times۱۰^{-۲}\ \text{m}$ و بسامد آن ۵/۰ Hz 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 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 ۷۴ N/m متصل است و در راستای افقی نوسان می‌کند، برابر با ۸/۰ cm است. اگر انرژی پتانسیل این نوسانگر در نقطه‌ای از مسیر نوسان، $۷/۰\times۱۰^{-۲}\ \text{J}$ باشد، انرژی جنبشی آن در این مکان چقدر است؟ (از نیروهای اتلافی چشم‌پوشی شود.)

۷. جسمی به جرم ۱/۰ kg به فنری افقی با ثابت ۶/۰ N/cm متصل است. فنر به اندازهٔ ۹/۰ cm 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 ۱/۲ m/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) به ازای چه جرمی بر جسم جفت شده با فنر، 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 جلو افتادن در یک شبانه‌روز چقدر است؟ ($g_{\text{تهران}} = ۹/۷۸\ \text{m/s}^{۲}$ و $g_{\text{استوا}} = ۹/۷۸۰\ \text{m/s}^{۲}$)

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 بدن ترتیب نیروهای کوچکی به زمین زیر پایش وارد می‌کند. این نیروها بسامدی در حدود ۰/۵ Hz دارند. لرزش شدید پل هوایی میلنیوم[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

۹ الف) زمانی که ساعت نشان می‌دهد متناسب با عکس دورهٔ نوسان آونگ است. با استفاده از رابطهٔ $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ درمی‌یابیم که چون $g_{\text{تهران}} > g_{\text{استوا}}$ است، بنابراین ساعت در استوا عقب می‌افتد. میزان این عقب‌افتادگی را می‌توانیم محاسبه کنیم. چون $t_2/t_1 = T_2/T_1$ است، داریم

$$t_2 - t_1 = (\sqrt{g_2/g_1} - 1)t_1$$

که اگر $t_1 = 86400\,\text{s}$ قرار دهیم به $|\Delta t| = 88/2\,\text{s}$ می‌رسیم.

ب) با افزایش دما، طول آونگ زیاد می‌شود و بنا به رابطهٔ $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ 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 $T/4$ درهٔ نشان داده شده در شکل به اندازهٔ $\lambda/4$ 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 ۲۰ N را از انتهای یک فنر قائم می‌آویزیم، فنر ۲۰ cm کشیده می‌شود. سپس این فنر را در حالی که به یک وزنهٔ ۵/۰ N 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 ۲/۰ s نوسان می‌کند. اگر جرم این جسم ۲/۰ kg افزایش یابد، دورهٔ تناوب ۳/۰ s می‌شود. مقدار m چقدر است؟

۳. جرم خودرویی همراه با سرنشینان آن ۱۶۰۰ kg است. این خودرو روی چهار فنر با ثابت $2/00 \times 10^4\,\text{N/m}$ 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 $3 \times 10^{-2}\,\text{m}$ و بسامد آن ۵/۰ Hz 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 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 ۷۲ N/m متصل است و در راستای افقی نوسان می‌کند، برابر با ۸/۰ cm است. اگر انرژی پتانسیل این نوسانگر در قطه‌ای از مسیر نوسان، $1/0 \times 10^{-2}$ ۸/۰ باشد، انرژی جنبشی آن در این مکان چقدر است؟ (از نیروهای اتلافی چشم‌پوشی شود.)

۷. جسمی به جرم ۱/۰ kg به فنری افقی با ثابت ۶/۰ N/cm متصل است. فنر به اندازهٔ ۹/۰ cm 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 ۱/۶ m/s است، انرژی پتانسیل کشسانی آن چقدر است؟

۸. معادلهٔ حرکت هماهنگ ساده یک نوسانگر در SI به‌صورت $x = (-/050\,\text{m})\cos 2\pi t$ 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؟

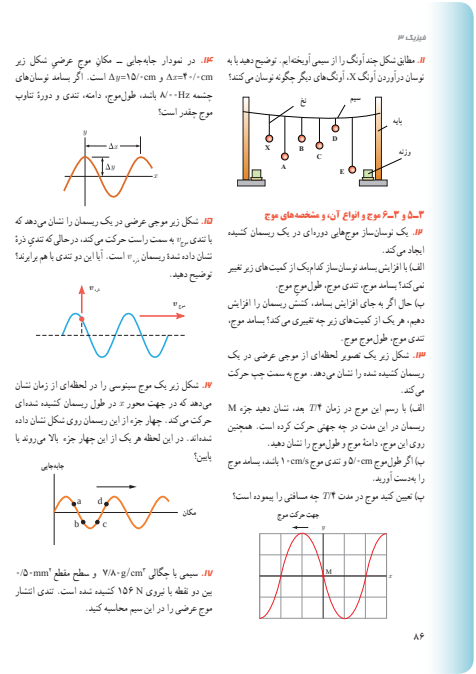
۹. الف) ساعتی آونگ‌دار (یا آونگ ساده) در تهران تنظیم شده است. اگر این ساعت به منطقه‌ای در استوا برده شود، عقب می‌افتد یا جلو؟ مقدار این عقب یا جلوافتادن در یک شبانه‌روز چقدر است؟ ($g_{\text{تهران}} = 9/78\,\text{m/s}^2$ و $g_{\text{استوا}} = 9/78\,\text{m/s}^2$)

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 ۰/۵ Hz 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



فیزیک ۳

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

۱. 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، طول موج 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، طول موج موج.

۲. 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 $T/4$ 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 ۵/۰ cm و تندی موج ۱۰ cm/s باشد، بسامد موج را به‌دست آورید.

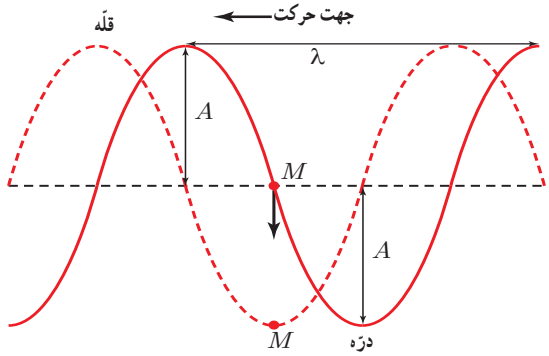
پ) تعیین کنید موج در مدت $T/4$ چه مسافتی را پیموده است؟

۳. شکل زیر موجی عرضی در یک ریسمان را نشان می‌دهد که با تندی $v_{\text{موج}}$ 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.

۴. 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؟

۵. در نمودار جابه‌جایی ـ مکان موج عرضی شکل زیر $\Delta x = 40/0\,\text{cm}$ و $\Delta y = 15/0\,\text{cm}$ است. اگر بسامد نوسان‌های چشمه ۸/00 Hz باشد، طول‌موج، دامنه، تندی و دورهٔ تناوب موج چقدر است؟

۶. سیمی با چگالی $7/80\,\text{g/cm}^3$ و سطح مقطع $0/50\,\text{mm}^2$ بین دو نقطه با نیروی ۱۵۶ N کشیده شده است. تندی انتشار موج عرضی را در این سیم محاسبه کنید.



ب) بسامد موج برابر است با

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

پ) از رابطهٔ $x = vt$ استفاده می‌کنیم :

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

$$= ۱/۲۵\,\text{cm} \approx ۱/۲\,\text{cm}$$

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

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

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

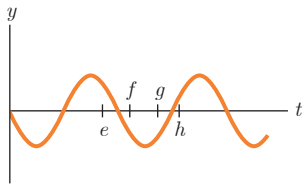
دورهٔ تناوب نیز وارون بسامد است :

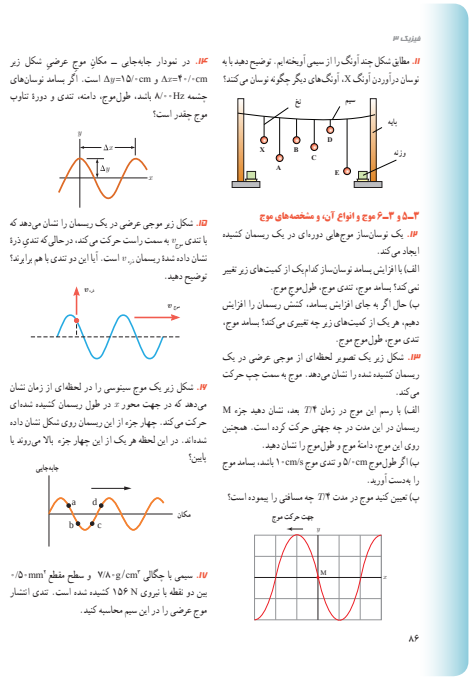
$$T = \frac{۱}{f} = \frac{۱}{۸/۰۰\,\text{s}^{-۱}} = ۰/۱۲۵\,\text{s}$$

۱۵ خیر؛ این دو تندی متفاوت‌اند. تندی $v_{\text{موج}}$ 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 ۳ــ۱۹ 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؟

نخ
سیم
پایه
ورنه
X
A
B
C
D
E

۳ــ۵ و ۳ــ۶ 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، 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 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 به‌دست آورید.
پ) تعیین کنید موج در مدت $T/۴$ چه مسافتی را پیموده است؟

جهت حرکت موج
M

۱۴. در نمودار جابه‌جایی ــ مکانِ موج عرضی شکل زیر $\Delta x=۴۰/۰\,\text{cm}$ و $\Delta y=۱۵/۰\,\text{cm}$ 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 $v_{\text{ذره}}$ به سمت راست حرکت می‌کند، درحالی که تندی ذرهٔ نشان داده شده ریسمان $v_{\text{موج}}$ 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؟

جابه‌جایی
مکان
a
b
c
d

۱۷. سیمی با چگالی $۷/۸\,\text{g/cm}^۳$ و سطح مقطع $۰/۵۰\,\text{mm}^۲$ 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 :

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

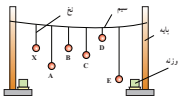
ب) طول موج در هوا چنین می‌شود :

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

و در آب

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

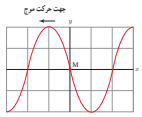
۱۱. مطابق شکل چند آونگ را از سیمی آویخته‌ایم. توضیح دهید با به نوسان درآوردن آونگ X، آونگ‌های دیگر چگونه نوسان می‌کنند؟



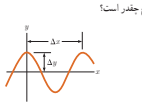
۳ـ۵ و ۳ـ۶ موج و انواع آن، و مشخصه‌های موج

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، هریک از کمیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟ بسامد موج، تندی موج، طول‌موج موج.

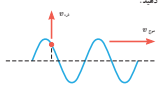
۱۳. شکل زیر یک تصویر لحظه‌ای از موجی عرضی در یک ریسمان کشیده نشده را نشان می‌دهد. موج به سمت چپ حرکت می‌کند.
الف) با رسم این موج در زمان $T/۴$ بعد، نشان دهید جزء M ریسمان در این مدت در چه جهتی حرکت کرده است. همچنین روی این موج، دامنهٔ موج و طول‌موج را نشان دهید.
ب) اگر طول‌موج ۵/۰cm و تندی موج ۱۰cm/s باشد، بسامد موج را بدست آورید.
پ) تعیین کنید موج در مدت $T/۴$ چه مسافتی را پیموده است؟



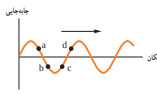
۱۴. در نمودار جابه‌جایی ـ مکانِ موج عرضی شکل زیر تندی موج $۵۰cm/s$ و $\Delta x=۴۰/۰cm$ و $\Delta y=۱۵/۰cm$ است. اگر بسامد نوسان‌های چشمه $۸/۰۰Hz$ باشد، طول‌موج، دامنه، تندی و دورهٔ تناوب موج چقدر است؟



۱۵. شکل زیر موجی عرضی در یک ریسمان را نشان می‌دهد که با تندی $v_{ذره}$ به سمت راست حرکت می‌کند، در حالی که 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 نشده‌ای 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 ۱۵۶ N کشیده شده است. تندی انتشار موج عرضی را در این سیم محاسبه کنید.

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؟

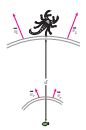
پرتوهای ؟	پرتوهای X	P	Q	R	S

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 $۶/۲۰\times۱۰^{-۷}\,m$ 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. جنبهٔ موجی یا بسامد $۱۰\,Hz$ در یک محیط که تندی انتشار موج در آن $۱۰۰\,m/s$ 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 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 $\Delta t=۴/۰ms$ 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[۱] از کاوه‌ای[۲] دستی موسوم به «رگگذار 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 جقدر است؟
ب) اگر تندی موج صوتی در بافتی نرم از بدن $۱۵۰\,m/s$ باشد، طول‌موج این موج در این بافت چقدر است؟

۱ـ probe
۲ـ Ultrasonic Transducer

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 $\lambda/۲ = ۵/۰\,\text{m}$ 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 $t_T = ۶/۰\,\text{ms}$ 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 :

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{۱۵۰۰\,\text{m/s}}{۶/۷ \times ۱۰^{۶}\,\text{s}^{-۱}} = ۲/۲۳ \times ۱۰^{-۴}\,\text{m} \approx ۲/۲ \times ۱۰^{-۴}\,\text{m}$$

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 ؟	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 $۶/۲۰ \times ۱۰^{-۷}\,\text{m}$ است. بسامد این نور چند هرتز است؟

ب) بسامد نور قرمز در حدود $۴/۳۰ \times ۱۰^{۱۴}\,\text{Hz}$ است. طول‌موج این نور را در هوا و آب حساب کنید. (سرعت نور را در هوا $۳/۰ \times ۱۰^{۸}\,\text{m/s}$ و در آب $۲/۲۵ \times ۱۰^{۸}\,\text{m/s}$ فرض کنید.)

۲۱. چشمهٔ موجی با بسامد $۱۰\,\text{Hz}$ در یک محیط که تندی انتشار موج در آن $۱۰۰\,\text{m/s}$ است، نوسان‌های طولی ایجاد می‌کند. اگر دامنهٔ نوسان‌ها $۲/۰\,\text{cm}$ 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 $v_T = ۵۰\,\text{m/s}$ و امواج طولی با تندی $v_L = ۱۵۰\,\text{m/s}$. 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 $\Delta t = ۴/۰\,\text{ms}$ 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[۱] دستی موسوم به *تراگذار فراصوتی*[۲] برای تشخیص پزشکی استفاده می‌شود که دقیقاً روی ناحیهٔ موردنظر از بدن بیمار گذاشته و حرکت داده می‌شود. این کاوه در بسامد $۶/۷\,\text{MHz}$ عمل می‌کند.

الف) بسامد زاویه‌ای در این کاوهٔ نوسان چقدر است؟

ب) اگر تندی موج صوتی در بافتی نرم از بدن $۱۵۰۰\,\text{m/s}$ باشد، طول‌موج این موج در این بافت چقدر است؟

۱ـ probe

۲ـ Ultrasonic Transducer

۲۵ الف) برای Δt داریم :

$$\Delta t = t_{\text{هوا}} - t_{\text{فلز}} = \frac{L}{v_{\text{هوا}}} - \frac{L}{v_{\text{فلز}}} = L\left(\frac{v_{\text{فلز}} - v_{\text{هوا}}}{v_{\text{فلز}}\, v_{\text{هوا}}}\right)$$

ب) از رابطهٔ به دست آمده در قسمت الف، L را به دست می‌آوریم :

$$L = \frac{\Delta t\ (v_{\text{فلز}}\ v_{\text{هوا}})}{v_{\text{فلز}} - v_{\text{هوا}}}$$

که در آن $v_{\text{فلز}}$ همان تندی صوت در فولاد است. از جدول ۳ــ۱ کتاب، این تندی را برابر $5941\,m/s$ درمی‌یابیم. در نتیجه برای L داریم :

$$L = \frac{(1/00\,s)(5941\,m/s)(340\,m/s)}{5941\,m/s - 340\,m/s} = 360/3\,m \approx 361\,m$$

۲۶ از رابطهٔ $I = \overline{P}/A$ استفاده می‌کنیم. به ترتیب در محل صفحه‌ها داریم :

$$I_1 = \frac{\overline{P}}{A_1} = \frac{1/2\times10^{-4}\,W}{4/0\,m^2} = 3/0\times10^{-5}\,W/m^2$$

$$I_2 = \frac{\overline{P}}{A_2} = \frac{1/2\times10^{-4}\,W}{12\,m^2} = 1/0\times10^{-5}\,W/m^2$$

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 :

$$\beta = (10\,dB)\log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

که در آن $I_0 = 1/00\times10^{-12}\,W/m^2$ است. بنابراین β به ازای $I = 1/0\times10^{-2}\,W/m^2$ چنین می‌شود

$$\beta = (10\,dB)\log\left(\frac{1/0\times10^{-2}\,W/m^2}{1/00\times10^{-12}\,W/m^2}\right) = 1/0\times10^{2}\,dB$$

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 :

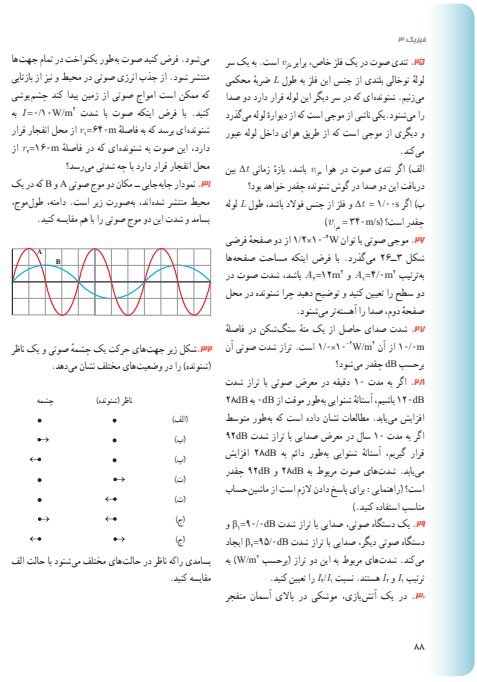
$$\beta = (10\,dB)\log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

و از آنجا

$$I = I_0\, 10^{\left(\frac{\beta}{10\,dB}\right)}$$

که به ترتیب به ازای $\beta_1 = 28\,dB$ و $\beta_2 = 92\,dB$ چنین به دست می‌دهد :

$$I_1 = (1/00\times10^{-12}\,W/m^2)\,10^{\left(\frac{28\,dB}{10\,dB}\right)} = 6/31\times10^{-10}\,W/m^2$$


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 $\Delta t = 1/00\,s$ و فلز از جنس فولاد باشد، طول L لوله چقدر است؟ $(v_w = 340\,m/s)$

۲۵. موجی صوتی با توان $1/20\times10^{-4}\,W$ از دو صفحهٔ فرضی شکل ۳ــ۲۶ می‌گذرد. با فرض اینکه مساحت صفحه‌ها به‌ترتیب $A_1=4/0\,m^2$ 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 متهٔ سنگ‌شکن در فاصلهٔ $10/0\,m$ از آن $1/00\times10^{-7}\,W/m^2$ 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 $\beta_1=90/0\,dB$ و دستگاه صوتی دیگر، صدایی با تراز شدت $\beta_2=95/0\,dB$ 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 $r_2=1600\,m$ از محل انفجار قرار دارد با چه شدتی می‌رسد؟

۳۰. نمودار جابه‌جایی ــ 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.

$$\approx ۶/۳ \times ۱۰^{-۱۰}\ \mathrm{W/m^۲}$$

$$I_۲ = (۱/۰۰ \times ۱۰^{-۱۲}\mathrm{W/m^۲})\,۱۰^{\frac{۹۲\mathrm{dB}}{۱۰\mathrm{dB}}} = ۱/۵۸ \times ۱۰^{-۳}\ \mathrm{W/m^۲}$$
$$\approx ۱/۶ \times ۱۰^{-۳}\ \mathrm{W/m^۲}$$

۲۹ نخست تفاضل βها را محاسبه می‌کنیم.

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

و از آنجا

$$\frac{I_۲}{I_۱} = ۱۰^{۰/۵۰} = ۳/۱۶ \approx ۳/۲$$

۳۰ از رابطهٔ $I = \overline{P}/A$ استفاده می‌کنیم که در اینجا $A = ۴\pi r^۲$ است. بنابراین داریم :

$$\frac{I_۱}{I_۲} = \frac{\frac{\overline{P}}{۴\pi r_۱^۲}}{\frac{\overline{P}}{۴\pi r_۲^۲}} = \frac{r_۲^۲}{r_۱^۲} = (\frac{۱۶۰\,\mathrm{m}}{۶۴۰\,\mathrm{m}})^۲ = (\frac{۱}{۴})^۲$$

و در نتیجه

$$I_۲ = ۱۶\, I_۱ = ۱۶\,(۰/۱۰\ \mathrm{W/m^۲}) = ۱/۶\ \mathrm{W/m^۲}$$

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 $\overline{P}$ متناسب است و نیز همان‌طور که در متن درس اشاره کردیم توان متوسط با مربع بسامد و دامنه متناسب است، بنابراین داریم :

$$\frac{I_B}{I_A} = \left(\frac{A_B^۲ f_B^۲}{A_A^۲ f_A^۲}\right) = \left(\frac{A_B}{A_A}\right)^۲\left(\frac{f_B}{f_A}\right)^۲ = (\frac{۱}{۲})^۲(\frac{۱}{۲})^۲ = \frac{۱}{۱۶}$$

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

(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.

۴۵. 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 جقدر خواهد بود؟

ب) اگر $\Delta t = 1/0 s$ و فلز از جنس فولاد باشد، طول L لوله جقدر است؟ $(v_w = 34 m/s)$

۴۶. موجی صوتی با توان $1/2\times10^{-4} W$ 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.

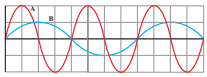
۴۷. شدت صدای حاصل از یک متهٔ سنگ‌شکن در فاصلهٔ $10 m$ از آن $1/0\times10^{-7} W/m^2$ است. تراز شدت صوتی آن برحسب dB چقدر می‌شود؟

۴۸. 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.)

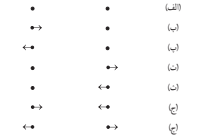
۴۹. یک دستگاه صوتی، صدایی با تراز شدت $\beta_1=90 dB$ و دستگاه صوتی دیگر، صدایی با تراز شدت $\beta_2=95 dB$ ایجاد می‌کند. شدت‌های مربوط به این دو تراز (برحسب W/m^2) به ترتیب I_1 و I_2 هستند. نسبت I_2/I_1 را تعیین کنید.

۵۰. 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 $r_2=1960 m$ از محل انفجار قرار دارد با چه شدتی می‌رسد؟

۵۱. 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.



۵۲. شکل زیر جهت‌های حرکت یک چشمهٔ صوتی و یک ناظر (شنونده) را در وضعیت‌های مختلف نشان می‌دهد.



بسامدی را که ناظر در حالت‌های مختلف می‌شنود با حالت الف مقایسه کنید.

فصل چهارم

برهم کنش‌های موج

۴ـ۱ـ بازتاب موج
۴ـ۲ـ شکست موج
۴ـ۳ـپراش موج
۴ـ۴ـ تداخل امواج
راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴

پیامدها

دانش‌آموزان با درک مفاهیم این فصل :

- درمی‌یابند امواج با محیط و نیز با خود برهم‌کنش می‌کنند.
- درمی‌یابند امواج، اعم از اینکه مکانیکی باشند یا الکترومغناطیسی، برهم‌کنش‌های مشابهی با محیط و نیز با خود دارند.
- با بازتاب امواج، شکست امواج، پراش و تداخل امواج به‌عنوان اقسامی از برهم‌کنش‌های امواج آشنا می‌شوند و به قوانین حاکم بر آنها پی می‌برند.
- با کاربردهای برهم‌کنش‌های امواج در پدیده‌های طبیعی و در علوم کاربردی آشنا می‌شوند.

چه شناختی مطلوب است؟

- در بازتاب امواج، زاویهٔ تابش با زاویهٔ بازتابش برابر است.
- از مکان‌یابی پژواکی می‌توان برای تعیین مکان ونیز تندی اجسام متحرک استفاده کرد.
- بر شکست امواج قانونی عمومی حاکم است که در مورد نور به قانون اسنل می‌انجامد.
- در شکست نور، برای دو محیط ضریب شکست تعریف می‌شود که برابر با نسبت تندی نور در خلأ به تندی نور در آن محیط است.
- توجیه پدیدهٔ سراب تنها به کمک جبهه‌های موج میسر است.
- وقتی باریکهٔ نوری شامل پرتوهایی با طول موج‌های مختلف باشد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در زاویه‌های متفاوتی شکسته می‌شوند.
- وقتی ابعاد مانع یا شکاف در مسیر پیشروی یک موج در حدود طول موجِ آن موج باشد، موج به اطراف مانع یا شکاف گسترده می‌شود.
- وقتی امواج با یکدیگر تداخل پیدا می‌کنند (ترکیب می‌شوند) دامنهٔ موج برایند در برخی نواحی بیشینه (تداخل سازنده) و در برخی ناحیه‌های دیگر کمینه می‌شود (تداخل ویرانگر) و نقش متناوب یک در میانی از بیشینه‌ها و کمینه‌ها تشکیل می‌شود.
- آزمایش یانگ اثباتی تجربی بر این مدعا است که نور نیز یک موج است.
- برهم نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف نقش یک موج ایستاده را ایجاد می‌کند.
- یک موج ایستاده با گره‌ها و شکم‌ها نشان داده می‌شود. در گره‌ها، دو موج کاملاً ناهم‌فاز و در شکم‌ها هم‌فاز هستند.
- به‌ازای بسامدهای خاصی موج ایستادهٔ بارزی تشکیل می‌شود که به آن بسامدها، بسامدهای تشدیدی گفته می‌شود.

چه پرسش‌هایی اساسی است و باید درنظر گرفته شود؟

- بازتاب موج چیست و چگونه ایجاد می‌شود؟
- بین زاویهٔ تابش و بازتابش در بازتاب چه رابطه‌ای وجود دارد؟
- تفاوت بازتاب آیینه‌ای با بازتاب پخشنده چیست؟
- شکست چیست و در چه صورت موج شکست پیدا می‌کند؟
- رابطهٔ ضریب شکست با تندی نور در یک محیط، و رابطهٔ زاویه‌های شکست و بازتابش نور با ضریب‌های شکست دو محیط چیست؟
- رابطهٔ ضریب شکست با دما چگونه است و چه چیز باعث پدیدهٔ سراب می‌شود؟
- پاشندگی نور چیست و با طول موج چه ارتباطی دارد؟
- پراش موج چیست و چه ارتباطی به ابعاد مانع یا شکاف دارد؟
- چگونه اصل برهم‌نهی امواج به تداخل‌های سازنده و ویرانگر می‌انجامد؟
- نقش تداخلی چیست و پهنای هر نوار تداخلی چه ارتباطی با طول موج دارد؟
- چگونه آزمایش یانگ تأییدی بر سرشت موجی نور است؟
- بسامدهای تشدیدی چیست و دو مورد تار و لولهٔ صوتی چه ارتباطی با طول تار یا لوله دارند؟
- در یک تشدیدگر هلموهولتز چگونه تشدید ایجاد می‌شود؟

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

دانشی

با مفاهیم بازتاب امواج، قانون بازتاب عمومی، پژواک، مکان‌یابی پژواکی، بازتاب‌های آینه‌ای و پخشنده، شکست امواج، قانون شکست عمومی، قانون شکست اسنل، پدیدهٔ سراب، پاشندگی نور، پراش امواج، اصل برهم‌نهی و تداخل امواج، تداخل سازنده و ویرانگر، آزمایش یانگ، موج ایستاده، بسامدهای تشدیدی، لوله‌های صوتی و تشدیدگر هلمهولتز آشنا می‌شوند.

مهارتی

با مهارت‌های تحقیق قانون بازتاب عمومی برای امواج صوتی، تعیین تندی صوت با استفاده از پژواک، تحلیل دلیل کج شدن جبهه‌های موج در ساحل، استفاده از تشت موج در تحلیل پدیده‌های شکست و پراش موج، تعیین ضریب شکست، توجیه پدیدهٔ سراب، تحقیق پاشندگی نور با استفاده از منشور، توجیه پدیده‌های مبتنی بر پراش و کاربردهای آن، تحلیل آزمایشگاهی تداخل امواج صوتی، انجام آزمایش یانگ، تحلیل بسامدهای تشدیدی با اسباب آزمایش، ایجاد موج ایستاده، توجیه چگونگی ایجاد صوت توسط آلات مختلف موسیقی، تشخیص تشدیدگرهای هلمهولتز و چگونگی آزمایش با آنها، مهارت استفاده از قانون بازتاب، قانون شکست عمومی و قانون اسنل در حل مسئله، تشخیص موج‌های ایستاده و محاسبهٔ بسامدهای تشدیدی و تعیین هماهنگ‌ها دست پیدا می‌کنند.

بودجه‌بندی پیشنهادی

بنا به صلاحدید مدرس می‌توان ۱۶ جلسهٔ ۹۰ دقیقه‌ای به آموزش این فصل اختصاص داد.

تصویر شگفت‌انگیز آغاز فصل وقتی ایجاد می‌شود که دو مجموعه از جبهه‌های موج تقریباً به حالت عمود بر یکدیگر، با هم برخورد کنند. این اتفاق معمولاً هنگامی رخ می‌دهد که جبهه‌های موج حاصل از دو سامانهٔ آب و هوایی در نقطه‌ای دور از هر دو سامانه، با هم برخورد کنند. توجه کنید *دریای شطرنجی* را به‌سادگی نمی‌توانید مشاهده کنید و باید از فاصله‌ای دور یا از آسمان آن را ببینید. در فیلم زیر چگونگی ایجاد یک دریای شطرنجی را می‌بینید.

فیلم

در فیلم چگونگی تشکیل دریای شطرنجی را مشاهده می‌کنید.

خوب است اشاره شود ساختار این فصل کتاب مبتنی بر بررسی پدیده‌های برهم‌کنش انواع امواج در یک بعد، دو بعد و سه بعد است.

در این فیلم بازتاب تپ از یک انتهای ثابت را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم بازتاب تپ از یک انتهای باز را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم بازتاب دو تپ از انتهاهای ثابت و آزاد را با هم می‌بینید.

فیلم

در این فیلم بازتاب دو موج سینوسی از تکیه‌گاه‌های ثابت و آزاد را می‌بینید.

فیلم

فیزیک ۳

آیا تاکنون پژواک صدای خود را شنیده‌اید؟ پژواک نمونه‌ای از بازتاب امواج مکانیکی است. برخی از جانداران نظیر خفاش از همین ویژگی برای یافتن مسیر خود یا طعمه استفاده می‌کنند (شکل ۴ـ۱). امواج الکترومغناطیسی (از جمله نور) نیز بازمی‌تابند. در واقع همان‌طور که در علوم هشتم آموختیم، وقتی نور بازتابیده از جسمی به چشم ما برسد، آن جسم را می‌بینیم. بازتاب، تنها راه برهم‌کنش امواج با محیط نیست. شکست نیز نوع دیگری از برهم‌کنش امواج با محیط است.

شکل ۴ـ۱ خفاش برای یافتن طعمه از پژواک موج صوتی خود استفاده می‌کند.

شکل ۴ـ۲ شکارچیان بومی آمریکای جنوبی به تجربه دریافته‌اند که محل واقعی یک ماهی متفاوت با محلی است که آن را می‌بینند.

شکست وقتی رخ می‌دهد که جهت پیشروی موج در ورود به یک محیط جدید تغییر کند. وقتی یک ماهی را از بالای برکه‌ای می‌بینید، آن را در مکان واقعی خود مشاهده نمی‌کنید، بلکه مکانی ظاهری بر اثر شکست نور را ادراک می‌کنید (شکل ۴ـ۲). همان‌طور که خواهیم دید، شکست برای امواج مکانیکی نیز رخ می‌دهد. پراش نیز نوع دیگری از برهم‌کنش امواج با محیط است. امواج نه تنها با محیط بلکه با یکدیگر نیز برهم‌کنش می‌کنند. تداخل نمونه‌ای از برهم‌کنش امواج با یکدیگر است. در این فصل، بازتاب، شکست، پراش و تداخل را به‌عنوان برهم‌کنش‌های امواج بررسی می‌کنیم.

شکل ۴ـ۳ چند تصویر لحظه‌ای متوالی از پیشروی و بازتاب یک تپ عرضی در یک فنر بلند کشیده شده که یک سر آن در تکیه‌گاهی راقع در سمت راست، ثابت شده است.

شکل ۴ـ۴ طرحی از پیشروی و بازتاب تپ عرضی شکل ۴ـ۳

۴ـ۱ بازتاب موج

تولید صدا در آلات موسیقی، پژواک صداها، دیدن ماه، دیدن صفحهٔ این کتاب، گرم شدن مواد غذایی در اجاق‌های خورنسیدی، جمع شدن امواج رادیویی در کانون آنتن‌های بشقابی و... مثال‌هایی از کاربرد بازتاب امواج در زندگی هستند. در این بخش، نخست بازتاب امواج مکانیکی و سپس بازتاب امواج الکترومغناطیسی را بررسی می‌کنیم.

بازتاب امواج مکانیکی : اگر تپی را در یک فنر (یا یک ریسمان) کشیدهٔ بلند که یک سر آن بر تکیه‌گاهی ثابت شده است روانه کنیم، وقتی تپ به تکیه‌گاه (مرز) می‌رسد تپرویی به آن وارد می‌کند و طبق قانون سوم نیوتون، تکیه‌گاه نیز تپرویی با اندازهٔ برابر و در جهت مخالف بر فنر وارد می‌آورد. این تپرو در محل تکیه‌گاه، تپی در فنر ایجاد می‌کند که روی فنر در جهت مخالف تپ تابیده حرکت می‌کند (شکل ۴ـ۳). شکل ۴ـ۴ طرحی واضح‌تر از تابش و بازتابش چنین تپی را نشان می‌دهد. چنین بازتابی را بازتاب در یک بُعد می‌گویند.

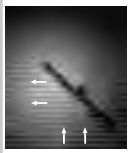
دوباره گوشزد می‌شود وب‌گاه www.falstad.com/ripple کلیهٔ آزمایش‌های ممکن با تشت موج را دارد.

در این فیلم برهم‌کنش جبهه‌های موج دریا را می‌بینند.

فیلم

خوب است اشاره شود قانون بازتاب عمومی برای امواج دایره‌ای و کروی نیز برقرار است. مثلاً اگر در تشت موج به جای تیغهٔ نوسان‌کننده از گوی کوچک نوسان‌کننده استفاده کنیم، امواجی دایره‌ای بر سطح آب تشکیل خواهد شد.

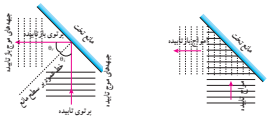
این امواج در برخورد با یک مانع تخت بازتابیده می‌شوند و بر اثر این بازتاب، امواج دایره‌ای دیگری تشکیل می‌شود که در ترکیب با امواج تابیده، شبکه‌ای را در جلوی مانع تشکیل می‌دهند. شکل الف تصویری واقعی از این پدیده در تشت موج



شکل ۴ـ۵ بازتاب امواج تخت از مانع تخت در تشت موج

به خاطر داریم وقتی تیغهٔ نخی را بر سطح آب تشت موج به نوسان درمی‌آوردیم، امواج نخی بر سطح آب تشکیل می‌شد. اکنون اگر بر سر راه این امواج مانع‌هایی قرار دهیم، این امواج پس از برخورد با این موانع بازمی‌تابند. به‌چنین بازتابی، بازتاب در دو بُعد می‌گویند. ساده‌ترین شکل یک مانع، مانعی تخت است. در حضور این نوع مانع، امواج بازتابیده نیز تخت‌اند (شکل ۴ـ۵)[1]. شکل ۴ـ۶ طرحی از چنین بازتابی را نشان می‌دهد. با استفاده از جبهه‌های موج می‌توانیم به‌طور تجربی به رفتار موج در برخورد با یک مانع پی ببریم. طرح معادل دیگری برای نشان دادن رفتار موج، استفاده از نمودار پرتویی است. یک پرتو، پیکان مستقیمی عمود بر جبهه‌های موج است که جهت انتشار موج را نشان می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان نمودار پرتویی شکل ۴ـ۶ را در حضور جبهه‌های موج به‌صورت شکل ۴ـ۷ رسم کرد. زاویهٔ بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی تابیده (فرودی) را زاویهٔ تابش می‌نامند و با θ_i نشان می‌دهند[2] و زاویهٔ بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی بازتابیده را زاویهٔ بازتابش می‌نامند و با θ_r نشان می‌دهند[3]. آزمایش‌های نظیر آنچه در شکل ۴ـ۵ نشان داده شده است، ثابت می‌کند که برای هر وضعیت مانع، و همهٔ انواع دیگر موج، مانند امواج دایره‌ای یا کروی نیز، همواره زاویهٔ بازتابش برابر با زاویهٔ تابش است یعنی: $\theta_r = \theta_i$ که به آن، قانون بازتاب عمومی گفته می‌شود.

نمونهٔ دیگری از بازتاب امواج مکانیکی، بازتاب امواج صوتی است. صوت می‌تواند از یک سطح سخت مانند دیوار بازتابش کند. این مثالی از بازتاب امواج در سه بُعد است. بازتاب صوت نیز از همان قانون بازتاب عمومی پیروی می‌کند. در فعالیت ۴ـ۱ به‌تحقیق این امر می‌پردازیم.

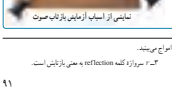


شکل ۴ـ۷ طرحی از جبهه‌های موج تابیده (خطوط تو پر) و جبهه‌های موج بازتابیده (خطوط خط‌چین)

شکل ۴ـ۷ نمودار پرتویی همراه با جبهه‌های موج برای بازتاب امواج تخت از سطح مانعی تخت

فعالیت ۴ـ۱

با اسباب نشان داده شده در شکل روبه‌رو، می‌توان زاویهٔ تابش و زاویهٔ بازتابش را در امواج صوتی اندازه‌گیری کرد. با استفاده از این اسباب، قانون بازتاب عمومی را برای امواج صوتی تحقیق کنید.



نمایشی از اسباب آزمایش بازتاب صوت

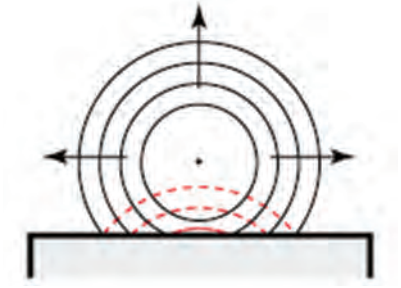
۱ـ توجه کنید که طول مانع باید در مقایسه با طول موج تابیده بسیار بزرگ باشد. دلیل این الزام را در بحث پراش امواج می‌بینید.

۲ـ incident به معنی تابش است.

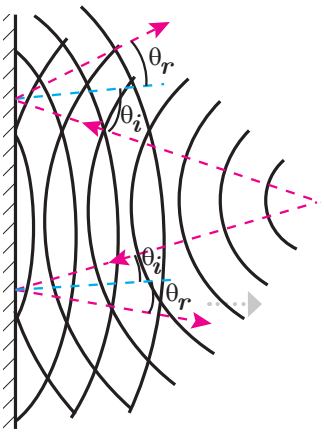
۳ـ reflection به معنی بازتابش است.

و شکل ب طرحی از آن را نشان می‌دهد. آزمایش‌هایی نظیر آنچه که در شکل الف نشان داده شده است ثابت می‌کند که برای هر وضعیت مانع، زاویهٔ تابش برابر با زاویهٔ تابش است. ولی باید توجه کرد زاویهٔ تابش در نقاط مختلف، متفاوت است و بنابراین زاویهٔ بازتابش نیز که برابر زاویهٔ تابش در محل برخورد است، در نقاط مختلف متفاوت می‌شود. شکل پ پرتوهای تابش و بازتابش را برای امواج دایره‌ای، در دو نقطه از مانع تخت نشان می‌دهد. توجه کنید که در هر نقطه، زاویه‌های تابش و بازتابش برابرند، ولی برابر با زاویه‌های تابش و بازتابش در نقطه‌ای دیگر نیستند.

شکل الف) امواج دایره‌ای بازتابیده از مانعی تخت در یک تشت موج در ترکیب با امواج دایره‌ای تابیده، شبکه‌ای را در جلوی مانع تشکیل داده‌اند.



شکل ب) طرحی از جبهه‌های موج تابیده (خطوط توپر) و جبهه‌های موج بازتابیده (خطوط خط‌چین) و ترکیب آنها در جلوی مانع.



شکل پ) قانون بازتاب در هر نقطهٔ سطح مانع بازتاب‌دهنده برقرار است.

پاسخ فعالیت ۴ـ۱

این اسباب شامل دو لولهٔ متصل به دو دهانه است که یکی نقش دهانهٔ ورودی صدا و دیگری نقش گوشی را بازی می‌کند. با ایجاد صدا در دهانهٔ ورودی، صوت پس از عبور از لولهٔ اول، و بازتاب از یک دیوارهٔ سخت، با عبور از لولهٔ دوم وارد دهانهٔ گوشی می‌شود و ما آن را می‌شنویم. برای جلوگیری از انتشار مستقیم صوت از منبع به سمت شنونده، مانعی برروی گیره‌های شکل نصب می‌شود. شنونده با حرکت لولهٔ دوم، در زاویهٔ مشخصی درمی‌یابد که صدا با بیشترین بلندی به گوش او می‌رسد. اکنون اگر مکان لولهٔ دوم ثابت شود، با وارسی زاویهٔ لولهٔ اول با مانع (خطّ عمود بر دیوارهٔ بازتابنده) و زاویهٔ لولهٔ دوم با مانع، درمی‌یابیم که بیشترین بلندی دریافتی به ازای برابر بودن زاویهٔ تابش و زاویهٔ بازتابش حاصل می‌شود.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

به خاطر داریم وقتی تیغهٔ تخی را بر سطح آب تنشت موج به نوسان درمی‌آوردیم، امواج تخی بر سطح آب تشکیل می‌شد. اکنون اگر بر سر راه این امواج مانع‌هایی قرار دهیم، این امواج پس از برخورد با این موانع بازمی‌تابند. به‌چنین بازتابی، بازتاب در دو بُعد می‌گویند. ساده‌ترین شکل یک مانع، مانعی تخت است. در حضور این نوع مانع، امواج بازتابیده نیز تخت‌اند (شکل ۴ـ۵)[1]. شکل ۴ـ۶ طرحی از چنین بازتابی را نشان می‌دهد. با استفاده از جبهه‌های موج می‌توانیم به‌طور تجربی به رفتار موج در برخورد با یک مانع پی ببریم. طرح معادل دیگری برای نشان دادن رفتار موج، استفاده از نمودار پرتویی است. یک پرتو، پیکان مستقیمی عمود بر جبهه‌های موج است که جهت انتشار موج را نشان می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان نمودار پرتویی شکل ۴ـ۶ را در حضور جبهه‌های موج به‌صورت شکل ۴ـ۷ رسم کرد.

شکل ۴ـ۵ بازتاب امواج تخت از مانع تخت در تنشت موج

زاویهٔ بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی تابیده (فرودی) را زاویهٔ تابش می‌نامند و با θ_i نشان می‌دهند[2] و زاویهٔ بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی بازتابیده را زاویهٔ بازتابش می‌نامند و با θ_r نشان می‌دهند[3]. آزمایش‌های نظیر آنچه در شکل ۴ـ۵ نشان داده شده است، ثابت می‌کند که برای هر وضعیت مانع، و همهٔ انواع دیگر موج، مانند امواج دایره‌ای یا کروی نیز، همواره زاویهٔ بازتابش برابر با زاویهٔ تابش است یعنی: $\theta_r = \theta_i$ که به آن، قانون بازتاب عمومی گفته می‌شود.

نمونهٔ دیگری از بازتاب امواج مکانیکی، بازتاب امواج صوتی است. صوت می‌تواند از یک سطح سخت مانند دیوار بازتابش کند. این مثالی از بازتاب امواج در سه بُعد است. بازتاب صوت نیز از همان قانون بازتاب عمومی پیروی می‌کند. در فعالیت ۴ـ۱ به تحقیق این امر می‌پردازیم.

شکل ۴ـ۷ نمودار پرتویی همراه با جبهه‌های موج برای بازتاب امواج تخت از سطح مانعی تخت

شکل ۴ـ۶ طرحی از جبهه‌های موج تابیده (خطوط تیره) و جبهه‌های موج بازتابیده (خطوط خط‌چین)

فعالیت ۴ـ۱

با اسباب نشان داده شده در شکل روبه‌رو، می‌توان زاویهٔ تابش و زاویهٔ بازتابش را در امواج صوتی اندازه‌گیری کرد. با استفاده از این اسباب، قانون بازتاب عمومی را برای امواج صوتی تحقیق کنید.

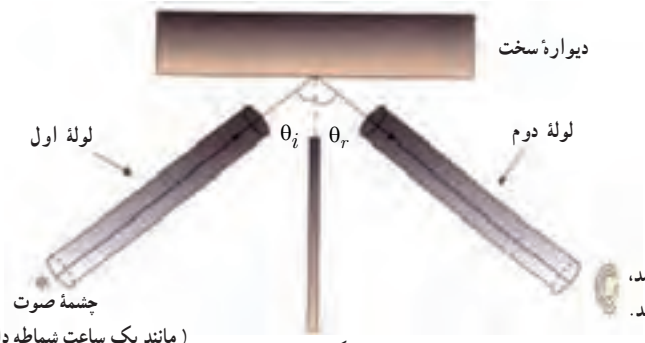
نمایشی از اسباب آزمایش بازتاب صوت

۱ـ توجه کنید که طول مانع باید در مقایسه با طول موج بسیار بزرگ باشد. دلیل این الزام را در بحث پراش امواج می‌بینید.

۲ـ ۱ سرواژهٔ کلمهٔ incident به معنی تابش است.

۳ـ ۲ سرواژهٔ کلمهٔ reflection به معنی بازتابش است.

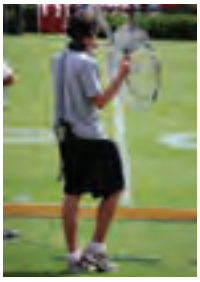
۹۱



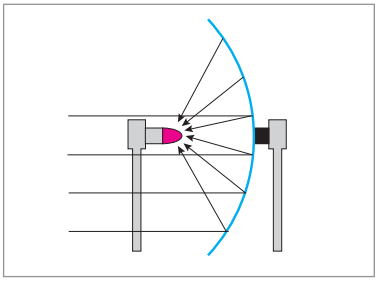
وقتی زاویهٔ تابش θ_i با زاویهٔ بازتابش θ_r برابر باشد، گوش صدای بازتابیده را با بیشترین بلندی دریافت می‌کند.

پاسخ فعالیت ۴ـ۲

در میکروفون سهموی از یک سطح کاو سهموی برای جمع و کانونی‌کردن امواج صوتی در یک گیرنده استفاده می‌شود. این میکروفون‌ها به‌همین دلیل، حساسیت بسیار زیادی به صداهایی دارند که موازی با محور سطح سهموی به این سطح می‌تابند. استفادهٔ مرسوم از این میکروفون‌ها در ثبت صداهای پرندگان دوردست، و صداهای میادین ورزشی (شکل الف)، و نیز استراق سمع است. شکل ب طرحی از چگونگی کار این دستگاه را نشان می‌دهد.

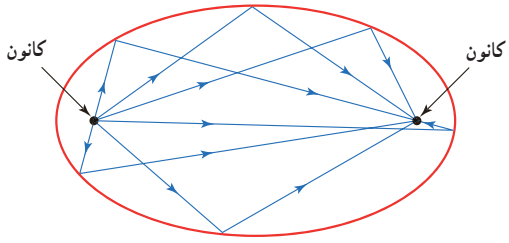


(الف)

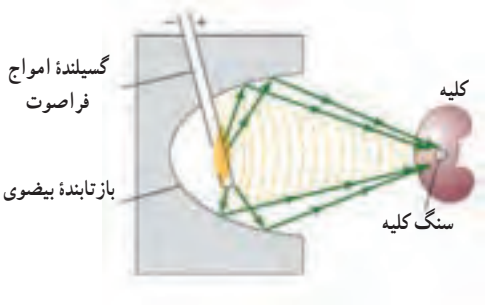


(ب)

دستگاه لیتوتریپسی از این ویژگی سطح بیضوی که دو کانون دارد استفاده می کند. بنابراین اگر موج صوتی در یک کانون ایجاد شود، این موج پس از بازتاب از نقاط مختلف سطح، در کانون دیگر جمع می‌شود.



در دستگاه لیتوتریپسی، چشمه‌ای فراصوت در یک کانون بازتابندهٔ بیضوی ایجاد می کنند و محل بیمار را طوری تنظیم می کنند که سنگ کلیهٔ او در محل کانون دوم سطح این بازتابنده باشد. شکل پ، طرحی از چگونگی کار این دستگاه را نشان می‌دهد.



فیزیک ۳

امواج صوتی می‌توانند مانند سایر امواج از سطوح خمیده نیز بازتابیده شوند. شاید در پارک‌های تفریحی دو سطح کاو را در برابر هم دیده باشید که وقتی شخصی در کانون یکی از این سطوح صحبت می‌کند، شخص دیگری در کانون سطح کاو دیگر آن را می‌شنود (شکل ۴ـ۸).

(ب)

(الف)

شکل ۴ـ۸ الف) دو سطح بازتابندهٔ کاو در یک پارک تفریحی و ب) طرحی از بازتاب امواج صوتی از دو سطح کاو مقابل هم با استفاده از نمودار پرتویی

فعالیت ۴ـ۲

دربارهٔ میکروفون سهموی که از آن برای ثبت صداهای ضعیف و دستگاه *لیتوتریپسی*[1] که از آن برای شکستن سنگ‌های کلیه، با کمک بازتابنده‌های بیضوی استفاده می‌شود تحقیق کنید.

تصویری از یک میکروفون سهموی

پژواک[2]: در برابر دیواره یا صخرهٔ بلندی که چند ده متر از شما فاصله دارد، بایستید و یک بار دست بزنید. پس از مدت زمان کوتاهی، بازتاب صدای دست زدن خود را خواهید شنید. اگر صوت پس از بازتاب، با یک تأخیر زمانی به گوش شنونده‌ای برسد که صوت اولیه را مستقیماً می‌شنود، به چنین بازتابی پژواک می‌گویند. اگر تأخیر زمانی بین این دو صوت کمتر از ۰/۱s باشد، گوش انسان نمی‌تواند پژواک را از صوت مستقیم اولیه تمیز دهد.

فناوری و کاربرد: مکان‌یابی پژواکی

مکان‌یابی پژواکی[3] روشی است که بر اساس امواج صوتی بازتابیده از یک جسم، مکان آن جسم را تعیین می کند. مکان‌یابی پژواکی به همراه اثر دوپلر که در فصل پیش آموختیم، در تعیین مکان اجسام متحرک و نیز تعیین تندی آنها به کار می‌رود. برخی از جانوران نظیر خفاش و دُلفین از این روش استفاده می کنند. همین‌طور در فناوری‌هایی نظیر اندازه‌گیری تندی شارش خون در رگ‌ها نیز از این روش استفاده می‌شود. خفاش، فورانی از امواج فراصوتی را گسیل می کند که این بسته به نوع خفاش از دهان یا سوراخ‌های بینی آن گسیل می‌شود. این امواج از اشیایی که در مسیر خفاش قرار دارند بازمی‌تابد و بدین ترتیب خفاش را از اشیایی که بر سر راه او قرار دارند آگاه می‌سازد. البته بسته به اینکه شیء بازتابنده، خود خفاش، یا هر دو متحرک باشند، خفاش تغییر بسامدی ناشی از اثر دوپلر را در موج بازتابیده ادراک می کند و بدین‌وسیله می‌تواند سرعت خود یا شیء متحرک را تعیین کند. خفاش‌ها از این ویژگی برای شناسایی و شکار طعمه‌های خود استفاده می کنند. همچنین در دستگاه سونار که در کشتی‌ها برای مکان‌یابی اجسام زیر آب به‌کار می‌رود، و در سونوگرافی نیز از مکان‌یابی پژواکی استفاده می‌شود.

۱ـ Lithotripsy ۲ـ Echo ۳ـ Echolocation

۹۲

خوب است تمرین ۴ـ۱ را بی‌درنگ در همین‌جا مطرح می کنید و از دانش‌آموزان بخواهید پاسخ خود را بیان کنند و سپس پاسخ‌ها را بررسی و پاسخ صحیح را مطرح کنید.

پاسخ تمرین ۴ـ۱

همان‌طور که در متن درس اشاره شد، اگر تأخیر زمانی صوت بازتابیده و صوت اولیه کمتر از ۰/۱s باشد، گوش انسان قادر به تمیز پژواک از صوت اولیه نخواهد بود. از اینجا می‌توان فاصلهٔ کمینهٔ لازم بین چشمهٔ صوت و سطح بازتاباننده را برای تمیز یک پژواک از صوت اولیه محاسبه کنیم. اگر چشمهٔ صوت و شنونده هردو تقریباً در یک مکان واقع باشند، آنگاه با توجه به اینکه تندی صوت در هوا را تقریباً ۳۴۰ m/s درنظر گرفته‌ایم، این مسافت به‌راحتی با استفاده از رابطهٔ $x = vt$ محاسبه می‌شود. با جای‌گذاری $x = 2L$، که L فاصلهٔ بین چشمه و سطح بازتاباننده است، به ازای $t = ۰/۱۰\,s$ خواهیم داشت :

$$L = \frac{1}{2}vt = \frac{1}{2}(۳۴۰\,m/s)(۰/۱۰\,s) = ۱۷\,m$$

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

تعرین ۴ـ۱

کمترین فاصلهٔ بین شما و یک دیوار بلند چقدر باشد تا پژواک صدای خود را از صدای اصلی تمیز دهید؟ تندی صوت در هوا را ۳۴۰ m/s در نظر بگیرید.

مثال ۴ـ۱

وال عنبر یکی از جانورانی است که با استفاده از پژواک امواج فراصوتی، مکان‌یابی می‌کند. بسامد امواج فراصوتی‌ای که این وال تولید می‌کند حدود ۱۰۰ kHz است. با توجه به اینکه تندی صوت در آب دریا طبق جدول ۳ـ۱ حدود $۱/۵۲\times۱۰^{۳}\,m/s$ است، الف) طول‌موج این صوت و ب) زمان رفت و برگشت صوت گسیل شده توسط وال برای مانعی که در فاصلهٔ ۱۰۰ m از آن قرار گرفته، چقدر است؟

پاسخ : الف) با استفاده از رابطهٔ $\lambda = v/f$ داریم :

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{۱/۵۲\times۱۰^{۳}\,m/s}{۱۰۰\times۱۰^{۳}\,s^{-۱}} = ۱/۵۲\times۱۰^{-۲}\,m = ۱/۵۲\,cm$$

همان‌طور که بعداً در بحث پرتاس خواهید دید برای تشخیص یک جسم، اندازهٔ آن باید در حدود طول‌موج به کار رفته یا بزرگ‌تر از آن باشد. بنابراین، وال اجسامی در حدود این طول‌موج یا بزرگ‌تر را می‌تواند تشخیص دهد.

ب) زمان لازم برای حرکت رفت و برگشت صوت بین وال و مانع برابر است با :

$$t = \frac{x}{v} = \frac{۲L}{v} = \frac{۲\times۱۰۰\,m}{۱/۵۲\times۱۰^{۳}\,m/s} = ۰/۱۳\,s$$

بازتاب امواج الکترومغناطیسی : امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توانند از یک سطح، بازتابیده شوند و بازتاب آنها از همان قانون بازتاب عمومی پیروی می‌کند.

امواج الکترومغناطیسی تخت تابیده به یک سطح کاو پس از بازتابش، مانند شکل ۴ـ۹ الف در یک نقطه کانونی می‌شوند. این نمونهٔ دیگری از بازتاب در سه بُعد است. از همین سازوکار برای دریافت امواج رادیویی توسط آنتن‌های بشقابی و یا امواج فروسرخ برای گرم کردن آب یا مواد غذایی در اجاق‌های خورشیدی (شکل ۴ـ۹ ب) استفاده می‌شود.

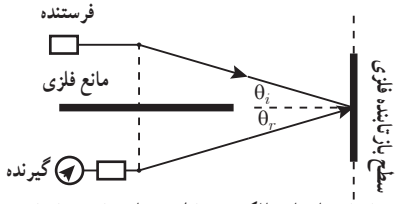
فعالیت ۴ـ۳

رادار دوپلری : از امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توان برای مکان‌یابی پژواکی استفاده کرد. در این مورد و کاربرد آن به‌خصوص در تعیین تندی خودروها تحقیق کنید.

شکل ۴ـ۹ الف) یک موج الکترومغناطیسی تخت پس از بازتاب از یک سطح کاو در نقطه‌ای مقابل سطح کانونی می‌شود. ب) تصویری از یک اجاق خورشیدی

۹۳

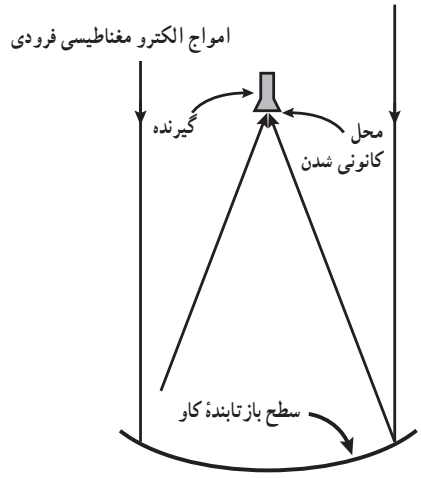
توجه کنید که بازتاب امواج الکترومغناطیسی را می‌توانید به عنوان نمونه‌ای از بازتاب در سه بُعد مطرح کنید. همچنین چون این مبحث را عمدتاً برای نور مطرح می‌کنند خوب است به اسباب‌های آزمایشگاهی‌ای که قانون بازتاب عمومی را بر فرض برای امواج رادیویی بررسی کرده‌اند نیز اشاره کنید تا دانش‌آموزان صرفاً این قانون را برای نور نپندارند. شکل زیر طرحی از چنین آزمایش‌هایی را نشان داده است. یک فرستندهٔ امواج رادیویی (RF)، امواجی را به سمت سطح یک بازتابندهٔ فلزی ارسال کرده است. در صورت حضور مانع فلزی می‌توان توسط گیرنده، امواج بازتابیده را آشکار کرد. با حرکت دادن سطح بازتاباننده در امتداد خط CD که موازی خط AB است، مشاهده می‌شود که وقتی سطح بازتاباننده وسط خط AB (در امتداد مانع فلزی) است، گیرنده پاسخ شدیدتری را دریافت و آشکار می‌کند و به این ترتیب قانون بازتاب عمومی برای امواج رادیویی تأیید می‌شود.



بازتاب امواج الکترومغناطیسی از قانون بازتاب عمومی پیروی می‌کند، به طوری که $\hat{\theta}_i = \hat{\theta}_r$ است.

سازوکار تقریباً مشابهی در رادارها وجود دارد، با این تفاوت که آنتن گیرنده و فرستندهٔ امواج رادیویی یکی است و امواج رادیویی گسیل شده توسط یک آنتن، پس از بازتاب از مثلاً یک هواپیما دوباره به همان آنتن بازمی‌گردند و بدین ترتیب حضور هواپیما آشکار می‌شود.

خوب است با رسم طرح‌هایی مانند زیر، چگونگی کانونی شدن امواج رادیویی به‌وسیلهٔ یک آنتن بشقابی را نشان دهید.



فصل ۴- برهم‌کنش‌های موج

تمرین ۴ـ۱

کمترین فاصلهٔ بین شما و یک دیوار بلند چقدر باشد تا پژواک صدای خود را از صدای اصلی تمیز دهید؟ تندی صوت در هوا را ۳۴۰ m/s در نظر بگیرید.

مثال ۴ـ۱

وال عنبر یکی از جانورانی است که با استفاده از پژواک امواج فراصوتی، مکان‌یابی می‌کند. بسامد امواج فراصوتی‌ای که این وال تولید می‌کند حدود ۱۰۰ kHz است. با توجه به اینکه تندی صوت در آب دریا طبق جدول ۳ـ۱ حدود $۱/۵۲\times۱۰^{۳}\ m/s$ است، الف) طول موج این صوت و ب) زمان رفت و برگشت صوت گسیل شده توسط وال برای مانعی که در فاصلهٔ ۱۰۰ m از آن قرار گرفته، چقدر است؟

پاسخ: الف) با استفاده از رابطهٔ $\lambda = v/f$ داریم:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{۱/۵۲\times۱۰^{۳}\ m/s}{۱۰۰\times۱۰^{۳}\ s^{-۱}} = ۱/۵۲\times۱۰^{-۲}\ m = ۱/۵۲\ cm$$

همان‌طور که بعداً در بحث یرانی خواهید دید برای تشخیص یک جسم، اندازهٔ آن باید در حدود طول موج به کار رفته یا بزرگ‌تر از آن باشد. بنابراین، وال اجسامی در حدود این طول موج یا بزرگ‌تر را می‌تواند تشخیص دهد.

ب) زمان لازم برای حرکت رفت و برگشت صوت بین وال و مانع برابر است با:

$$t = \frac{x}{v} = \frac{۲L}{v} = \frac{۲\times۱۰۰\ m}{۱/۵۲\times۱۰^{۳}\ m/s} = ۰/۱۳\ s$$

بازتاب امواج الکترومغناطیسی: امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توانند از یک سطح، بازتابیده شوند و بازتاب آنها از همان قانون بازتاب عمومی پیروی می‌کند.

امواج الکترومغناطیسی تخت تابیده به یک سطح کاو پس از بازتابش، مانند شکل ۴ـ۹ الف در یک نقطه کانونی می‌شوند. این نحوهٔ دیگری از بازتاب در سه بُعد است. از همین سازوکار برای دریافت امواج رادیویی توسط آنتن‌های بشقابی و یا امواج فروسرخ برای گرم کردن آب یا مواد غذایی در اجاق‌های خورشیدی (شکل ۴ـ۹ ب) استفاده می‌شود.

(الف)

(ب)

شکل ۴ـ۹ الف) بازتاب موج الکترومغناطیسی تخت پس از بازتاب از یک سطح کاو در نقطه‌ای مقابل سطح، کانونی می‌شود. ب) تصویری از یک اجاق خورشیدی

فعالیت ۴ـ۳

رادار دوبلری: از امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توان برای مکان‌یابی پژواکی استفاده کرد. در این مورد و کاربرد آن به‌خصوص در تعیین تندی خودروها تحقیق کنید.

۹۳

پاسخ فعالیت ۴ـ۳

روش کار به این ترتیب است که امواج میکروموج یا فروسرخ را مطابق شکل کتاب در محدودهٔ مشخصی گسیل می‌کنند. فاصلهٔ خودرو از فرستندهٔ گسیلندهٔ موج با اندازه‌گیری زمان بین گسیل و دریافت موج به‌دست می‌آید. تندی خودرو نیز از تغییر بسامد موج دریافتی نسبت به موج گسیل‌شده با استفاده از رابطهٔ دوپلری که برای امواج الکترومغناطیسی به‌کار می‌آید، تعیین می‌شود. خوب است بدانید این رابطه در تندی‌ها کم، برای تابش مستقیم $\Delta f = ۲\frac{v}{c}f_{\circ}$ را به‌دست می‌دهد که در آن c تندی نور ($\approx ۳/۰\times۱۰^{۸}\ m/s$) است. برای تابش زاویه‌دار که در شکل نشان داده شده است به $\Delta f = ۲f_{\circ}\frac{v\cos\theta}{c}$ می‌رسیم که در آن θ زاویهٔ بین پرتوی گسیل‌شده و امتداد حرکت خودرو است. یک مثال نوعی برای تابش مستقیم ($\theta = ۰$) را درنظر می‌گیریم. یک پلیس با دریافت بازتاب امواج گسیل‌شده با بسامد $۱/۷\times۱۰^{۱۴}\ Hz$ به سمت یک خودرو به تغییر بسامدی برابر $۴/۷\times۱۰^{۷}\ Hz$ می‌رسد. آنگاه با استفاده از رابطهٔ بالا به $v = ۱۵۰\ km/h$ برای تندی خودرو می‌رسیم.

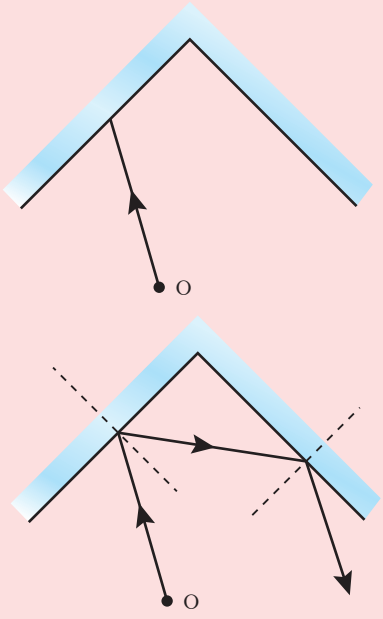
پاسخ فعالیت ۳ـ۹ کتاب تجربی

این فعالیت که برای رشتهٔ تجربی آمده است، زیرمجموعه‌ای از مکان‌یابی پژواکی است که در« فنّاوری و کاربرد» رشتهٔ ریاضی نیز مطرح شده است. در اندازه‌گیری تندی شارش خون، امواج فراصوت (با بسامدی عموماً بین ۲ تا ۱۰ مگاهرتز) به سمت یک رگ خونی گسیل می شود و با استفاده از تغییر بسامد باریکهٔ موج فراصوتی بازتابیده از گویچهٔ سرخ، که ناشی از اثر دوپلر است، تندی vی آن به‌دست می‌آید. خوب است بدانید رابطه‌ای که از آن برای این تندی استفاده می‌شود، برای تابش مستقیم $\Delta f \approx \frac{v}{v_s}f_{\circ} - (\frac{-v}{v_s})f_{\circ} = ۲\frac{v}{v_s}f_{\circ}$ است که در آن v_s تندی صوت است. برای تابش زاویه‌دار که در شکل نشان داده شده است

به $\Delta f \approx ۲f_{\circ}\frac{v\cos\theta}{v_s}$ می‌رسیم. آنگاه با دانستن تغییر بسامد ناشی از بازتاب و زاویهٔ تابش امواج فراصوت می‌توان به‌راحتی تندی vی شارش خون را محاسبه کرد. برای اینکه به حسی از عدد تندی شارش خون دست‌یابید، یک تابش غیرمستقیم با $\theta = ۳۰^{\circ}$ را درنظر بگیرید. در یک آزمایش نوعی، به ازای $v_s = ۱۵۴۰\,m/s$ و $f_{\circ} = ۳/۰\,MHz$ به تغییر بسامدی حدود $۱/۰\,MHz$ می‌رسند که از آن تندی شارش خون حدود $۳۰\,cm/s$ حاصل می شود. خوب است بدانید تندی شارش خون به سطح مقطع رگ بستگی دارد و مثلاً در آئورت حدود $۴۰\,cm/s$، و در مویرگ‌ها حدود $۰/۳۰\,cm/s$ است. البته در هنگام دویدن این عددها افزایش می‌یابد.

تمرین‌های پیشنهادی

۱ در شکل زیر پرتوهای بازتابیده از آینه‌ها را رسم کنید.



پاسخ : با رسم خطوط عمود بر دو آینه داریم :

۲ فرض کنید پس از ۱/۵ ثانیه، و چندین بازتاب رفت و برگشت *آخرین* پژواک صدا را از دیواری که $۲۵/۷\,m$ از شما فاصله دارد می‌شنوید. این پژواک مربوط به چندمین بازتاب است؟

پاسخ : به ازای یک رفت و برگشت، زمان پیمودن صوت $T/۲$ می‌شود. بنابراین به‌ازای n رفت و برگشت، زمان برابر $T/(n+۱)$ است. آنگاه برای بازتاب‌های چندگانه داریم :

$$d = vt = (۳۴۳\ m/s)(\frac{۱/۵\ s}{n+۱})$$

و در نتیجه

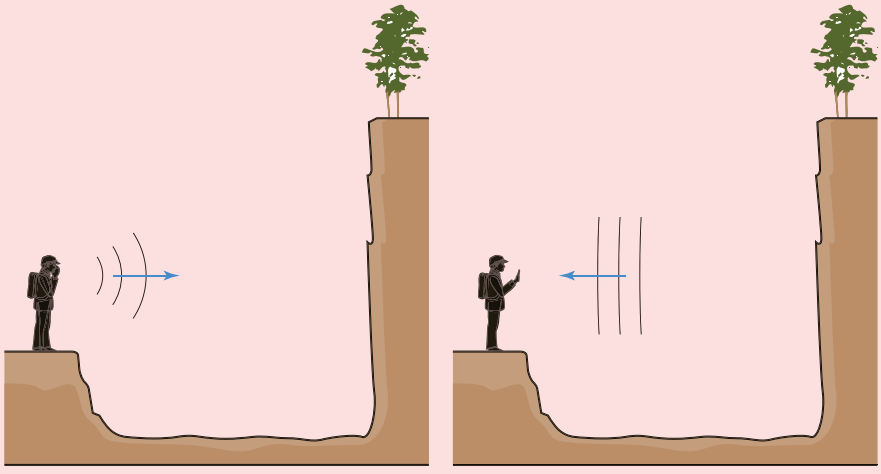
$$n = \frac{(۳۴۳\ m/s)(۱/۵\ s)}{۲۵/۷\ m} - ۱ = ۱۹$$

یعنی پس از ۱۹ رفت و برگشت، شخص آخرین پژواک را دریافت کرده است.

فعالیت‌های پیشنهادی

۱ تندی صوت را اندازه بگیرید

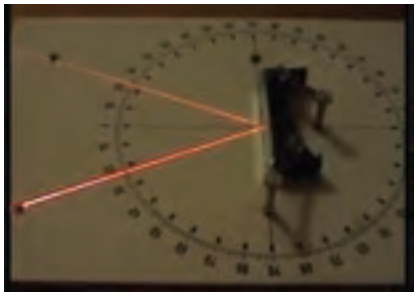
در برابر دیواره یا صخرهٔ بلندی که حدوداً ۱۰۰m از شما فاصله دارد بایستید و یک بار دست بزنید. پس از مدت زمان کوتاهی پژواک صدای کف زدن خود را خواهید شنید. برای آنکه تندی صوت را اندازه بگیرید، روش مناسب آن است که آن‌قدر به‌طور متولی کف بزنید تا اینکه صدای هر کف زدن را درست هم‌زمان با یک پژواک بشنوید. آنگاه باید از یک دوست خود بخواهید که تعداد کف زدن‌های شما را در یک مدت زمان معین (مثلاً ۳۰s) بشمارد. از اینجا می‌توانید فاصلهٔ زمانی بین دو کف زدن متوالی را محاسبه کنید. با توجه به هم‌زمانی هر پژواک با یک صدای کف زدن، این فاصلهٔ زمانی برابر زمان رفت و برگشت صوت است. اکنون با دانستن فاصلهٔ دقیق خود از دیواره یا صخره می‌توانید با استفاده از رابطهٔ $x=vt$ تندی صوت را در محل آزمایش تعیین کنید.



۲ قانون بازتاب را تحقیق کنید.

دو جفت سوزن ته‌گرد با رنگ‌های متفاوت را روی سطح افقی تختی در برابر یک آینهٔ تخت قرار دهید طوری که این چهار سوزن، مطابق شکل، یک نمای Vشکل را تشکیل دهند که رأس آن تقریباً در وسط آینه قرار گیرد. اکنون به آینه نگاه کنید و سر خود را آن‌قدر حرکت دهید تا بتوانید تصویر یک جفت سوزن را در امتداد جفت سوزن دیگر ببینید. این فعالیت، روشی دیگر برای تحقیق قانون بازتاب است.

در اینجا خوب است ضمن یادآوری مفاهیمی که دانش‌آموزان در کتاب علوم هشتم خود آموختند، دوباره اسباب آزمایش بازتاب نور را جهت تحقیق قانون بازتاب عمومی به دانش‌آموزان معرفی کنید. اگر با یک لیزر مدادی باریکهٔ نور را به آینه‌ای تخت که عمود بر صفحهٔ مدرجی برحسب زاویه قرار دارد بتابانند، درمی‌یابند که اندازهٔ زاویه‌های تابش و بازتابش برای هر زاویهٔ تابشی برابر است و بدین ترتیب قانون بازتاب عمومی را برای نور مرئی تحقیق می‌کنند.



فیزیک ۳

کریستین هویگنس (۱۶۹۵ـ۱۶۲۹ م.)
در لاهه هلند به دنیا آمد. در دانشگاه‌های لیدن و پوآ تحصیل کرد و هنگامی که فقط ۲۲ سال داشت مقاله‌هایی در زمینهٔ ریاضی و اختربینایی نوشت که مورد توجه رنه دکارت، ریاضی‌دان نامی، قرار گرفت. هویگنس در زمان خود دانشمندی با ذوق و مبتکر بود. در سال ۱۶۵۷ ساعت آونگی را اختراع کرد که پیش از آن دانشمندانی مانند گالیله روی آن کار کرده بودند، اما به جایی نرسیده بودند. علاوه بر این، او پژوهش‌هایی با ارزش روی نور نیز انجام داد و نظریهٔ مشهور خود را در این مورد ارائه کرد. با به نظریهٔ هویگنس، نور از موج‌های زیادی تشکیل شده است که این موج‌ها را می‌توان به موج‌های صوتی یا موج‌های روی آب تشبیه کرد. نظریهٔ موجی بودن نور هویگنس بحث‌های فراوانی برانگیخت تا اینکه در حدود ۲۰۰ سال بعد ماکسول فیزیک‌دان، اسکاتلندی دوباره به این نظریه پرداخت و به آن جان تازه‌ای بخشید. هویگنس اخترشناس برجسته‌ای نیز بود و اسباب‌ها و دستگاه‌های نوری زیادی را اختراع کرد. اختراع پرسپکتیو را نیز به او نسبت داده‌اند.

شکل ۴ـ۱۱ طرحی از بازتاب پخشندهٔ نور از سطحی ناهموار. توجه کنید که در اینجا نیز در هر بازتاب، زاویه‌های تابش و بازتاب با هم برابرند و پرتوی تابش، پرتوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده در یک صفحه واقع‌اند.

همان‌طور که قبلاً دیدیم نور مرئی بخشی از طیف امواج الکترومغناطیسی است. بنابراین نور مرئی نیز از همان قانون بازتاب عمومی امواج پیروی می‌کند؛ یعنی زاویهٔ تابش و بازتابش در هر بازتابشی با هم برابرند (شکل ۴ـ۱۰ الف). افزون بر این، برای نور مرئی نیز همچون سایر امواج، پرتوی تابش، پرتوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده، در هر بازتابشی در یک صفحه واقع‌اند (شکل ۴ـ۱۰ ب).

شکل ۴ـ۱۰ الف) در هر بازتابشی زاویهٔ تابش و زاویهٔ بازتابش با هم برابرند. ب) پرتوی تابش، پرتوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده، در یک صفحه واقع‌اند.

در مواردی که سطح بازتابندهٔ نور همچون یک آینه، بسیار هموار باشد، بازتاب نور را بازتاب آینه‌ای[۱] یا منظم می‌گویند.

نوع دیگر بازتابش، بازتاب پخشنده[۲] یا نامنظم است. این بازتاب وقتی رخ می‌دهد که نور به سطحی برخورد کند که صیقلی و هموار نباشد. پرتوهای نور به‌طور کاتوره‌ای از پستی و بلندی‌های سطح بازتابیده، و در تمام جهات پراکنده می‌شوند (شکل ۴ـ۱۱). به‌دلیل این بازتاب است که شما این صفحهٔ کاغذ، دیوار، دستتان، دوست خود، و... را می‌بینید. در بازتاب آینه‌ای از یک آینهٔ تخت، بازتابش یک دسته پرتوی موازی را فقط در یک جهت می‌توانید ببینید، ولی در بازتاب پخشنده، بازتابش این دسته پرتو را می‌توانید در جهت‌های مختلف مشاهده کنید. توجه کنید منظور از سطح ناهموار آن است که سطح در مقایسه با طول موج نور ناهموار است؛ مثلاً یک کاغذ در ظاهر بسیار هموار به نظر می‌رسد اما از دید میکروسکوپی این سطح از اجزای متمایز و کوچکی تشکیل شده است که بسیار پرزگ‌تر از ۱μm هستند. با توجه به اینکه طول‌موج نور مرئی در حدود ۰/۵ μm است، چنین سطحی برای نور مرئی، ناهموار محسوب می‌شود. در مقابل، ناهمواری‌های یک آینه یا یک سطح فلزی صیقلی، بسیار کوچک‌تر از ۱μm است و بنابراین برای نور مرئی سطوحی هموار محسوب می‌شوند.

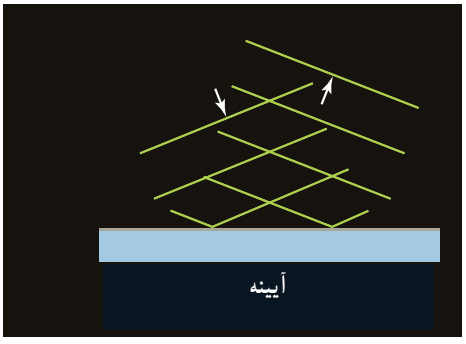
۴ـ۲ شکست موج

رنگ‌های رنگین کمان، تصویری که با کمک عینک می‌بینیم، تصاویری که با استفاده از عدسی‌های ابزارهای نوری مانند میکروسکوپ و دوربین دیده می‌شود، و... مثال‌های رایجی از شکسته‌شدن موج‌های نوری در پیرامون ما است. این پدیده برای امواج صوتی نیز رخ می‌دهد ولی به اندازهٔ موج‌های نوری اهمیت ندارد. وقتی موج به مرز جدایی دو محیط می‌رسد بخشی از آن بازتابیده می‌شود و بخشی دیگر عبور می‌کند که این افزون بر جذب موج است که در هر دو محیط رخ می‌دهد؛ مثلاً عبور یک تپ در طول طنابی را در نظر بگیرید که از دو بخش، یکی نازک و دیگری ضخیم، تشکیل شده است. وقتی

۱ـ specular reflection
۲ـ diffuse reflection

۹۴

خوب است اشاره شود که واژهٔ «آینه‌ای» در بازتاب آینه‌ای به این بازمی‌گردد که سطح بازتابیده باید همچون یک آینه بسیار هموار باشد. بدین ترتیب، مثلاً سطح آرام آب یک برکه نیز سطحی است که از آن بازتاب آینه‌ای رخ می‌دهد. همچنین خوب است طرح بازتاب آینه‌ای را با جبهه‌های موج تخت نیز افزون بر نمایش پرتویی نشان دهید.



در اینجا خوب است با استفاده از دانشی که دانش‌آموزان از فصل پیش آموخته‌اند این مبحث را بیشتر باز کنید و در ضمن به توصیف وضعیتی که تپ از بخش ضخیم به بخش نازک می‌رسد نیز بپردازید. در مورد اول اشاره کنید که چون چگالی‌های خطی جرم بخش‌های نازک و ضخیم متفاوت ولی کشش در این دو بخش یکسان است، در قسمت ضخیم که چگالی خطی جرم بیشتر است، تندی کمتر و در قسمت نازک که چگالی خطی جرم کمتر است، تندی بیشتر است. هرچه بخش دوم ضخیم‌تر باشد، انرژی کمتری عبور می‌کند و بنابراین انرژی بیشتری بازمی‌تابد. در حالت حدّی که بخش دوم مثلاً دیواره یا تکیه‌گاه صلبی باشد، تقریباً همهٔ انرژی فرودی بازمی‌تابد. بنابراین در توضیح مورد دوم که تپ از بخش ضخیم به بخش نازک وارد می‌شود، انرژی موج عبوری بیشتر است، ولی موج بازتابیده وارون نمی‌شود.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

این تپ از سمت بخش نازک به مرز دو بخش می‌رسد (شکل ۴ـ۱۲ الف)، بخشی از این تپ بازمی‌تابد و بخشی دیگر عبور می‌کند (شکل ۴ـ۱۲ ب). برای یک موج سینوسی بسامد این دو موج همان بسامد موج فرودی است که توسط چشمهٔ موج تعیین می‌شود. بنابراین موج عبوری که تندی آن در قسمت ضخیم کمتر است، با به رابطهٔ $\lambda = v/f$، طول‌موج کمتری نسبت به موج فرودی خواهد داشت.

پرسش ۴ـ۱

اگر موج سینوسی از قسمت ضخیم طناب به قسمت نازک آن وارد شود، بسامد، تندی، و طول‌موج موج عبوری در مقایسه با موج فرودی چه تغییری می‌کند؟

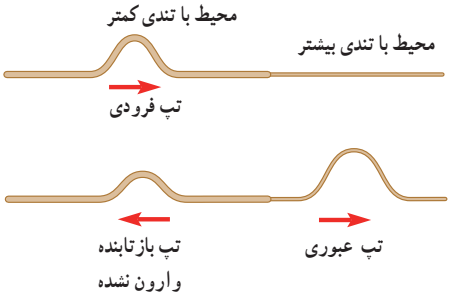
در حالت‌های دو یا سه بُعدی با عبور موج از یک مرز و ورود آن به محیط دیگر، تندی موج تغییر می‌کند و ممکن است جهت انتشار موج نیز تغییر کند و اصطلاحاً موج شکست پیدا کند. همان‌طور که پیش از این دیدیم، تندی امواج روی سطح آب به عمق آن بستگی دارد. از این ویژگی می‌توانیم برای تحقیق پدیدهٔ شکست در تشت موج استفاده کنیم؛ یعنی با تغییردادن عمق آب در بخشی از تشت می‌توان تندی موج سطحی در آن بخش را تغییر داد که این همان‌طور که دیدیم به تغییر جهت انتشار موج در آن بخش، و به عبارتی به شکست موج می‌انجامد. مشاهده می‌شود با ورود موج به بخش کم‌عمق، تندی موج سطحی کاهش می‌یابد. روشن است، آن بخش موج که زودتر به ناحیهٔ کم‌عمق می‌رسد، چون با تندی کمتر حرکت می‌کند از بقیهٔ موج که هنوز وارد این ناحیه نشده عقب می‌افتد و بنابراین فاصلهٔ بین جبهه‌های موج و در نتیجه طول‌موج کاهش می‌یابد و به این ترتیب جبهه‌های موج مطابق شکل ۴ـ۱۳ در مرز دو ناحیه تغییر جهت می‌دهند. این مطلب را می‌توان در نزدیک شدن امواج به یک ساحل شیب‌دار نیز مشاهده کرد که با رسیدن جبهه‌های موج به ساحل که در آنجا عمق آب کم می‌شود، جهت انتشار جبهه‌های موج تغییر می‌کند. شاید برای تفهیم این موضوع، مثال یک اسباب‌بازی چرخ‌دار که با عبور از کف صاف اتاق وارد قالیچه‌ای می‌شود، مناسب باشد. با ورود این اسباب‌بازی به قالیچه، تندی آن کم می‌شود و در نتیجه مسیر آن تغییر می‌کند (شکل ۴ـ۱۴).

شکل ۴ـ۱۲ الف) تپ فرودی از سمت چپ طناب وارد بخش ضخیم‌تر آن می‌شود. تپ بازتابیده و تپ عبوری را نشان دهید. ب) بخشی از آن از مرز عبور می‌کند و بخشی بازمی‌تابد.

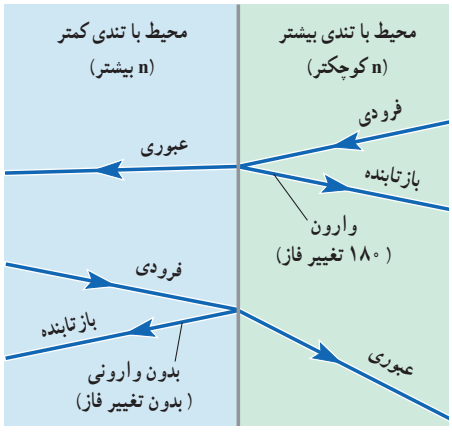
شکل ۴ـ۱۳ الف) طرحی از شکست امواج سطحی در مرز آب عمیق و آب کم‌عمق در تشت موج و ب) تصویری واقعی از شکست امواج سطحی در تشت موج

شکل ۴ـ۱۴ وقتی اسباب‌بازی وارد قالیچه می‌شود، مسیرش تغییر می‌کند؛ زیرا چرخی که نخست به قالیچه می‌رسد، زودتر کند می‌شود.

۹۵



در مورد نور نیز وضعیت مشابهی رخ می‌دهد و شکل زیر بسیار آموزنده است.



در این فیلم ورود تپ از یک محیط کم‌چگال به محیطی چگال‌تر را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم ورود تپ از یک محیط پرچگال به محیطی کم‌چگال‌تر را می‌بینید.

فیلم

پاسخ پرسش ۴ـ۱

وقتی موج سینوسی از قسمت ضخیم طناب به قسمت نازک آن وارد شود، بسامد موج عبوری تغییری نمی‌کند، زیرا بسامد توسط چشمهٔ موج تعیین می‌شود. اما تندی در قسمت نازک طناب بیشتر است و بنا به رابطهٔ $\lambda = v/f$ درمی‌یابیم طول‌موجِ موج عبوری بیشتر از طول‌موجِ موج فرودی می‌شود. (همچنین محض اطلاعات عمومی خوب است بدانید اینجا نیز موج بازتابیده داریم، ولی موج بازتابیده تغییر فاز نمی‌دهد.)

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

این تپ از سمت بخش نازک به مرز دو بخش می‌رسد (شکل ۴ـ۱۲ الف)، بخشی از این تپ بازمی‌تابد و بخشی دیگر عبور می‌کند (شکل ۴ـ۱۲ ب). برای یک موج سینوسی بسامد این دو موج همان بسامد موج فرودی است که توسط چشمهٔ موج تعیین می‌شود. بنابراین موج عبوری که تندی آن در قسمت ضخیم کمتر است، بنا به رابطهٔ $\lambda = v/f$، طول‌موج کمتری نسبت به موج فرودی خواهد داشت.

پرسش ۴ـ۱

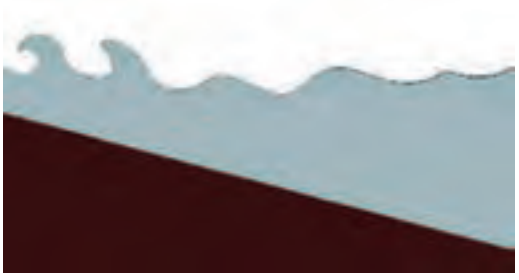
اگر موج سینوسی از قسمت ضخیم طناب به قسمت نازک آن وارد شود، بسامد، تندی، و طول‌موج موج عبوری در مقایسه با موج فرودی چه تغییری می‌کند؟

در حالت‌های دو یا سه بُعدی با عبور موج از یک مرز و ورود آن به محیط دیگر، تندی موج تغییر می‌کند و سکن است جهت انتشار موج نیز تغییر کند و اصطلاحاً موج شکست پیدا کند. همان‌طور که پیش از این دیدیم، تندی امواج روی سطح آب به عمق آن بستگی دارد. از این ویژگی می‌توانیم برای تحقیق پدیدهٔ شکست در تنشت موج استفاده کنیم؛ یعنی با تغییردادن عمق آب در بخشی از تنشت می‌توان تندی موج سطحی در آن بخش را تغییر داد که این همان‌طور که دیدیم به تغییر جهت انتشار موج در آن بخش، و به عبارتی به شکست موج می‌انجامد. مشاهده می‌شود با ورود موج به بخش کم‌عمق، تندی موج سطحی کاهش می‌یابد. روشن است، آن بخش موج که زودتر به ناحیهٔ کم‌عمق می‌رسد، چون با تندی کمتر حرکت می‌کند از بقیهٔ موج که هنوز وارد این ناحیه نشده عقب می‌افتد و بنابراین فاصلهٔ بین جبهه‌های موج و در نتیجه طول‌موج کاهش می‌یابد و به این ترتیب جبهه‌های موج مطابق شکل ۴ـ۱۳ در مرز دو ناحیه تغییر جهت می‌دهند. این مطلب را می‌توان در نزدیک شدن امواج به یک ساحل شیب‌دار نیز مشاهده کرد که با رسیدن جبهه‌های موج به ساحل که در آنجا عمق آب کم می‌شود، جهت انتشار جبهه‌های موج تغییر می‌کند. شاید برای تفهیم این موضوع، مثال یک اسباب‌بازی چرخ‌دار که با عبور از کف صاف اتاق وارد قالیچه‌ای می‌شود، مناسب باشد. با ورود این اسباب‌بازی به قالیچه، تندی آن کم می‌شود و در نتیجه مسیر آن تغییر می‌کند (شکل ۴ـ۱۴).

شکل ۴ـ۱۳ الف) طرحی از شکست امواج سطحی در مرز آب عمیق و آب کم‌عمق در تنشت موج و ب) تصویری واقعی از شکست امواج سطحی در تنشت موج

۹۵

شاید محض اطلاعات عمومی خوب باشد در اینجا به شکن (kink) هم اشاره شود. وقتی ستیغ موج از آب عمیق وارد آب کم‌عمق می‌شود، سرعت آن قسمت از ستیغ که ابتدا عبور کرده است کم می‌شود و بقیهٔ ستیغ موج عقب می‌ماند و این باعث ایجاد یک شکن در ستیغ موج می‌شود.



پاسخ تمرین ۴ـ۲

لازم به توضیح است که حل این مسئله ربطی به شکست موج ندارد و اگر جبهه‌های موج به‌طور موازی به مرز می‌تابیدند نیز مسئله به همین ترتیب حل می شد. وقتی جبهه‌های موج به مرز می‌رسند، بسامد موج تغییری نمی‌کند و بنابراین

$$f = \frac{v_d}{\lambda_d} = \frac{v_s}{\lambda_s}$$

که در آن شاخص‌های پایین d و s به ترتیب مربوط به قسمت‌های عمیق (deep) و کم‌عمق (shallow) هستند. در صورت تمرین، طول‌موج فرودی که مربوط به ناحیهٔ عمیق است $\lambda_d = ۱۰\,cm$ داده شده است. همچنین تندی امواج در ناحیهٔ کم‌عمق $v_s = ۰/۴۰\,v_d$ داده شده است. بنابراین داریم :

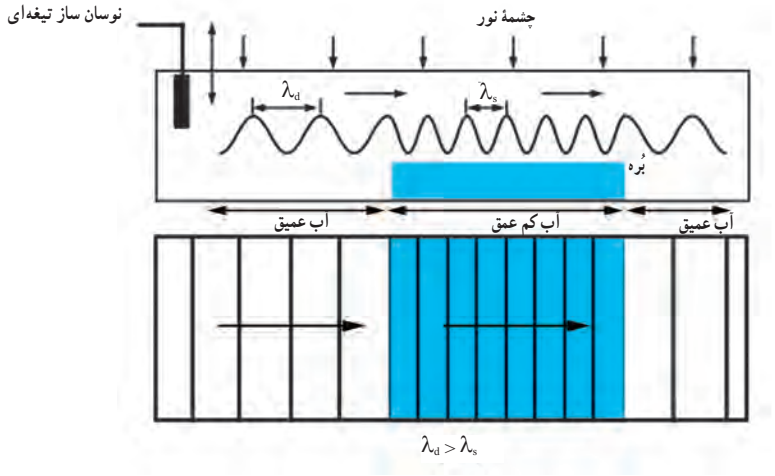
$$\frac{v_d}{۱۰\,cm} = \frac{۰/۴۰\,v_d}{\lambda_s}$$

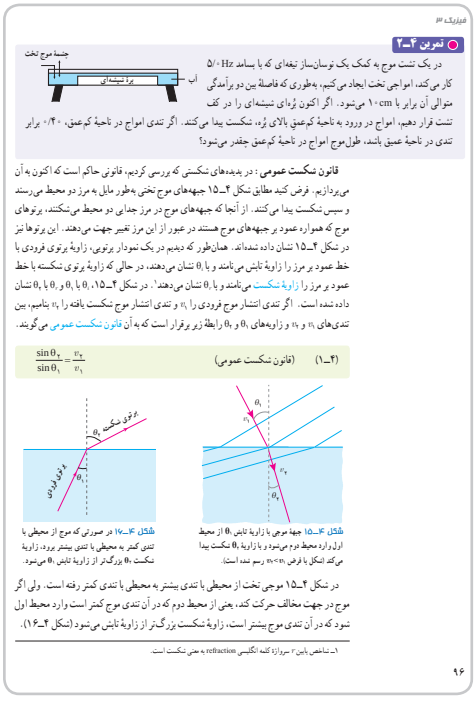
از آنجا $\lambda_s = ۴/۰\,cm$ به‌دست می‌آید که همان طور که انتظار داشتیم از λ_d کوچک‌تر است. در این تمرین برای محاسبهٔ λ_s نیازی به دانستن بسامد f نداشتیم، مگر آنکه در ادامهٔ تمرین، پرسش دیگری نیز مطرح می‌شد و مثلاً تندی موج در ناحیهٔ عمیق یا کم‌عمق پرسیده می‌شد. در آن صورت، به ترتیب برای تندی در ناحیهٔ عمیق و کم‌عمق خواهیم داشت

$$v_d = (۵/۰\ s^{-۱})\,(۱۰\,cm) = ۵۰\,cm/s$$

$$v_s = ۰/۴۰\,v_d = ۰/۴۰\,(۵۰\,cm/s) = ۲۰\,cm/s$$

این پاسخ‌ها نشان می‌دهد که بسامد داده شده برای نوسان تیغه، مقداری منطقی برای چنین آزمایش‌هایی است. شکل زیر، تحلیلی از آنچه در این آزمایش رخ می‌دهد را برای حالت ساده‌ای نشان می‌دهد که جبهه‌های موج موازی با مرز بین دو ناحیهٔ عمیق و کم‌عمق هستند و برای آنها شکستی رخ نمی‌دهد، ولی همچنان طول موج تغییر می‌کند.




فیزیک ۳

تمرین ۴ـ۲

در یک تشت موج به کمک یک نوسان‌ساز تیغه‌ای که با بسامد ۵/۰Hz کار می‌کند، امواجی تخت ایجاد می‌کنیم، به‌طوری که فاصلهٔ بین دو برآمدگی متوالی آن برابر با ۱۰cm می‌شود. اگر اکنون بُرهٔ شیشه‌ای را در کف تشت قرار دهیم، امواج در ورود به ناحیهٔ کم‌عمق بالای بُره، شکست پیدا می‌کنند. اگر تندی امواج در ناحیهٔ کم‌عمق، ۰/۴۰ برابر تندی در ناحیهٔ عمیق باشد، طول‌موج امواج در ناحیهٔ کم‌عمق چقدر می‌شود؟

قانون شکست عمومی : در پدیده‌های شکستی که بررسی کردیم، قانونی حاکم است که اکنون به آن می‌پردازیم. فرض کنید مطابق شکل ۴ـ۱۵ جبهه‌های موج تختی به‌طور مایل به مرز دو محیط می‌رسند و سپس شکست پیدا می‌کنند. از آنجا که جبهه‌های موج در مرز جدایی دو محیط می‌شکنند، پرتوهای موج که همواره عمود بر جبهه‌های موج هستند در عبور از این مرز تغییر جهت می‌دهند. این پرتوها نیز در شکل ۴ـ۱۵ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که دیدیم در یک نمودار پرتویی، زاویهٔ پرتوی فرودی با خط عمود بر مرز را زاویهٔ تابش می‌نامند و با θ_1 نشان می‌دهند، در حالی که زاویهٔ پرتوی شکسته با خط عمود بر مرز را زاویهٔ شکست می‌نامند و با θ_2 نشان می‌دهند[۱]. در شکل ۴ـ۱۵، θ_1 یا θ_1 و θ_2 یا θ_2 نشان داده شده است. اگر تندی انتشار موج فرودی را v_1 و تندی انتشار موج شکست یافته را v_2 بنامیم، بین تندی‌های v_1 و v_2 و زاویه‌های θ_1 و θ_2 رابطهٔ زیر برقرار است که به آن قانون شکست عمومی می‌گویند.

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{v_2}{v_1} \qquad (قانون شکست عمومی) \quad (۴ـ۱)$$

شکل ۴ـ۱۶ در صورتی که موج از محیطی با تندی کمتر به محیطی با تندی بیشتر برود، زاویهٔ شکست θ_2 بزرگ‌تر از زاویهٔ تابش θ_1 می‌شود.

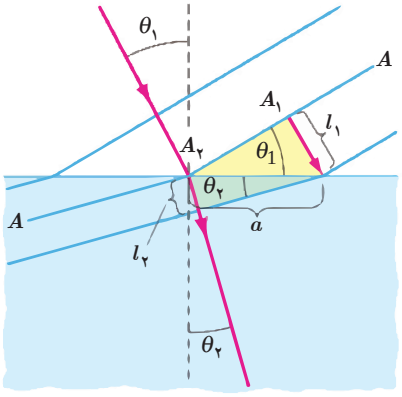
شکل ۴ـ۱۵ جبهه موجی با زاویهٔ تابش θ_1 از محیط اول وارد محیط دوم می‌شود و با زاویهٔ θ_2 شکست پیدا می‌کند (شکل با فرض $v_2 < v_1$ رسم شده است).

در شکل ۴ـ۱۵ موجی تخت از محیطی با تندی بیشتر به محیطی با تندی کمتر رفته است. ولی اگر موج در جهت مخالف حرکت کند، یعنی از محیط دوم که در آن تندی موج کمتر است وارد محیط اول شود که در آن تندی موج بیشتر است، زاویهٔ شکست بزرگ‌تر از زاویهٔ تابش می‌شود (شکل ۴ـ۱۶).

۱ـ شاخص پایین ۲ سر واژهٔ کلمه انگلیسی refraction به معنی شکست است.

۹۶

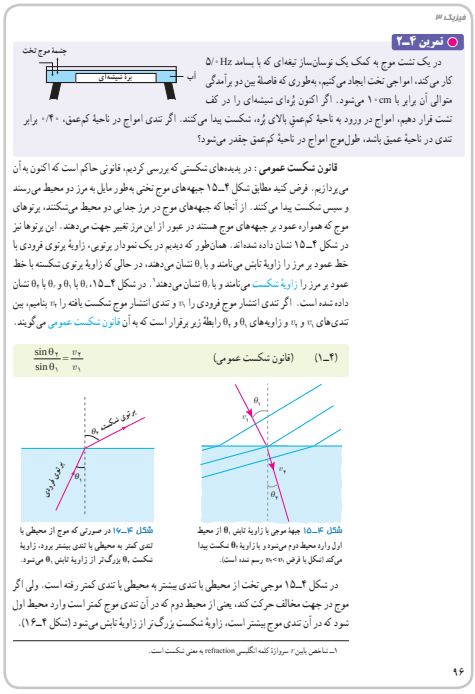
اثبات رابطهٔ ۴ــ۱ بسیار ساده است و دانش‌آموزان می‌توانند با دانشی که از درس هندسهٔ خود آموخته‌اند به آسانی آن را درک کنند. خوب است برای دانش‌آموزان علاقه‌مند به عنوان یک دانستنی این اثبات مطرح شود. دانش‌آموزان از درس هندسهٔ خود آموخته‌اند که اگر دو ضلع یک زاویهٔ حاده (بسته) بر دو ضلع زاویهٔ حاده‌ای دیگر عمود باشد، آن دو زاویه با هم برابرند. بنابراین زاویه‌های حاده نشان داده شده در مثلث‌های قائم‌الزاویه زرد و سبز به ترتیب با θ_1 و θ_2 برابرند. اکنون با استفاده از تعریف نسبت مثلثاتی سینوس یک زاویه، به ترتیب برای مثلث‌های قائم‌الزاویه زرد و سبز داریم :



شکل ۴ــ۲۵ جبهه موجی با زاویهٔ تابش θ_1 از محیط اول وارد محیط دوم می‌شود و با زاویهٔ θ_2 شکست پیدا می‌کند.

$$\sin\theta_1 = \frac{L_1}{a} = \frac{v_1 t}{a} \quad , \quad \sin\theta_2 = \frac{L_2}{a} = \frac{v_2 t}{a}$$

از تقسیم این دو رابطه بر هم قانون شکست عمومی به‌دست می‌آید.



فیزیک ۳

تمرین ۴ــ۲

در یک تشت موج به کمک یک نوسان‌ساز تیغه‌ای که با بسامد ۵/۰Hz کار می‌کند، امواجی تخت ایجاد می‌کنیم، به‌طوری که فاصلهٔ بین دو برآمدگی متوالی آن برابر با ۱۰cm می‌شود. اگر اکنون پُرهای شیشه‌ای را در کف تشت قرار دهیم، امواج در ورود به ناحیهٔ کم‌عمق بالای پُره، شکست پیدا می‌کنند. اگر تندی امواج در ناحیهٔ کم‌عمق، ۰/۴۰ برابر تندی در ناحیهٔ عمیق باشد، طول‌موج امواج در ناحیهٔ کم‌عمق چقدر می‌شود؟

چشمهٔ موج تخت — آب — پرهٔ شیشه‌ای

قانون شکست عمومی : در بدیده‌های شکستی که بررسی کردیم، قانونی حاکم است که اکنون به آن می‌پردازیم. فرض کنید مطابق شکل ۴ــ۱۵ جبهه‌های موج تختی به‌طور مایل به مرز دو محیط می‌رسند و سپس شکست پیدا می‌کنند. از آنجا که جبهه‌های موج در مرز جدایی دو محیط می‌شکنند، پرتوهای موج که همواره عمود بر جبهه‌های موج هستند در عبور از این مرز تغییر جهت می‌دهند. این پرتوها نیز در شکل ۴ــ۱۵ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که دیدیم در یک نمودار پرتویی، زاویهٔ پرتوی فرودی با خط عمود بر مرز را زاویهٔ تابش می‌نامند و با θ_1 نشان می‌دهند، در حالی که زاویهٔ پرتوی شکسته با خط عمود بر مرز را زاویهٔ شکست می‌نامند و با θ_2 نشان می‌دهند[۱]. در شکل ۴ــ۱۵، θ_1 با θ_1 و θ_2 با θ_2 نشان داده شده است. اگر تندی انتشار موج فرودی را v_1 و تندی انتشار موج شکست یافته را v_2 بنامیم، بین تندی‌های v_1 و v_2 و زاویه‌های θ_1 و θ_2 رابطهٔ زیر برقرار است که به آن قانون شکست عمومی می‌گویند.

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{v_2}{v_1} \qquad \text{(قانون شکست عمومی)} \quad (۴ــ۱)$$

پرتوی شکسته — پرتوی فرودی

شکل ۴ــ۱۵ جبهه موجی با زاویهٔ تابش θ_1 از محیط اول وارد محیط دوم می‌شود و با زاویهٔ θ_2 شکست پیدا می‌کند (شکل با فرض $v_1 < v_2$ رسم شده است).

شکل ۴ــ۱۶ در صورتی که موج از محیطی با تندی کمتر به محیطی با تندی بیشتر برود، زاویهٔ شکست θ_2 بزرگ‌تر از زاویهٔ تابش θ_1 می‌شود.

در شکل ۴ــ۱۵ موجی تخت از محیطی با تندی بیشتر به محیطی با تندی کمتر رفته است. ولی اگر موج در جهت مخالف حرکت کند، یعنی از محیط دوم که در آن تندی موج کمتر است وارد محیط اول شود که در آن تندی موج بیشتر است، زاویهٔ شکست بزرگ‌تر از زاویهٔ تابش می‌شود (شکل ۴ــ۱۶).

۱ــ شاخص بالای r سرواژهٔ کلمه انگلیسی refraction به معنی شکست است.

۹۶

پاسخ تمرین ۴ـ۳

در اینجا فرض شده است رابطهٔ $v_s = ۰/۴۰\, v_d$ همچنان برقرار است. بنابراین با استفاده از قانون شکست عمومی داریم :

$$\frac{\sin\theta_r}{\sin\theta_i} = \frac{v_s}{v_d} = \frac{۰/۴۰\, v_d}{v_d} = ۰/۴۰$$

که در آن $\sin\theta_i = ۳۰^\circ$ است. بنابراین داریم :

$$\sin\theta_r = (۰/۴۰)(\sin ۳۰^\circ) = ۰/۲۰$$

و در نتیجه $\theta_r = ۱۱/۵۳^\circ \approx ۱۲^\circ$ می‌شود.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

تمرین ۴ـ۳

در تمرین ۴ـ۳ با فرض اینکه زاویهٔ تابش امواج برابر ۳۰° باشد، زاویهٔ شکست چقدر می‌شود؟

شکست امواج الکترومغناطیسی : امواج الکترومغناطیسی (و از جمله نور مرئی) نیز با گذر از یک محیط به محیطی دیگر که در آن تندی آنها متفاوت می‌شود، شکست پیدا می‌کنند. به جز گسترهٔ نور مرئی که بیشترین و معروف‌ترین موارد شکست برای آنها مطرح می‌شود و به پیامدها و کاربردهای جالبی می‌انجامد، شکست امواج رادیویی نیز اهمیتی کاربردی در ارتباطات رادیویی دارد.

کاربرد شکست امواج رادیویی

موج‌های ارسال شده از یک ایستگاه فرستندهٔ رادیویی دوردست را به همان وضوحی می‌شنویم که در محدودهٔ آن ایستگاه شنیده می‌شود. روش کار به این ترتیب است که یک موج پر قدرت رادیویی، با بسامد بین ۳ تا ۳۰ مگاهرتز، به لایهٔ یون‌سپهر (یونسفر) بالای جو که در ارتفاع ۸۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتری سطح زمین واقع است فرستاده می‌شود. این لایه به علت وجود یون‌ها و الکترون‌های آزاد، پلاسمایی را ایجاد می‌کند که ویژگی‌های فیزیکی اش آن را از بقیهٔ جو متمایز می‌سازد. یون‌سپهر در حالی که نور مرئی و تابش فرابنفش را عبور می‌دهد، امواج رادیویی با طول‌موج‌های بلند (با دی بزرگ‌تر از حدود ۱۰m) را که در جهت‌های مناسبی به سوی این لایه ارسال شده باشند، به طرف زمین برمی‌گرداند. دلیل این اتفاق، یکی‌خاصت بودن چگالی الکترون‌های آزاد در این لایه و در نتیجه، تفاوت تندی امواج رادیویی در قسمت‌های مختلف آن است، به‌طوری که در سازوکاری مانند پدیدهٔ سراب که بعداً خواهیم آموخت، امواج را به سمت پایین بازمی‌گردانند.

پرسش ۴ـ۳

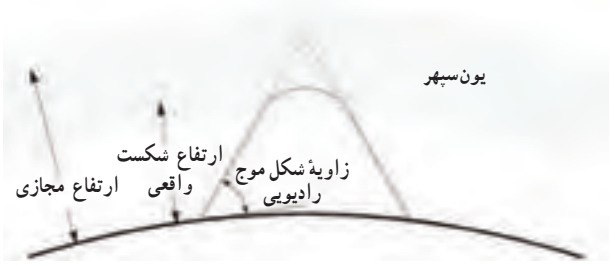
شکل روبه‌رو یک پرتوی موج الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد که با عبور از محیط اولیهٔ a، از طریق محیط‌های b و c به محیط a بازمی‌گردد. این محیط‌ها را بر حسب تندی موج در آنها از بیشترین تا کمترین مرتب کنید.

وقتی یک پرتوی نور از محیطی شفاف وارد محیط شفاف دیگری شود، بخشی از نور بازمی‌تابد و بخشی دیگر وارد محیط دوم می‌شود. همان‌طور که انتظار داریم آن بخش نور که وارد محیط دوم می‌شود، به دلیل آنکه تندی آن در محیط دوم تغییر می‌کند، شکسته می‌شود (شکل ۴ـ۱۷). به همین دلیل برای هر محیط ضریب شکست تعریف می‌کنند که برابر با نسبت تندی نور در خلأ به تندی نور در آن محیط است :

$$n = \frac{\text{تندی نور در خلأ}}{\text{تندی نور در یک محیط}} = \frac{c}{v} \qquad \text{(تعریف ضریب شکست)} \qquad (۴ـ۲)$$

شکل ۴ـ۱۷ در عبور یک پرتوی نور از محیطی شفاف به محیط شفافی دیگر، بخشی از نور بازمی‌تابد و بخشی می‌شکند.

۹۷



در اینجا خوب است با نشان دادن تصاویری مانند شکل زیر تأکید کنید که آنچه در یون‌سپهر رخ می‌دهد یک بازتاب «تیز» نیست و توضیح این بازتاب مانند چیزی است که در پدیدهٔ سراب خواهید دید.

پاسخ پرسش ۴ـ۲

باید بر خطّ جدایی محیط‌ها، خطوط عمود بر سطح را رسم کنیم و بعد به تحلیل این پرسش بپردازیم. اگر توجه کنید درمی‌یابید در محیط b پرتو از خطّ عمود دور می‌شود. این یعنی اینکه پرتو از محیطی که در آن تندی نور کمتر است وارد محیطی شده است که در آن تندی نور بیشتر است. ولی پس از آن، در محیط c، پرتو به خطّ عمود نزدیک می‌شود. بنابراین تندی نور در محیط c کمتر از تندی نور در محیط b است. و به همین ترتیب، تندی نور در محیط a کمتر از تندی نور در محیط c است : $v_b > v_c > v_a$. به عبارتی، همان‌طور که بعداً خواهیم دید پرتو از محیطی با ضریب شکست بالا (محیط a) وارد محیطی با ضریب شکست کمتر (محیط b) و سپس وارد محیطی با ضریب شکست بیشتر از b (محیط c) و سرانجام وارد محیطی با ضریب شکست بیشتر از آن (که دوباره همان a است) می‌شود. پس ترتیب ضریب شکست‌های محیط از کمترین به بیشترین، به ترتیب n_b ، n_c و n_a است. کمترین ضریب شکست مربوط به محیط b و بیشترین ضریب شکست مربوط به محیط a است.

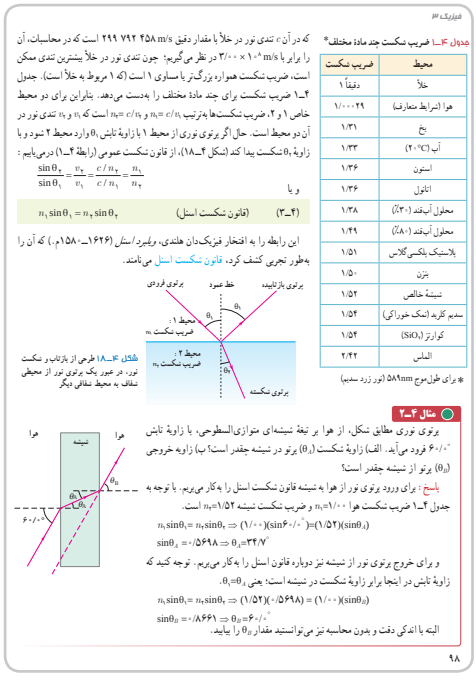
در این فیلم، نمایشی از شکست نور در آب را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم تأثیر تفاوت ضریب شکست را در تصویر ایجاد شده می‌بینید.

فیلم

توجه کنید ضریب شکست به طول موج بستگی دارد و در این کتاب ضریب‌های شکست برای طول موج نور زرد سدیم (589 nm) تعریف شده است.



فیزیک ۳

جدول ۴ـ۱ ضریب شکست چند مادهٔ مختلف*

محیط	ضریب شکست
خلأ	دقیقاً ۱
هوا (شرایط متعارف)	۱/۰۰۰۲۹
یخ	۱/۳۱
آب (۲۰°C)	۱/۳۳
استون	۱/۳۶
اتانول	۱/۳۶
محلول آب‌قند (۳۰٪)	۱/۳۸
محلول آب‌قند (۸۰٪)	۱/۴۹
پلاستیک یا شیشه	۱/۵۱
بنزن	۱/۵۰
شیشهٔ خالص	۱/۵۲
سدیم کلرید (نمک خوراکی)	۱/۵۴
کوارتز (SiO_2)	۱/۵۴
الماس	۲/۴۲

* برای طول موج ۵۸۹nm (نور زرد سدیم)

که در آن c تندی نور در خلأ با مقدار دقیق ۲۹۹ ۷۹۲ ۴۵۸ m/s است که در محاسبات، آن را برابر با $3/00 \times 10^8$ m/s در نظر می‌گیریم. چون تندی نور در خلأ بیشترین تندی ممکن است، ضریب شکست همواره بزرگ‌تر یا مساوی ۱ است (که ۱ مربوط به خلأ است). جدول ۴ـ۱ ضریب شکست برای چند مادهٔ مختلف را به‌دست می‌دهد. بنابراین برای دو محیط خاص ۱ و ۲، ضریب شکست‌ها به‌ترتیب $n_1 = c/v_1$ و $n_2 = c/v_2$ است که v_1 و v_2 تندی نور در آن دو محیط است. حال اگر پرتوی نوری از محیط ۱ با زاویهٔ تابش θ_1 وارد محیط ۲ شود و با زاویهٔ θ_2 شکست پیدا کند (شکل ۴ـ۱۸)، از قانون شکست عمومی (رابطهٔ ۴ـ۱) درمی‌یابیم :

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{c/n_2}{c/n_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

و یا

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad \text{(قانون شکست اسنل)} \qquad (۴ـ۳)$$

این رابطه را به افتخار فیزیک‌دان هلندی، ویلبرد اسنل (۱۶۲۶ـ۱۵۸۰ م.) که آن را به‌طور تجربی کشف کرد، قانون شکست اسنل می‌نامند.

شکل ۴ـ۱۸ طرحی از بازتاب و شکست نور. در عبور یک پرتوی نور از محیطی شفاف به محیط شفافی دیگر

مثال ۴ـ۲

پرتوی نوری مطابق شکل، از هوا بر تیغهٔ شیشه‌ای متوازی‌السطوحی، با زاویهٔ تابش $60/0^\circ$ فرود می‌آید. الف) زاویهٔ شکست (θ_1) پرتو در شیشه چقدر است؟ ب) زاویه خروجی (θ_3) پرتو از شیشه چقدر است؟

پاسخ : برای ورود پرتوی نور از هوا به شیشه قانون شکست اسنل را به‌کار می‌بریم. با توجه به جدول ۴ـ۱ ضریب شکست هوا $n_1 = 1/00$ و ضریب شکست شیشه $n_2 = 1/52$ است.

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \Rightarrow (1/00)(\sin 60/0^\circ) = (1/52)(\sin\theta_2)$$

$$\sin\theta_2 = 0/569 \Rightarrow \theta_2 = 34/7^\circ$$

و برای خروج پرتوی نور از شیشه نیز دوباره قانون اسنل را به‌کار می‌بریم. توجه کنید که زاویهٔ تابش در اینجا برابر زاویهٔ شکست در شیشه است؛ یعنی $\theta_1 = \theta_2$.

$$n_2 \sin\theta_2 = n_3 \sin\theta_3 \Rightarrow (1/52)(0/569) = (1/00)(\sin\theta_3)$$

$$\sin\theta_3 = 0/866 \Rightarrow \theta_3 = 60/0^\circ$$

البته با اندکی دقت و بدون محاسبه نیز می‌توانستید مقدار θ_3 را بیابید.

۹۸

در این فیلم تحلیلی از قانون اسنل را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم تأثیر تفاوت ضریب شکست را در تصویر ایجاد شده می‌بینید.

فیلم

پاسخ پرسش ۴ـ۳

در هر سه شکل باید خطّ عمود بر سطح جدایی را رسم و با بررسی چگونگی انحراف پرتوی شکسته، آن را تحلیل کرد. در شکل (الف) پرتوی نور از محیطی با ضریب شکست کمتر وارد محیطی با ضریب شکست بیشتر شده است. وقتی پرتو از محیط با ضریب شکست کمتر وارد محیطی با ضریب شکست بیشتر می‌شود، پرتو باید به خط عمود نزدیک‌تر شود که این در شکل (الف) برقرار است و بنابراین شکل (الف) از لحاظ فیزیکی ممکن است. اما شکل‌های (ب) و (پ) از لحاظ فیزیکی ناممکن هستند. زیرا در شکل (ب) اصلاً پرتوی شکسته در سویی نادرست رسم شده است و در شکل (پ) پرتو از خط عمود دور شده است که همان‌طور که

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

پرسش ۴ـ۳

کدام‌یک از سه شکل زیر یک شکست را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟

فعالیت ۴ـ۲

اندازه‌گیری ضریب شکست : با توجه به مثال ۴ـ۲، آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان ضریب شکست یک تیغهٔ متوازی‌السطوح شفاف را اندازه گرفت.

شکل ۴ـ۱۹ تصویر یک خودرو در سراب بر سطح گرم جاده

سراب : در روزهای گرم ممکن است رکهٔ آبی را در دوردست ببینید که بر سطح زمین قرار دارد، اما وقتی به آن محل می‌رسید، آنجا را خشک می‌یابید. به این پدیده سراب[1] یا سراب آبگیر می‌گویند و نه‌تنها می‌توان آن را دید، بلکه می‌توان از آن عکس هم گرفت (شکل ۴ـ۱۹).

در روزهای گرم هوای سطح زمین نسبتاً داغ است. از طرفی، جگالی هوا با افزایش دما کاهش می‌یابد که این سبب کاهش ضریب شکست نیز می‌شود (شکل ۴ـ۲۰). در شکل ۴ـ۲۱ پدیدهٔ سراب را مبتنی بر جبهه‌های موج نشان داده‌ایم. برای توضیح این شکل، نخست جبهه‌های موجی را در نظر می‌گیریم که به طرف پایین می‌آیند. با پایین آمدن هر جبه بیشتر پرتوهای نظیر این جبهه‌های موج، آنها را ضریب شکست‌های کوچک‌تر و کوچک‌تری روبه‌رو می‌شوند و در هر مرحله با دور شدن از خط عمود، بیشتر و بیشتر به سمت افق خم می‌شوند (شکل ۴ـ۲۲ الف).

شکل ۴ـ۲۰ نمودار تغییرات ضریب شکست هوا با دما

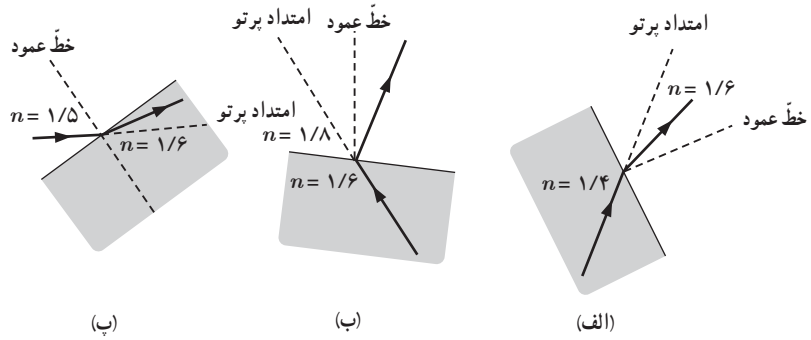
وقتی پرتوها در تردیکی سطح زمین تقریباً افقی می‌شوند به سمت بالا خم برمی‌دارند. این خم شدن رو به بالا را می‌توان با استفاده از جبهه‌های موج توضیح داد. بخش پایینی هر جبهه موج در هوای کمی گرم‌تر قرار دارد و بنابراین کمی تندتر از بخش بالایی جبهه موج حرکت می‌کند و این تفاوت رفتار در قسمت جبهه‌های موج، موجب خم شدن رو به بالای پرتوهای موج می‌شود، زیرا پرتوهای موج باید همواره عمود بر جبهه‌های موج باشند (شکل ۴ـ۲۲ ب). وقتی پرتوها رو به بالا می‌روند به خم‌شدن رو به بالای خود ادامه می‌دهند، زیرا اکنون مدام با محیط‌هایی با ضریب شکست‌های بزرگ و بزرگ‌تر مواجه می‌شوند و بنابراین در هر مرحله با تردیک شدن به خط عمود، بیشتر و بیشتر رو به بالا خم می‌شوند (شکل ۴ـ۲۲ ب) اگر بخشی از این نور به چشم ما برسد، به نظر می‌آید که منشأ آن نور از امتداد رو به عقب پرتوهایی است که به چشم ما رسیده‌اند و همان‌طور که در شکل ۴ـ۲۱ نشان داده شده است این حس را ایجاد می‌کند که گویی از سطح زمین آمده است.

شکل ۴ـ۲۱ مدل‌سازی پدیدهٔ سراب به کمک جبهه‌های موج. تاظری که پرتوهای نور در پدیدهٔ سراب به چشمش می‌رسد، گمان می‌برد که این پرتوها از یک تصویر آمده‌اند.

۱ـ Oasis mirage

۹۹

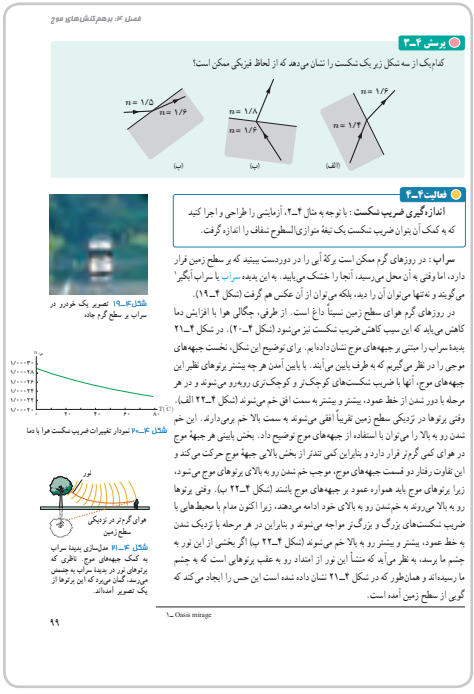
گفتیم در عبور پرتو از محیطی با ضریب شکست کمتر به محیطی با ضریب شکست بیشتر، پرتو باید به خط عمود نزدیک‌تر شود.



(پ) (ب) (الف)

پاسخ فعالیت ۴ـ۴

یک تیغهٔ متوازی‌السطوح را درنظر بگیرید و آن را روی کاغذ سفیدی قرار دهید. باریکهٔ نوری را به وجهی از تیغه بتابانید به‌طوری که از وجه مقابل آن خارج شود. محل تیغه بر کاغذ را با رسم اضلاع آن برروی کاغذ مشخص کنید. همچنین مسیر باریکهٔ فرودی و باریکهٔ خروجی از تیغه را روی کاغذ رسم کنید. برای رسم دقیق‌تر مسیر باریکه‌های فرودی و خروجی می‌توانید مطابق شکل الف کاغذ سفید را روی قطعه یونولیتی قرار دهید و مسیر باریکه‌ها را با فروبردن سوزن‌هایی در آن مشخص کنید. اکنون تیغه را بردارید و با استفاده از یک خط‌کش، مسیر باریکهٔ نور در درون تیغه را رسم کنید. بر روی مسیر باریکه‌های نور، پیکانه‌هایی رسم کنید تا جهت پرتوها مشخص شود. با استفاده از یک نقاله، خطوط عمود بر وجه‌های تیغه در محل ورود و خروج باریکه‌های نور را رسم کنید و زاویه‌های بین باریکه‌ها و خطوط عمود را اندازه بگیرید. شکل ب، طرحی از چنین ترسیمی را نشان می‌دهد. اکنون می‌توانیم با استفاده از قانون اسنل برای ورود باریکه از هوا به تیغه، ضریب شکست تیغه را به‌دست آوریم و یا اینکه ضریب شکست را با استفاده از قانون اسنل برای خروج باریکه از تیغه به هوا بیابیم. بدیهی است که این دو مقدار نباید تفاوت چندانی داشته باشند. درهر صورت آزمایش را به یکی از دو طریق بالا، برای گستره‌ای از زاویه‌های فرودی انجام دهید و مقدار ضریب شکست را با میانگین از عددهای حاصل گزارش کنید.



فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

پرسش ۴ـ۳

کدام‌یک از سه شکل زیر یک شکست را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟

$n = ۱/۵$ $n = ۱/۶$ (پ) $n = ۱/۸$ $n = ۱/۶$ (ب) $n = ۱/۶$ $n = ۱/۴$ (الف)

فعالیت ۴ـ۴

اندازه‌گیری ضریب شکست: با توجه به مثال ۴ـ۲، آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان ضریب شکست یک تیغهٔ متوازی‌السطوح شفاف را اندازه گرفت.

سراب: در روزهای گرم ممکن است برکهٔ آبی را در دوردست ببینید که بر سطح زمین قرار دارد، اما وقتی به آن محل می‌رسید، آنجا را خشک می‌یابید. به این پدیده سراب یا سراب آبگیر[1] می‌گویند و به تنها می‌توان آن را دید، بلکه می‌توان از آن عکس هم گرفت (شکل ۴ـ۱۹).

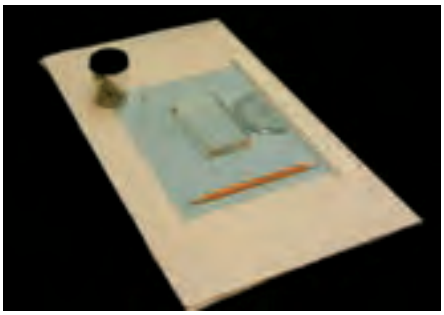
در روزهای گرم هوای سطح زمین نسبتاً داغ است. از طرفی، جگالی هوا با افزایش دما کاهش می‌یابد که این سبب کاهش ضریب شکست نیز می‌شود (شکل ۴ـ۲۰). در شکل ۴ـ۲۱ پدیدهٔ سراب را مبتنی بر جبهه‌های موج نشان داده‌ایم. برای توضیح این شکل، نخست جبهه‌های موجی را در نظر می‌گیریم که به طرف پایین می‌آیند. با پایین آمدن هر جبه بیشتر پرتوهای نظیر این جبهه‌های موج، آنها با ضریب شکست‌های کوچک‌تر و کوچک‌تری روبه‌رو می‌شوند و در هر مرحله با دور شدن از خط عمود، بیشتر و بیشتر به سمت افق خم می‌شوند (شکل ۴ـ۲۲ الف). وقتی پرتوها در نزدیکی سطح زمین تقریباً افقی می‌شوند به سمت بالا خم برمی‌دارند. این خم شدن رو به بالا را می‌توان با استفاده از جبهه‌های موج توضیح داد. بخش پایینی هر جبهٔ موج در هوای کمی گرم‌تر قرار دارد و بنابراین کمی تندتر از بخش بالایی جبههٔ موج حرکت می‌کند و این تفاوت رفتار در قسمت جبهه‌های موج، موجب خم شدن رو به بالای پرتوهای موج می‌شود، زیرا پرتوهای موج باید همواره عمود بر جبهه‌های موج باشند (شکل ۴ـ۲۲ ب). وقتی پرتوها رو به بالا می‌روند به خم‌شدن رو به بالای خود ادامه می‌دهند، زیرا اکنون مدام با محیط‌هایی با ضریب شکست‌های بزرگ و بزرگ‌تر مواجه می‌شوند و بنابراین در هر مرحله با نزدیک شدن به خط عمود، بیشتر و بیشتر رو به بالا خم می‌شوند (شکل ۴ـ۲۲ ب) اگر بخشی از این نور به چشم ما برسد، به نظر می‌آید که منشأ آن نور از امتداد رو به عقب پرتوهای است که به چشم ما رسیده‌اند و همان‌طور که در شکل ۴ـ۲۱ نشان داده شده است این حس را ایجاد می‌کند که گویی از سطح زمین آمده است.

۱ـ Oasis mirage

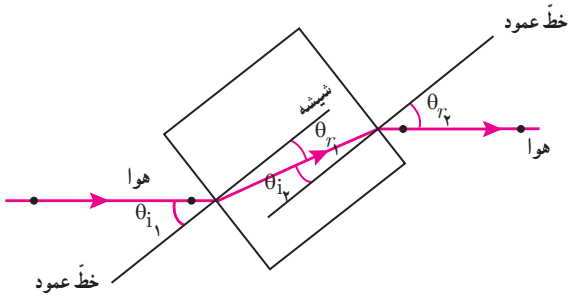
شکل ۴ـ۱۹ تصویر یک خودرو در سراب بر سطح گرم جاده

شکل ۴ـ۲۰ نمودار تغییرات ضریب شکست هوا با دما

شکل ۴ـ۲۱ مدل‌سازی پدیدهٔ سراب به کمک جبهه‌های موج. ناظری که پرتوهای نور در پدیدهٔ سراب به چشمش می‌رسد، گمان می‌برد که این پرتوها از یک تصویر آمده‌اند.

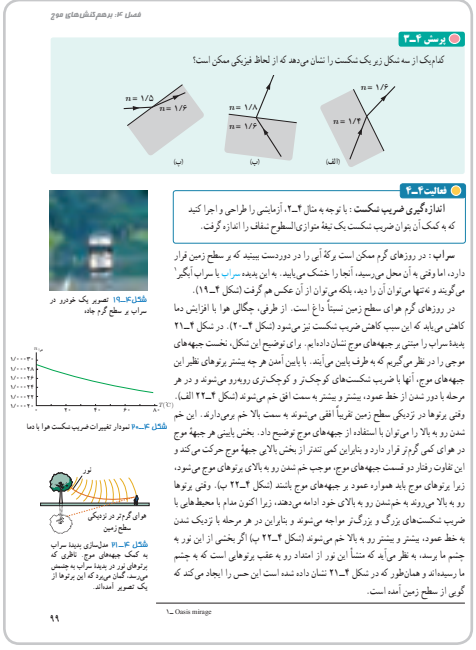


الف) تصویری از اسباب آزمایش اندازه‌گیری ضریب شکست



ب) در نمودار پرتویی آزمایش توجه کنید θ_i زاویه تابش و θ_r زاویهٔ شکست و $\theta_{i_1} = \theta_{r_2}$ و $\theta_{i_2} = \theta_{r_1}$ است. بنابراین پرتوهای فرودی و خروجی باهم موازی‌اند

یکی از خطاهای بسیار رایج این است که پدیدهٔ سراب را مبتنی بر پدیدهٔ بازتاب داخلی کلی توضیح می‌دهند. تأکید شود که این یک خطای رایج است و اگر قانون اسنل را برای حضیض خمیدگی بنویسید به‌سادگی نادرستی این استدلال را درمی‌یابید، ضمن اینکه از لحاظ تجربی هم ثابت شده است که نور بازتابیده قطبیده (polarized) است، در حالی که برای سراب چنین نیست. همچنین در اینجا خوب است دانش‌آموزان را به پدیدهٔ سراب صوتی نیز ارجاع دهید و نیز اکنون دانش‌آموزان «خوب است بدانید» مربوط به ارسال امواج رادیویی را می‌توانند درک کنند.



فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

پرسش ۴ـ۳

کدام‌یک از سه شکل زیر یک شکست را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟

فعالیت ۴ـ۴

اندازه‌گیری ضریب شکست: با توجه به مثال ۴ـ۲، آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان ضریب شکست یک تیغهٔ موازی‌السطوح شفاف را اندازه گرفت.

شکل ۴ـ۱۹ تصویر یک خودرو در سراب بر سطح گرم جاده.

سراب: در روزهای گرم ممکن است برکهٔ آبی را در دوردست ببینید که بر سطح زمین قرار دارد، اما وقتی به آن محل می‌رسید، آنجا را خشک می‌یابید. به این پدیده سراب یا سراب آبگیر[1] می‌گویند و به‌تنها می‌توان آن را دید، بلکه می‌توان از آن عکس هم گرفت (شکل ۴ـ۱۹).

در روزهای گرم هوای سطح زمین نسبتاً داغ است. از طرفی، جگالی هوا با افزایش دما کاهش می‌یابد که این سبب کاهش ضریب شکست نیز می‌شود (شکل ۴ـ۲۰). در شکل ۴ـ۲۱ پدیدهٔ سراب را مبتنی بر جبهه‌های موج نشان داده‌ایم. برای توضیح این شکل، نخست جبهه‌های موجی را در نظر می‌گیریم که به طرف پایین می‌آیند. با پایین آمدن هر جه بیشتر پرتوهای نظیر این جبهه‌های موج، آنها با ضریب شکست‌های کوچک‌تر و کوچک‌تری روبه‌رو می‌شوند و در هر مرحله با دور شدن از خط عمود، بیشتر و بیشتر به سمت افق خم می‌شوند (شکل ۴ـ۲۲ الف).

شکل ۴ـ۲۰ نمودار تغییرات ضریب شکست هوا با دما

وقتی پرتوها در نزدیکی سطح زمین تقریباً افقی می‌شوند به سمت بالا خم برمی‌دارند. این خم شدن رو به بالا را می‌توان با استفاده از جبهه‌های موج توضیح داد. بخش پایینی هر جبهٔ موج در هوای کمی گرم‌تر قرار دارد و بنابراین کمی تندتر از بخش بالایی جبههٔ موج حرکت می‌کند و این تفاوت رفتار دو قسمت جبهه‌های موج، موجب خم شدن رو به بالای پرتوهای موج می‌شود، زیرا پرتوهای موج باید همواره عمود بر جبهه‌های موج باشند (شکل ۴ـ۲۲ ب). وقتی پرتوها رو به بالا می‌روند به خم‌شدن رو به بالای خود ادامه می‌دهند، زیرا اکنون دمام با محیط‌هایی با ضریب شکست‌های بزرگ و بزرگ‌تر مواجه می‌شوند و بنابراین در هر مرحله با نزدیک شدن به خط عمود، بیشتر و بیشتر رو به بالا خم می‌شوند (شکل ۴ـ۲۲ ب) اگر بخشی از این نور به چشم ما برسد، به نظر می‌آید که منشأ این نور از امتداد رو به عقب پرتوهایی است که به چشم ما رسیده‌اند و همان‌طور که در شکل ۴ـ۲۱ نشان داده شده است این حس را ایجاد می‌کند که گویی از سطح زمین آمده است.

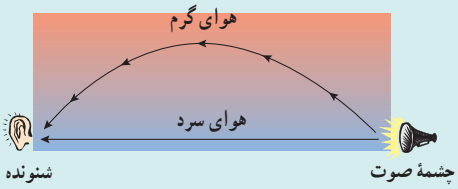
شکل ۴ـ۲۱ مدل‌سازی پدیدهٔ سراب به کمک جبهه‌های موج. تلاقی که پرتوهای نور در پدیدهٔ سراب به چشمتان می‌رسند، گمان می‌برد که این پرتوها از یک تصویر آمده‌اند.

۱ـ Oasis mirage

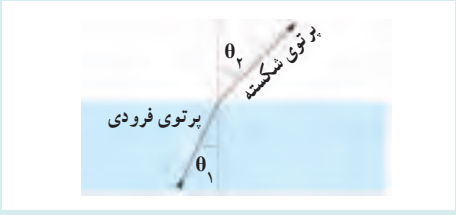
۹۹

شکست امواج صوتی

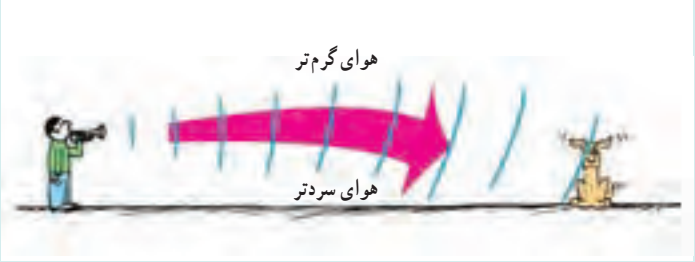
شکست برای امواج صوتی نیز می‌تواند رخ دهد ولی اهمیت آن به اندازهٔ پدیده‌هایی نیست که بر اثر شکست نور رخ می‌دهد. با این حال شکست صوت نیز به پدیده‌های جالبی می‌انجامد. مثلاً وقتی هوای بالای زمین گرم‌تر از هوای سطح زمین باشد، امواج صوتی پس از گسیل از سطح زمین بر اثر پدیدهٔ شکست، به پایین بازمی‌گردند و صوتی اضافی را افزون بر صوتی که مسیر مستقیم را می‌پیماید به گوش شنونده می‌رسانند و بدین ترتیب عملاً سبب تقویت صدایی می‌شوند که به شنونده می‌رسد (شکل ۱). این تقویت‌کننده‌های طبیعیِ صوت معمولاً در صبح‌های خیلی زود، پیش از طلوع آفتاب بر فراز دریاچه‌های سرد و یا هر گاه وارونگی هوا رخ دهد، بروز پیدا می‌کنند. یک توضیح این پدیده با استفاده از رابطهٔ ۴ــ۱ است که برای شکست امواج به دست آوردیم. اگر در شکل ۴ــ۱۶ کتاب، موج در جهت مخالف حرکت کند، یعنی از محیطی که در آن تندی موج کمتر است، وارد محیطی شود که در آن تندی موج بیشتر است، زاویهٔ شکست بزرگ‌تر از زاویهٔ تابش می‌شود (شکل ۲). در فصل پیش آموختیم که تندی صوت با دما رابطه دارد (این رابطه متناسب با جذر دما است) و بنابراین تندی صوت در هوای گرم‌تر بیشتر از تندی صوت در هوای سرد است. بنابراین وقتی صوت رو به بالا می‌رود، چون از هوای سردتر به هوای گرم‌تر رفته است، تندی آن افزایش می‌یابد و بدین ترتیب زاویهٔ پرتویِ صوت با خطّ عمود، با افزایش ارتفاع، بیشتر و بیشتر می‌شود. وقتی صوت روبه پایین می‌آید، چون از هوای گرم‌تر به هوای سردتر رفته است، تندی آن کاهش می‌یابد و بدین ترتیب زاویهٔ پرتوی صوت با خطّ عمود، با کاهش ارتفاع، کمتر و کمتر می‌شود. بنابراین صوت گسیل‌شده از چشمهٔ صوت، افزون بر مسیر مستقیم، از مسیر خمیده نیز به شنونده می‌رسد. البته روش پرتویی به‌سادگی نمی‌تواند دلیل خم شدن مسیر پرتو از نقطهٔ بالای مسیر به سمت شنونده را توضیح دهد. در اینجا برای توجیه خم شدن پرتوی صوت، ساده‌تر آن است که از روش جبهه‌های موج استفاده کنیم. شکل ۳ رفتار جبهه‌های موج صوتی را در حالتی که برخلاف معمول، هوای نزدیک سطح زمین سردتر از هوای بالای آن است نشان می‌دهد. توجه کنید که تمام نقاط یک جبههٔ موج دمای یکسانی ندارند و بخش بالایی آنها در هوای گرم‌تر و بخش پایینی آنها در هوای سردتر قرار دارد. بنابراین بخش‌های بالایی که در هوای گرم‌تر قرار دارند کمی تندتر از بخش‌های پایینی حرکت می‌کنند. این تفاوت رفتار دو قسمت جبهه‌های موج که بخشی تندتر و بخشی کندتر حرکت می‌کنند مانند همان اتفاقی است که موجب تغییر جهت جبهه‌های موج سطحی آب در نزدیکی ساحل می‌شود. به این ترتیب پرتوهای موج که همواره باید عمود بر جبهه‌های موج باشند، رو به پایین خم برمی‌دارند.



شکل ۱ــ هنگامی که برخلاف معمول، هوای سطح زمین سردتر از هوای بالای آن باشد، صوت افزون بر مسیر مستقیم، با شکست از لایه‌های هوا، به گوش شنونده می‌رسد.



شکل ۲ــ در صورتی که موج از محیطی با تندی بیشتر برود، زاویهٔ شکست θ_2 بزرگ‌تر از زاویهٔ تابش θ_1 می‌شود.

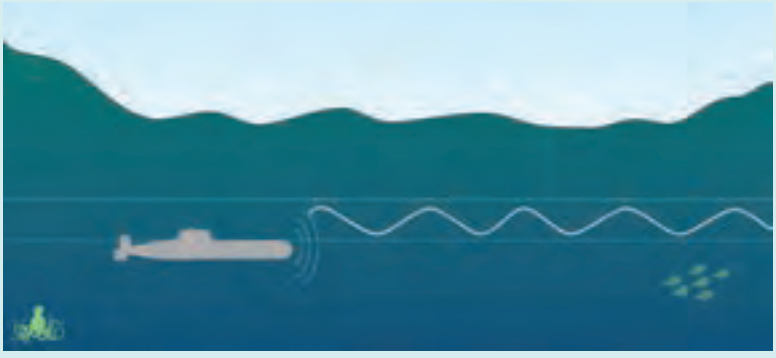


شکل ۳ــ چگونگی خم شدن جبهه‌های موج صوتی، وقتی هوای سطح زمین سردتر از هوای بالای آن است.

دانستنی برای معلم

شنیدن صدای زیردریایی‌های دشمن

در طول جنگ سرد، کشور آمریکا، زیردریایی‌های کشور شوروی را با شبکه‌ای از آنتن‌های صوتی در زیرآب دیدبانی می‌کرد، به‌طوری که حتی می‌توانست صدای ملخ پرسروصدای یک زیردریایی را از فاصله‌ای ۱۰۰۰ کیلومتری، در عرض‌های جغرافیایی میانی بشنود. در واقع صداهایی که از این زیردریایی‌ها گسیل می‌شد، در چیزی موسوم به *کانال صوتی عمیق* (DSC)[۱] گیر می‌افتاد و به طور طولی به سمت آنتن‌های صوتی حرکت می‌کرد. توضیح ماجرا به این ترتیب است که تندی صوت در آب دریا، هم به عمق آب و هم به دمای آن بستگی دارد. اگر با پایین رفتن در آب، تندی صوت را اندازه بگیریم، نخست اثر دما غالب است و با کاهش دما تندی صوت نیز کاهش می‌یابد. اما با پیشتر رفتن در عمق آب سرانجام تأثیر عمق غالب می‌شود و از آن به بعد، تندی صوت افزایش پیدا می‌کند. بنابراین گستره‌ای از عمق وجود دارد که در آن تندی صوت کمینه است. اگر صوت در این گستره حرکت کند و بخواهد به درون منطقه‌ای با تندی بیشتر برود، بر اثر تغییر تندی، مانند آنچه در شکل ۳ دانستنی قبل دیدیم به طرف ناحیه‌ای با تندی کمتر شکست پیدا می‌کند و بنابراین در حرکتی رفت و برگشتی در این کانال صوتی گیر می‌افتد رو به جلو، به سمت آنتن‌های گیرنده، پیش می‌رود. از این سازوکار برای ارسال کم‌اتلاف امواج صوتی در اقیانوس‌ها نیز استفاده می‌شود.



۱ــ Deep Sound Channel

خوب است در پایان بحث به عنوان اطلاعات عمومی توضیحی در مورد زاویهٔ حد به دانش‌آموزان ارائه شود و آنها را به دانستنی مربوط به آن نیز ارجاع دهید.

پاسخ تمرین ۴ـ۴

قانون اسنل را به‌طور مجزا برای دو پرتوی قرمز و آبی می‌نویسیم.

برای پرتوی قرمز داریم :

$$n_1 \sin\theta_1 = n_{2\,\text{قرمز و}} \sin\theta_{2\,\text{قرمز و}}$$

و از آنجا

$$\sin\theta_{2\,\text{قرمز و}} = \frac{n_1}{n_{2\,\text{قرمز و}}} \sin\theta_1 = \frac{1/000}{1/459} \sin 45/0^\circ$$

که به $\theta_{2\,\text{قرمز و}} = 28/9^\circ$ می‌انجامد و برای پرتوی آبی داریم :

$$\sin\theta_{2\,\text{قرمز و}} = \frac{n_1}{n_{2\,\text{قرمز و}}} \sin\theta_1 = \frac{1/000}{1/467} \sin 45/0^\circ$$

که به $\theta_{2\,\text{قرمز و}} = 28/8^\circ$ می‌انجامد. (در حلّ این تمرین، زاویهٔ تابش دقیقاً $45/0^\circ$ درنظر گرفته شد، چرا که در غیر این‌صورت هر دو پاسخ به 29° می‌انجامید و تفاوت فیزیکی این دو حالت دیده نمی‌شد.) اختلاف ناچیز همین دو زاویه است که به پاشندگی نور انجامیده است.

فیزیک ۳

شکل ۴ـ۲۳ (الف) شیشگی اشراق‌امیز یک پرتوی نور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم به سمت هوای گرم‌تر پایین می‌رود. ب) تغییر جبهه‌های موج و شیشگی مربوط به آن، به این دلیل رخ می‌دهد که انتهای پایین جبهه‌های موج در هوای گرم‌تر سریع‌تر حرکت می‌کنند. پ) شیشگی اشراق‌امیز یک پرتوی نور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم‌تر به سمت هوای گرم بالا می‌رود.

پاشندگی نور : همان‌طور که در علوم هشتم دیدیم وقتی باریکهٔ نور سفید خورشید به وجهی از یک منشور می‌تابد، در عبور از منشور به رنگ‌های مختلفی تجزیه می‌شود (شکل ۴ـ۲۳ الف). دلیل این پدیده آن است که ضریب شکست هر محیطی به جز خلأ به طول‌موج نور بستگی دارد؛ یعنی وقتی باریکهٔ نوری شامل پرتوهایی با طول‌موج‌های مختلف بتابد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در زاویه‌های مختلفی شکسته می‌شوند. به این پخش‌شدگی نور، **پاشندگی نور** می‌گویند. عموماً ضریب شکست یک محیط معیّن برای طول‌موج‌های کوتاه‌تر، بیشتر است. نمودار شکل ۴ـ۲۴ این وابستگی ضریب شکست به طول‌موج نور را برای شیشهٔ معمولی نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار اگر مثلاً دو باریکهٔ نور آبی و قرمز با زاویهٔ تابش یکسانی از هوا وارد شیشه شوند باریکهٔ آبی بیشتر از باریکهٔ قرمز خم می‌شود.

اگر باریکهٔ نور سفید از هوا بر یک سطح شیشه‌ای فرود آید بر اثر شکست نور، مؤلفه‌های سازندهٔ باریکهٔ نور سفید هر کدام به میزان متفاوتی خم می‌شوند که البته این تفاوت چندان محسوس نیست. برای افزایش جدایی رنگ‌ها در پاشندگی نور، معمولاً از یک منشور با سطح مقطع مثلثی استفاده می‌کنیم. پاشندگی ناچیز در سطح اول، سپس با پاشندگی در سطح دوم افزایش می‌یابد و مؤلفه‌های رنگی نور سفید به‌طور محسوسی از هم جدا می‌شوند (شکل ۴ـ۲۳ ب)[۱].

تمرین ۴ـ۴

شکل روبه‌رو باریکهٔ نوری متشکل از دو پرتوی قرمز و آبی را نشان می‌دهد که از هوا و با زاویهٔ تابش 45° بر سطح تیغهٔ تختی از کوارتز می‌تابد. زاویه‌های شکست برای این دو پرتو را محاسبه کنید. ضریب شکست نورهای قرمز و آبی در کوارتز به‌ترتیب برابرند با $n_{\text{قرمز}} = 1/459$ و $n_{\text{آبی}} = 1/467$.

۱ـ محاسبهٔ زاویه‌ها در شکست نور به‌وسیلهٔ منشور، خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

تار نوری : وقتی نور از محیطی با ضریب شکست بیشتر به‌طور مایل وارد محیطی با ضریب شکست کمتر شود، به ازای زاویهٔ تابش خاصی موسوم به **زاویهٔ حد**، زاویهٔ شکست 90° می‌شود و از آن پس برای هر زاویهٔ تابش بزرگ‌تری همهٔ نور فرودی بازمی‌تابد که به این پدیده، **بازتاب داخلی کلی** گفته می‌شود. تار نوری که هم در پزشکی و هم در فناوری ارتباطات نقش مهمی دارد، بر اساس این پدیده عمل می‌کند. در مرکز یک تار نوری، مغزی استوانه‌ای شفافی از جنس شیشه یا پلاستیک با ضریب شکست نسبتاً بالا قرار دارد. ضخامت این مغزی می‌تواند تا چند میکرومتر باشد. اطراف مغزی یا غلافی پوشیده شده است که آن نیز شفاف است، ولی ضریب شکست بسیار کوچک‌تری از ضریب شکست مغزی دارد تا زاویهٔ حد به اندازهٔ کافی کوچک باشد. نور طوری از یک سر مغزی وارد می‌شود که به مرز مغزی ــ غلاف تحت زاویه‌ای بزرگ‌تر از زاویهٔ حد بتابد و در نتیجه تماماً به درون مغزی بازتاب کند. سپس همین اتفاق در مرز روبه‌روی مرز قبلی رخ می‌دهد و نور بر اثر بازتاب داخلی کلی دوباره به مغزی بازتابیده می‌شود و این روند و برگشت نور در مسیری زیگزاگ ادامه می‌یابد (شکل الف) تا اینکه به سر دیگر تار برسد. در یک تار نوری خوب، نور در مغزی کمی جذب پیدا می‌کند و بنابراین می‌توانه پیش از آنکه شدتش کاهش یابد، تا مسافت‌های طولانی حرکت کند. تارهای نوری اغلب به‌صورت دسته‌ای کنار هم قرار می‌گیرند تا به شکل یک کابل درآیند. چون تارها بسیار نازک‌اند کابل‌ها نسبتاً کوچک و انعطاف‌پذیر هستند و به این ترتیب می‌توانند در بسیاری موارد، برای انتقال اطلاعات جایگزین کابل‌های فلزی پرزگ شوند (شکل ب). یکی از کاربردهای مهم تارهای نوری در عمل آندوسکوپی در پزشکی است. از آندوسکوپ برای دیدن درون بدن، بدون انجام جراحی استفاده می‌شود. در آندوسکوپی، جراح دو دسته تار نوری را وارد بدن بیمار می‌کند که یکی نور را به محل موردنظر می‌رساند و دیگری تصویر محل موردنظر را به یک چشمی یا صفحهٔ نمایشگر می‌رساند. شکل پ، طرح ساده‌شده‌ای از چگونگی این تصویربرداری و شکل ت، یک اسباب آندوسکوپی معمولی را نشان می‌دهد.

الف) طرحی از ساختار یک تار نوری و مسیر زیگزاگی که نور در آن می‌پیماید.

ب) یک کابل سبک تار نوری (شکل سمت چپ) می‌تواند دستگاه‌های نظامی بسیار پیشرفته را از یک کابل سیمی معمولی (شکل سمت راست) انتظار دهد.

دسته تار نوری ۲ تصویر محل موردنظر را به پزشک می‌رساند.

دسته ۲

دسته ۱

جسم تور

دسته تار نوری ۱ محل مورد نظر را روشن می‌کند.

ب) طرح ساده‌شده‌ای از طرز کار یک آندوسکوپ

عدسی چشمی

عدسی کابل

جسم تور

کابل

در دسته تار نوری داخل کابل قرار دارد.

ت) یک اسباب آندوسکوپ معمولی

۴ـ۳ پراش موج

اگر در مسیر پیشروی یک موج مانعی قرار دهیم بخشی از موج که به مانع برخورد می‌کند، توسط مانع بازتاب و یا جذب می‌شود و به پشت مانع نمی‌رسد و بخشی دیگر، از لبه‌های مانع یا شکاف‌های موجود در آن، می‌گذرد. در صورتی که ابعاد مانع یا شکاف در حدود طول‌موج بتابد، بخشی از موج که از لبه‌ها یا شکاف‌ها عبور می‌کند، به‌وضوح به اطراف مانع یا شکاف گسترده می‌شود.

۱۰۱

فیلم

در این فیلم چگونگی طرز کار یک تار نوری را می‌بینید.

دانستنی برای معلم

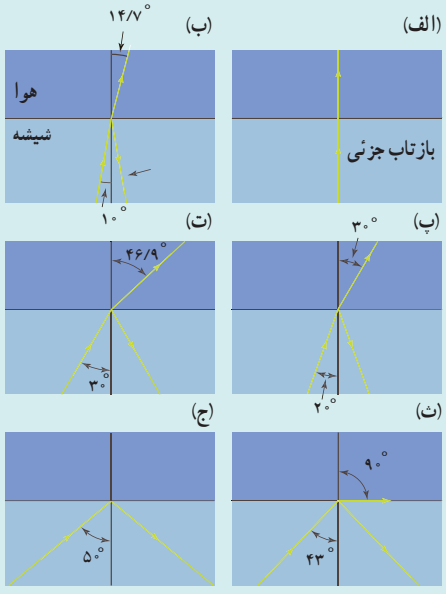
بازتاب داخلی کلی

وقتی نور از محیطی با ضریب شکست بیشتر به طور مایل وارد محیطی با ضریب شکست کمتر شود (مثلاً از شیشه وارد هوا گردد)، بخشی از نور در سطح مشترک بازمی‌تابد و بقیهٔ نور طوری شکست می‌یابد که از خطّ عمود دور می‌شود. اگر زاویهٔ تابش را بزرگ‌تر و بزرگ‌تر کنیم، زاویهٔ شکست نیز بزرگ‌تر و بزرگ‌تر می‌شود (شکل‌های ۱ الف تا ت) تا اینکه به ۹۰° برسد (شکل ۱ ث). از این پس برای هر زاویهٔ تابش بزرگ‌تری پرتوی شکسته‌ای وجود نخواهد داشت و همهٔ نور فرودی، بازتابیده می‌شود (شکل ۱ ج). به این پدیده **بازتاب داخلی کلی** می‌گویند. زاویه‌های شکست در شکل ۱ براساس قانون اسنل تعیین شده‌اند و به زاویهٔ تابشی که به ازای آن، زاویهٔ شکست برابر ۹۰° می‌شود (اصطلاحاً *زاویهٔ حد* می‌گویند و آن را با θ_C نشان می‌دهند.) اکنون به‌ازای $\theta_۲ = ۹۰^\circ$ و $\theta_۱ = \theta_۲$، با استفاده از قانون اسنل خواهیم داشت

$$n_۱ \sin\theta_C = n_۲ \sin ۹۰^\circ$$

و از آنجا زاویهٔ حدّ θ_C را می‌توانیم با استفاده از رابطهٔ زیر به دست آوریم

$$\sin\theta = \frac{\quad}{\quad}$$

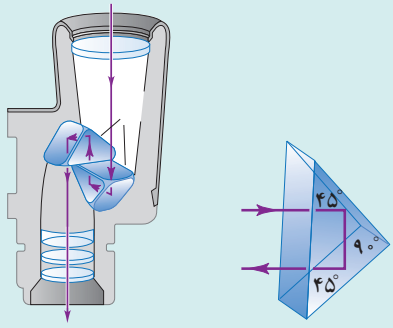


شکل ۱ــ پرتوی نوری با عبور از شیشه به سطح مشترک شیشه ــ هوا با زاویه‌های تابش مختلف برخورد می‌کند. با بزرگ‌تر شدن زاویهٔ تابش، زاویهٔ شکست نیز بزرگ می‌شود تا اینکه به ازای زاویهٔ حد، به ۹۰° می‌رسد. از آن پس، همهٔ نور فرودی بازمی‌تابد.

افزون بر تاری نوری، بازتاب داخلی کلی کاربردهای دیگری نیز دارد که در اینجا به آنها می‌پردازیم.

بازتاباننده‌ها و دوربین‌های دوچشمی

این واقعیت که زاویهٔ حد برای سطح شیشه ــ هوا با استفاده از رابطهٔ $\sin\theta_C = \frac{۱}{۱/۵۲} = ۰/۶۵۸$ برابر $\theta_C = ۴۱/۱^\circ$ به‌دست می‌آید، استفاده از منشوری مثلثی با زاویه‌های ۴۵°، ۴۵° و ۹۰° را به عنوان یک سطح بازتاباننده‌ٔ *کامل* برای پرتویی که مطابق شکل ۲ الف به وجوه ۴۵°ی آن تابیده، امکان‌پذیر می‌کند. به عبارتی، زاویهٔ تابش در این وجوه ۴۵° و بزرگ‌تر از زاویهٔ حد است و بنابراین در این وجوه بازتاب کلی رخ می‌دهد. یک منشوربازتاباننده‌ٔ کامل این مزیت را بر آینه‌های معمولی دارد که برخلاف آنها ۱۰۰٪ نور تابیده به خود را بازمی‌تاباند، ضمن اینکه خاصیت بازتابانندگی آن تحت تأثیر کدر شدن سطوح آن قرار نمی‌گیرد. به چنین منشوری، منشور پورّو[۱] می‌گویند و معمولاً از ترکیب دوتای آنها در دوربین‌های دوچشمی استفاده می‌شود (شکل ۲ ب).



شکل ۲ــ (الف) بازتاب داخلی کلی در یک منشور پورّو (ب) دوربین‌های دوچشمی از دو منشور پورّو برای بازتاباندن نور به هر عدسی چشمی استفاده می‌کند.

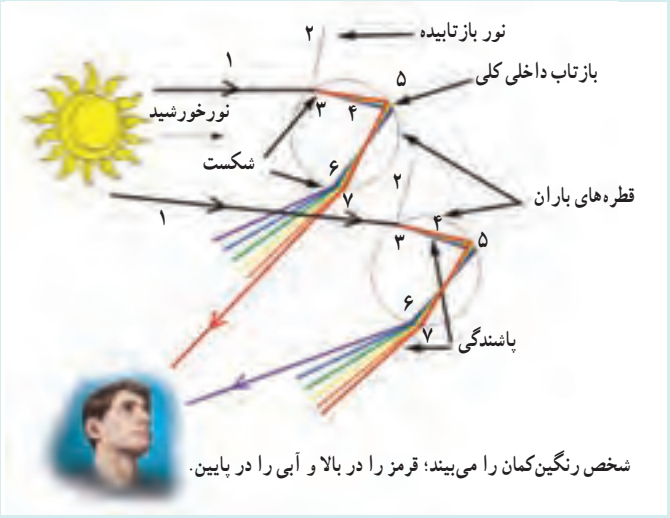
رنگین‌کمان

تشکیل یک رنگین‌کمان شامل مجموعه‌ای از پدیده‌های فیزیکی، از جمله بازتابش، شکست، پاشندگی، و بازتاب داخلی کلی است. مراحل تشکیل رنگین‌کمان بدین ترتیب است : ۱ــ نور سفید حاصل از خورشید به قطره‌های باران برخورد می‌کند. هر چه خورشید در ارتفاع پایین‌تری در آسمان باشد (مثلاً در هنگام سپیده‌دم یا غروب آفتاب) امکان مشاهدهٔ رنگین‌کمان بیشتر است. ۲ــ برخی از نور تابیده بازتابش پیدا می‌کند. این مانند حالتی است که تصویر خود را در یک شیشهٔ پنجرهٔ شفاف می‌بینید. شیشه هم بخشی از نور را عبور می‌دهد و هم بخشی از آن را بازمی‌تاباند. ۳ــ بقیهٔ نور شکست پیدا می‌کند. چون ضریب شکست آب بیشتر از هواست، نور به سمت خط عمود شکست پیدا می‌کند. ۴ــ نور سفید شامل مجموعه‌ای از رنگ‌ها با طول موج‌های مربوط به خود است. بنابراین همان‌طور که در مبحث پاشندگی دیدیم، هر طول موج در آب با تندی متفاوتی حرکت می‌کند و در نتیجه رنگ‌ها از هم جدا می‌گردند. ۵ــ نور شکسته‌یافته با سطح عقبی قطره برخورد می‌کند و اگر زاویهٔ تابش آن بزرگ‌تر از زاویهٔ حد باشد، دستخوش بازتاب داخلی کلی می‌شود. یک رنگین‌کمان تنها در صورتی دیده می‌شود که این اتفاق رخ دهد. در غیر این صورت، نور از قطره خارج می‌شود. ۶ــ نور در هنگام خروج از قطرهٔ آب، دوباره شکست پیدا می‌کند؛ اما چون این بار از محیطی چگال‌تر (آب) به محیطی کم‌چگال‌تر (هوا) وارد می‌شود، به سمت دور شدن از خط عمود کج می‌شود. ۷ــ پس از شکست مجدد نور، مؤلفه‌های رنگی نور سفید بر اثر پاشندگی، بیشتر از هم فاصله می‌گیرند. این هفت مرحله در شکل ۳ نشان داده شده است.

به این رنگین‌کمان، که شامل فقط یک بازتاب در داخل هر قطره است، *رنگین‌کمان اولیه* گفته می‌شود. در برخی قطره‌ها، دو

۱ــ Porro Prism

بازتاب رخ می‌دهد که آنها رنگین‌کمان دیگری موسوم به رنگین‌کمان *ثانویه* را می‌سازند که عریض‌تر و کم‌نورتر، و بنابراین مشاهدهٔ آن دشوارتر است. ترتیب رنگ‌ها در رنگین‌کمان ثانویه برعکس ترتیب رنگ‌ها در رنگین‌کمان اولیه است (شکل ۴).



شکل ۳ــ تشکیل رنگین‌کمان شامل چنیدن مرحله است که در اینجا برای دو قطرهٔ باران نشان داده شده است.

(ب) (الف)

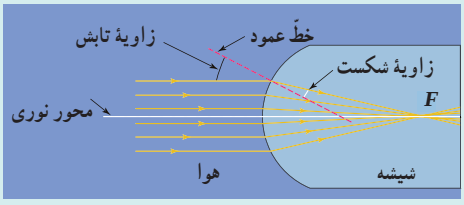
شکل ۴ــ مقایسهٔ رنگین‌کمان اولیه و ثانویه

شکست امواج نوری در مرز کروی

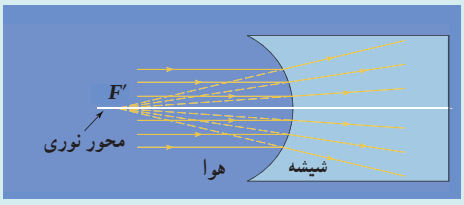
شکست نور در مرزهای کروی اهمیت فراوانی در فیزیک دارد و اساس کار بسیاری از ابزارهای نوری از جمله میکروسکوپ، دوربین‌های نجومی و حتی چشم ما مبتنی بر چنین شکستی است. شکست نور در سطحی کروی از همان قوانین شکست در یک سطح تخت پیروی می‌کند. یعنی پرتوهای تابش و شکست در دوطرف خطّ عمود بر سطح جدایی دو محیط در نقطهٔ تابش، و همه در یک صفحه قرار دارند. و همچنین قانون اسنل نیز برای آنها برقرار است. شکل ۱ پرتوهایی را نشان می‌دهد که به طور موازی با محور تقارن سطح شیشه‌ای که به آن *محور نوری* می‌گویند، از هوا وارد مرز کوژ هوا ــ شیشه شده‌اند. این پرتوها هر یک بر طبق قوانین شکست، شکست پیدا می‌کنند اما در این حالت شکست سبب نزدیک شدن پرتوها به یکدیگر یا اصطلاحاً کانونی شدن آنها در نقطه‌ای موسوم به کانون (نقطهٔ F) می‌گردد. ولی اگر این پرتوها مانند شکل ۲ از هوا وارد مرز کاو هوا ــ شیشه شوند، پرتوهای شکست‌یافته با اینکه دوباره به خط عمود نزدیک می‌گردند ولی به دلیل شکل کاو سطح از هم دور می‌شوند به طوری که گمان برده می‌شود آنها از کانون F' در سمت چپ مرز کروی ناشی شده‌اند. توانایی نزدیک کردن یا دور کردن پرتوهای موازی، مشخصهٔ اصلی عدسی‌ها است که در دوربین، تلسکوپ، یا چشم انسان وجود دارد. گرچه کانونی‌سازی در بسیاری از ابزارهای نوری رخ می‌دهد، اما نور باید از این ابزارها خارج گردد. به همین دلیل عدسی‌های معمولی دارای دو سطح شکست‌دهندهٔ نور، به جای یک سطح هستند؛ یکی یک سطح کروی و دیگری یک سطح کروی دیگر یا یک سطح تخت است. عدسی‌ها بسته به اینکه نور را همگرا یا واگرا کنند، *عدسی‌های همگرا* یا *عدسی‌های واگرا* نامیده می‌شوند. شکل ۳ تعدادی از عدسی‌های همگرا و واگرا، و شکل‌های ۴ و ۵ چگونگی شکست نور در دو نوع رایج این عدسی‌ها را نشان می‌دهد. در مورد شکل ۴ توجه کنید که هرچه خمیدگی سطوح شکست‌دهنده بیشتر باشد، فاصلهٔ کانون از عدسی که به آن *فاصلهٔ کانونی* گفته شده و با f نشان داده می‌شود کوتاه‌تر است. به همین دلیل برای عدسی‌ها کمیتی به نام *توان عدسی* معرفی می‌شود که برابر با عکس فاصلهٔ کانونی است :

$$\text{توان عدسی} = \frac{1}{f}$$

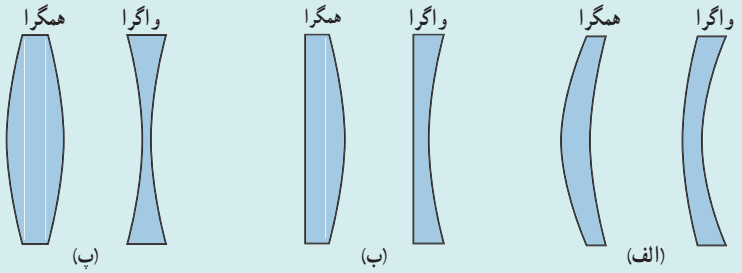
که یکای آن ۱/m است و آن را دیوپتر می‌نامند و با D نشان می‌دهند. بنابراین هرچه توان یک عدسی همگرا بیشتر باشد، توان آن برای کانونی‌کردن پرتوهای موازی بیشتر و فاصلهٔ کانونی آن کوتاه‌تر است. رابطهٔ بالا و آنچه در مورد توان و مقایسهٔ دو عدسی همگرا گفتیم در مورد عدسی‌های واگرا نیز برقرار است، یعنی هرچه توان یک عدسی واگرا بیشتر باشد، توانایی این عدسی برای واگرا کردن پرتوهای موازی بیشتر و فاصلهٔ کانونی آن کوتاه‌تر است، یعنی کانون F' آن به عدسی نزدیک‌تر است.



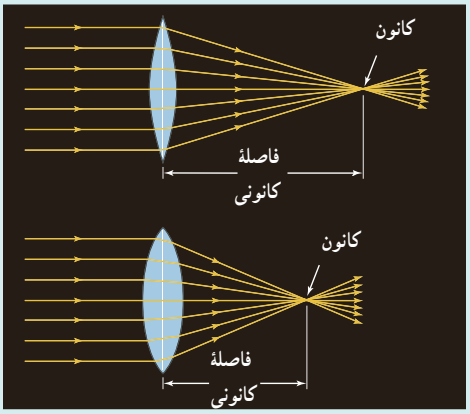
شکل ۱ــ شکست پرتوهای نور در مرز کوژ هوا ــ شیشه. توجه کنید که پرتوهای فرودی موازی محور نوری و نزدیک به آن هستند و در کانون F متمرکز می‌شوند.



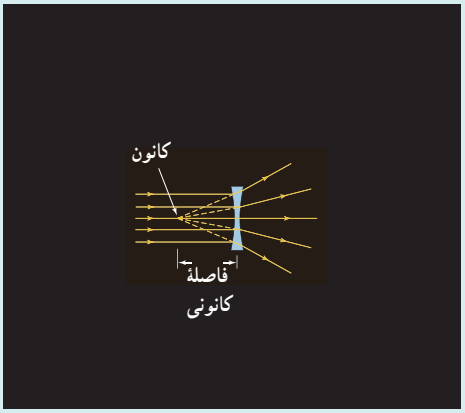
شکل ۲ــ شکست پرتوهای نور در مرز کاو هوا ــ شیشه. توجه کنید که پرتوهای فرودی موازی محور نوری و نزدیک به آن هستند و طوری شکست یافته‌اند که گویی از کانون F' ناشی شده‌اند.



شکل ۳ــ مثال‌هایی از چند نوع عدسی : (الف) کوژ ـ کوژ چپ، کاو ـ کاو راست ؛ (ب) تخت ـ کوژ چپ، تخت ـ کاو راست؛ (پ) هلالی ـ کوژ چپ، هلالی ـ کاو راست.



شکل ۴ــ مقایسهٔ توان دو عدسی همگرا با سطوح خمیدگی متفاوت. توان عدسی خمیده‌تر در کانونی کردن پرتوها، بیشتر و در نتیجه فاصلهٔ کانونی آن کوتاه‌تر است.



شکل ۵ــ چگونگی شکست نور در عدسی کاو ــ کاو که نمونهٔ رایج عدسی‌های واگرا است.

نمرهٔ عینک را معمولاً با یک علامت مثبت یا منفی در کنار یک عدد مشخص می‌کنند. علامت مثبت در کنار عدد به معنی دوربینی، و علامت منفی در کنار عدد به معنی نزدیک‌بینی است و عددها همان توان عدسی اصلاح‌کنندهٔ بینایی شخص است که همان‌طور که دیدیم با یکای دیوپتر مشخص می‌شود. هر چه عدد نمرهٔ عینک بیشتر باشد به معنی آن است که چشم شما ضعیف‌تر است و باید از عدسی تصحیح‌کنندهٔ با توان بیشتری استفاده کنید. عدسی تصحیح‌کنندهٔ دوربینی، همگرا و عدسی تصحیح‌کنندهٔ نزدیک بینی، واگرا است. مثلاً اگر با مراجعه به چشم‌پزشک دریافته‌اید که نمرهٔ عینک تصحیح‌کنندهٔ بینایی چشم شما ۴/۲۵D- است، به این معنی است که با توجه به منفی بودن نمرهٔ عینک، بیماری چشم شما نزدیک‌بینی است و بنابراین باید از یک عدسی واگرا برای تصحیح آن استفاده کنید. فاصلهٔ کانونی این عدسی از رابطهٔ زیر به دست می‌آید :

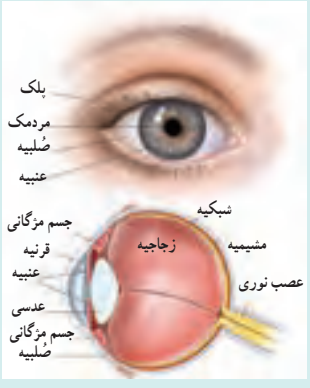
$$f = \frac{۱}{\text{توان عدسی}} = \frac{۱}{۴/۲۵\text{D}} = ۰/۲۳۵۳\text{m} \approx ۰/۲۳۵\text{m} = ۲۳/۵\text{cm}$$

دانستنی برای معلم

دیدن انسان و ماهی در زیر آب

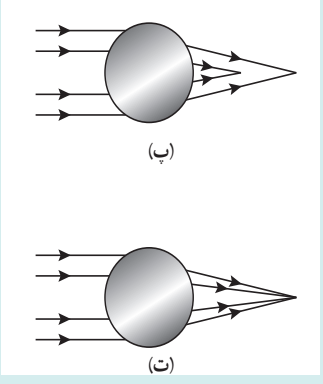
چشم ما از اجزای مختلفی تشکیل شده است (شکل الف). ما به این دلیل می‌توانیم ببینیم که چشم ما پرتوهای نور را خم می‌کند، به‌طوری‌که تصویر واضحی بر روی شبکیه تشکیل می‌شود. حدود $\frac{۲}{۳}$ از این خم شدن در سطح خمیدهٔ قرنیه رخ می‌دهد، بقیهٔ آن به هنگام عبور پرتوها از عدسی چشم که در پشت قرنیه قرار دارد (شکل ب). وقتی شما داخل آب می‌روید همهٔ قدرت کانونی‌سازی توسط قرنیه از دست می‌رود، زیرا ضریب شکست مادهٔ سازندهٔ قرنیه ۱/۳۷۶ و ضریب شکست آب حدود ۱/۳۳۳ است و بنابراین با ورود پرتوهای نور از آب به چشم تقریباً هیچ شکست نوری در قرنیه رخ نمی‌دهد. در نتیجه، این فقط عدسی چشم است که پرتوهای نور را کانونی می‌کند. بیشتر انسان‌ها نمی‌توانند شکل عدسی چشم خود را آنقدر تغییر دهند تا تصویر واضحی بر روی شبکیه تشکیل شود. البته برخی از شناگران بومی مناطق استوایی خود را تعلیم داده‌اند تا با خم کردن عدسی چشم خود تا آنجا که ممکن است باعث ایجاد تصاویری نسبتاً واضح بر روی شبکیه شوند. به همین دلیل است که یک شخص نزدیک‌بین که خمیدگی عدسی چشم او بیشتر از خمیدگی چشم فردی با دیدی طبیعی است، در زیر آب بهتر از او می‌بیند. غواصی که ماسک می‌زند به طریقی دیگر دید خود را در زیر آب اصلاح می‌کند. به عبارتی وقتی ماسک زده می‌شود هوای محبوس بین شیشهٔ ماسک و چشم موجب می‌شود خمیدگی پرتوهای نور در سطح قرنیه عادی گردد.

اما در مورد ماهی، چون در درون آب زیست می‌کند عدسی چشم آن به شکل کروی است تا بتواند پرتوها را به دقت بشکند و تصویری در شبکیه ایجاد کند. ولی یک عدسی کروی تمام پرتوهای موازی تابیده به خود را در یک نقطه کانونی نمی‌کند و پرتوها در گسترهٔ وسیعی کانونی می‌شوند (شکل پ) و بنابراین قاعدتاً نباید تصویر واضحی تشکیل شود. با این حال ماهی می‌تواند به خوبی در زیر آب ببیند. دلیل این امر آن است که ضریب شکست عدسی چشم ماهی مقدار واحدی ندارد، بلکه در امتداد محور مرکزی دارای ضریب شکست بزرگ‌تر و از آنجا به سمت پیرامون دارای ضریب شکست کوچک‌تر و کوچک‌تری است. شما این واقعیت را می‌توانید با وارسی چشم یک ماهی تازه یا پخته شده دریابید : بافت چشم ماهی در نزدیکی محور مرکزی سخت‌تر است. همین امر سبب می‌شود پرتوهای موازی در نقطهٔ واحدی کانونی شوند (شکل ت) و ماهی تصویر واضحی ببیند.



الف) اجزای مختلف چشم

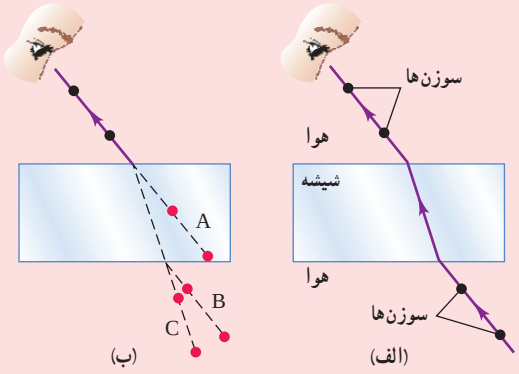
ب) بیشتر خم شدن پرتوها در سطح قرنیه رخ می‌دهد.



پ) طرحی از کانونی‌سازی پرتوهای نور توسط یک عدسی کروی با ضریب شکست یکنواخت
ت) طرحی از کانونی‌سازی پرتوهای نور توسط عدسی چشم ماهی

پرسش پیشنهادی

شکل الف مکان واقعی دو سوزن را نشان می‌دهد که شما آنها را از بالای قطعه‌ای شیشه‌ای مشاهده می‌کنید. کدام‌یک از گزینه‌های شکل ب مکان ظاهری سوزن‌ها را نشان می‌دهند؟



پاسخ : A

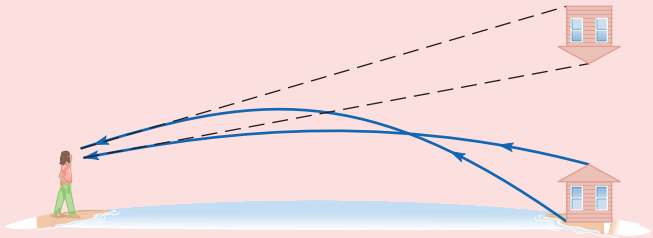
فعالیت‌های پیشنهادی

۱ سرتان را مماس بر دیواری طویل که رو به خورشید است قرار دهید، طوری‌که چشم‌هایتان نزدیک به سطح دیوار باشد. حال اگر به دوستتان نگاه کنید که در سر دیگر این دیوار ایستاده است،تصویری آینه‌ای از دوست خود را در دیوار می‌بینید که به نظر می‌رسد در نقاطی به دوستتان وصل شده است. به این، *سراب دیوار* می‌گویند.

۲ در نواحی بسیار سرد معمولاً سراب دیگری موسوم به *سراب فوقانی*[۱] رخ می‌دهد که ناشی از سردتر بودن لایهٔ هوای نزدیک سطح زمین نسبت به هوای بالاتر آن است و بنابراین بر اثر تغییر تدریجی دما و در نتیجه ضریب شکست، سراب به جای سطح زمین بر روی هوا تشکیل می‌شود و تصویر وارونه‌ای از جسم مورد نظر در هوا دیده می‌شود. مثلاً شکل زیر، سرابی فوقانی از یک خانه در ناحیه‌ای از قطب شمال را نشان می‌دهد. با رسم نموداری پرتویی دلیل امر را نشان دهید.

۱ــ Superior Mirage

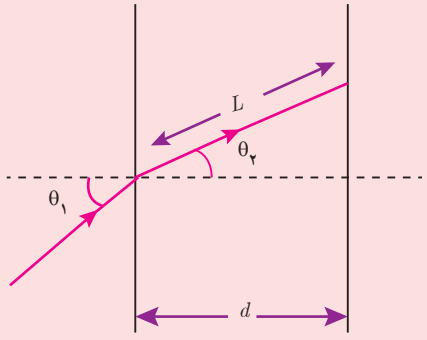
پاسخ :



تمرین‌های پیشنهادی

۱ نوری تحت زاویهٔ $\theta=۳۸/۵^\circ$ بر تیغه‌ای با ضریب شکست $n=۱/۵۰$ و ضخامت $d=۵/۹۰\,cm$ تابیده است. مسافت Lی که نور در تیغه پیموده، چقدر است؟

پاسخ : از مثلث شکل درمی‌یابیم



$$\cos\theta_۲=\frac{d}{L}$$

زاویهٔ $\theta_۲$ را از قانون اسنل می‌یابیم

$$n_۱\sin\theta_۱=n_۲\sin\theta_۲$$

در نتیجه

$$\sin\theta_۲=\frac{n_۱\sin\theta_۱}{n_۲}=\frac{\sin ۳۸/۵^\circ}{۱/۵۰}=۰/۴۱۵$$

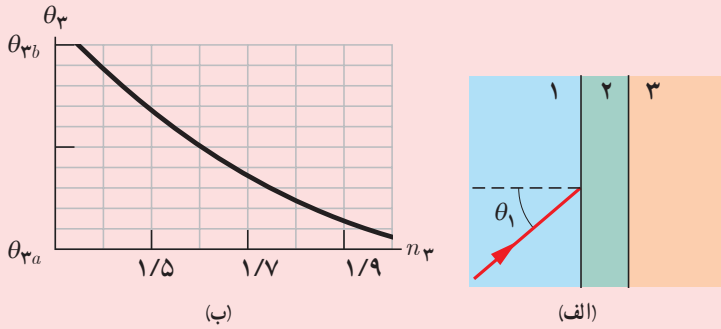
و بنابراین $\cos\theta_۲$ چنین می‌شود :

$$\cos\theta_۲ = \sqrt{۱-\sin^۲\theta_۲} = ۰/۹۱۰$$

(که حدوداً مربوط به زاویهٔ $۲۴/۵^\circ$ است). بنابراین برای L خواهیم داشت :

$$L = \frac{d}{\cos\theta_۲} = \frac{۵/۹۰\,\text{cm}}{۰/۹۱۰} = ۶/۴۸۵\,\text{cm} \approx ۶/۴۸\,\text{cm}$$

۲ یک باریکهٔ نور مطابق شکل الف تحت زاویهٔ $\theta_۱=۴۰^\circ$ بر یک مرز تابیده است. دو مرز بین سه لایه، موازی و جنس لایه‌های ۱ و ۳ یکسان است. شکل ب زاویهٔ شکست $\theta_۲$ در لایه سوم را در حالت کلی برحسب $n_۳$ نشان می‌دهد (به عبارتی این نمودار نشان می‌دهد بسته به اینکه جنس محیط سوم چه باشد، زاویهٔ شکست چگونه است). اکنون دو وضعیت را در نظر بگیرید. الف) نخست فرض کنید جنس لایه‌های اول و سوم یکسان است. در این صورت ضریب شکست مادهٔ ۱ چقدر است؟ ب) اکنون فرض کنید جنس مادهٔ سوم با مادهٔ اول متفاوت و ضریب شکست مادهٔ ۳ برابر ۲/۴ باشد. درصورتی‌که $\theta_۱=۷۰^\circ$ باشد، $\theta_۲$ چقدر خواهد بود؟



پاسخ : از قانون اسنل داریم :

$$n_۱\sin\theta_۱ = n_۲\sin\theta_۲ = n_۳\sin\theta_۳$$

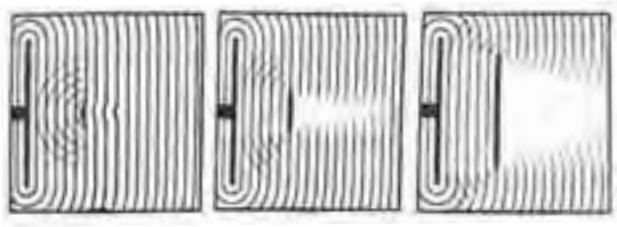
الف) چون جنس لایه‌های ۱ و ۳ یکسان است، $\theta_۱=\theta_۲$ می‌شود و بنابراین $\theta_۳=۴۰^\circ$ است. از روی منحنی (ب) درمی‌یابیم $\theta_۳=۴۰^\circ$ حدوداً مربوط به $n_۳=۱/۶$ است که همان $n_۱$ نیز هست.

ب) اکنون $\theta_۱\neq\theta_۲$. پس داریم :

$$n_۱\sin\theta_۱ = n_۳\sin\theta_۲$$

که به ازای $n_۱=۱/۶$ ، $\theta_۱=۷۰^\circ$ ، و $n_۳=۲/۴$ به $\theta_۲=۳۹^\circ$ می‌انجامد.

در این مبحث خوب است دانش‌آموزان را با موارد ملموس‌تری آمادهٔ این بحث کنید. صدای امواج صوتی را بر خلاف نور امواج نوری می‌توانیم از پشت ساختمان یا دیواری در برابر چشمهٔ موج درک کنیم (بشنویم). به عبارتی این امواج «سایه صوتی» ایجاد نمی‌کنند. دلیل آن است که ابعاد این موانع در مقایسه با طول موج صوتی خیلی بزرگ نیستند، مگر آنکه ساختمان یا دیوار بسیار بزرگی باشد. همین تجربه را می‌توانیم با مشاهدهٔ تشکیل سایه در آزمایش با تشت موج در حضور موانعی با اندازه‌های متفاوت نیز بیازماییم. اگر مانند شکل زیر مانع‌هایی با اندازه‌های مختلف را در سر راه موج سطحی تخت تشکیل شده در تشت موجی قرار دهیم درمی‌یابیم تا وقتی که اندازهٔ مانع‌ها در مقایسه با طول موج قابل ملاحظه باشد سایهٔ نسبتاً واضحی تشکیل می‌شود، ولی وقتی مانع کوچک و کوچک‌تر شود وضوح سایه کمتر و کمتر می‌شود تا اینکه سایه عملاً ناپدید می‌گردد. به عبارتی در این حالت می‌گویند، موج مانع را« **دور زده** »است و طوری به اطراف آن پیشروی کرده است که گویی مانعی وجود نداشته است. این دور زدن موج از اطراف مانع در هنگامی که اندازهٔ مانع در مقایسه با طول موج بسیار کوچک باشد، **پراش** نامیده می‌شود.



فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

تار نوری : وقتی نور از محیطی با ضریب شکست بیشتر به‌طور مایل وارد محیطی با ضریب شکست کمتر شود، به ازای زاویهٔ تابش خاصی موسوم به زاویهٔ حد، زاویهٔ شکست ۹۰° می‌شود و از آن پس برای هر زاویهٔ تابش بزرگ‌تری همهٔ نور فرودی بازمی‌تابد که به این پدیده، بازتاب داخلی کلی گفته می‌شود. تار نوری که هم در پزشکی و هم در فناوری ارتباطات نقش مهمی دارد، بر اساس این پدیده عمل می‌کند. در مرکز یک تار نوری، مغزی استوانه‌ای شفافی از جنس شیشه یا پلاستیک با ضریب شکست نسبتاً بالا قرار دارد. ضخامت این مغزی می‌تواند تا چند میکرومتر باشد. اطراف مغزی با غلافی پوشیده شده است که آن نیز شفاف است، ولی ضریب شکست بسیار کوچک‌تری از ضریب شکست مغزی دارد تا زاویهٔ حد به اندازهٔ کافی کوچک باشد. نور طوری از یک سر مغزی وارد می‌شود که به مرز مغزی ـ غلاف تحت زاویه‌ای بزرگ‌تر از زاویهٔ حد بتابد و در نتیجه تماماً به درون مغزی بازتاب کند. سپس همین اتفاق در مرز روبه‌روی مرز قبلی رخ می‌دهد و نور بر اثر بازتاب داخلی کلی دوباره به مغزی بازتابیده می‌شود و این رفت و برگشت نور در مسیری زیگزاگ ادامه می‌یابد (شکل الف) تا اینکه به سر دیگر تار برسد. در یک تار نوری خوب، نور در مغزی کمی جذب پیدا می‌کند و بنابراین می‌توانید بیش از آنکه شدتش کاهش یابد، تا مسافت‌های طولانی حرکت کند. تارهای نوری اغلب به‌صورت دسته‌ای کنار هم قرار می‌گیرند تا به شکل یک کابل درآیند. چون تارها بسیار نازک‌اند کابل‌ها نسبتاً کوچک و انعطاف‌پذیر هستند و به این ترتیب می‌توانند در بسیاری موارد، برای انتقال اطلاعات جایگزین کابل‌های فلزی بزرگ شوند (شکل ب). یکی از کاربردهای مهم تارهای نوری در عمل آندوسکوپی در پزشکی است. از آندوسکوپ برای دیدن درون بدن، بدون انجام جراحی استفاده می‌شود. در آندوسکوپی، جراح دو دسته تار نوری را وارد بدن بیمار می‌کند که یکی نور را به محل موردنظر می‌رساند و دیگری تصویر محل موردنظر را به یک چشمی یا صفحهٔ نمایشگر می‌رساند. شکل پ، طرح ساده شده‌ای از چگونگی این تصویربرداری و شکل ت، یک اسباب آندوسکوپی معمولی را نشان می‌دهد.

الف) طرحی از ساختار یک تار نوری و مسیر زیگزاگی که نور در آن می‌پیماید.

ب) یک کابل سبک تار نوری (شکل سمت چپ) می‌تواند مکالمه‌های تلفنی بسیار بیشتری را از یک کابل سیمی معمولی (شکل سمت راست) انتقال دهد.

دسته تار نوری ۲ تصویر محل موردنظر را به بزشک می‌رساند.

دستهٔ ۲

دستهٔ ۱

چشمهٔ نور

دسته تار نوری ۱ محل مورد نظر را روشن می‌کند.

ب) طرح ساده‌شده‌ای از طرز کار یک آندوسکوپ

عدسی جسمی

عدسی کابل

چشمهٔ نور

کابل

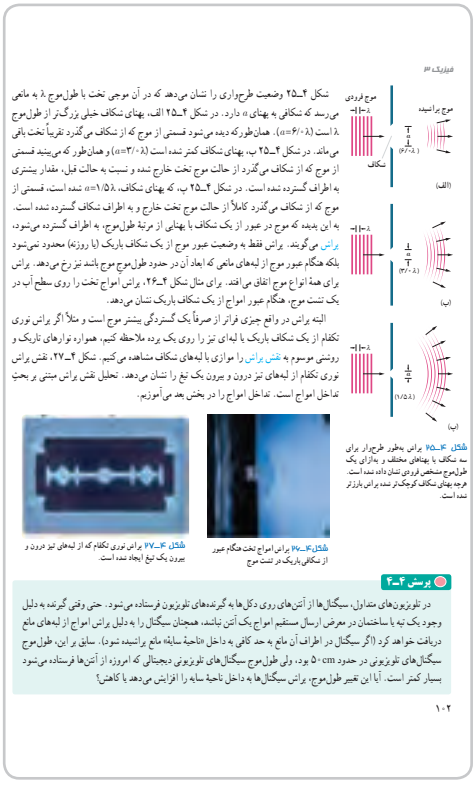
دو دسته تار نوری داخل کابل قرار دارد.

ت) یک اسباب آندوسکوپ معمولی

۴-۳ پراش موج

اگر در مسیر پیشروی یک موج مانعی قرار دهیم بخشی از موج که به مانع برخورد می‌کند، توسط مانع بازتاب و یا جذب می‌شود و به پشت مانع نمی‌رسد و بخشی دیگر، از لبه‌های مانع یا شکاف‌های موجود در آن، می‌گذرد. در صورتی که ابعاد مانع یا شکاف در حدود طول موج باشد، بخشی از موج که از لبه‌ها یا شکاف‌ها عبور می‌کند، به‌وضوح به اطراف مانع یا شکاف گسترده می‌شود.

۱۰۱



فیزیک ۳

شکل ۴ـ۲۵ وضعیت طرح‌واری را نشان می‌دهد که در آن موجی تخت با طول‌موج λ به مانعی می‌رسد که شکافی به پهنای a دارد. در شکل ۴ـ۲۵ الف، پهنای شکاف خیلی بزرگ‌تر از طول‌موج λ است ($a=۶۰/۰\lambda$). همان‌طور که دیده می‌شود قسمتی از موج که از شکاف می‌گذرد تقریباً تخت باقی می‌ماند. در شکل ۴ـ۲۵ ب، پهنای شکاف کمتر شده است ($a=۳/۰\lambda$) و همان‌طور که می‌بینید قسمتی از موج که از شکاف می‌گذرد از حالت موج تخت خارج شده و نسبت به حالت قبل، مقدار بیشتری به اطراف گسترده شده است. در شکل ۴ـ۲۵ پ، که پهنای شکاف، $a=۱/۵\lambda$ شده است، قسمتی از موج که از شکاف می‌گذرد کاملاً از حالت موج تخت خارج و به اطراف شکاف گسترده شده است. به این پدیده که موج در عبور از یک شکاف یا پهنایی از مرتبهٔ طول‌موج، به اطراف گسترده می‌شود، پراش می‌گویند. پراش فقط به وضعیت عبور موج از یک شکاف باریک (یا روزنه) محدود نمی‌شود بلکه هنگام عبور موج از لبه‌های مانعی که ابعاد آن در حدود طول‌موج موج باشد نیز رخ می‌دهد. پراش برای همهٔ انواع موج اتفاق می‌افتد. برای مثال شکل ۴ـ۲۶، پراش امواج تخت را روی سطح آب در یک تشت موج، هنگام عبور امواج از یک شکاف باریک نشان می‌دهد.

البته پراش در واقع چیزی فراتر از صرفاً یک گستردگی بیشتر موج است و مثلاً اگر پراش نوری تکفام از یک شکاف باریک یا لبه‌ای تیز را روی یک پرده ملاحظه کنیم، همواره نوارهای تاریک و روشنی موسوم به نقش پراش را موازی با لبه‌های شکاف مشاهده می‌کنیم. شکل ۴ـ۲۷، نقش پراش نوری تکفام از لبه‌های تیز درون و بیرون یک تیغ را نشان می‌دهد. تحلیل نقش پراش مبتنی بر بحث تداخل امواج است. تداخل امواج را در بخش بعد می‌آموزیم.

شکل ۴ـ۲۵ پراش به‌طور طرح‌وار برای سه شکاف با پهنای مختلف و به‌ازای یک طول‌موج مشخص فرودی نشان داده شده است. هرچه پهنای شکاف کوچک‌تر شده پراش بازتر شده است.

شکل ۴ـ۲۶ پراش امواج تخت هنگام عبور از شکافی باریک در تشت موج

شکل ۴ـ۲۷ پراش نوری تکفام که از لبه‌های تیز درون و بیرون یک تیغ ایجاد شده است.

پرسش ۴ـ۳

در تلویزیون‌های متداول، سیگنال‌ها از آنتن‌های روی دکل‌ها به گیرنده‌های تلویزیون فرستاده می‌شود. حتی وقتی گیرنده به دلیل وجود یک تپه یا ساختمان در معرض ارسال مستقیم امواج یک آنتن نباشد، همچنان سیگنال را به دلیل پراش امواج از لبه‌های مانع دریافت خواهد کرد (اگر سیگنال در اطراف آن مانع به حد کافی به داخل «ناحیهٔ سایهٔ» مانع پراشیده شود). سابق بر این، طول‌موج سیگنال‌های تلویزیونی در حدود ۵۰ cm بود، ولی طول‌موج سیگنال‌های تلویزیونی دیجیتالی که امروزه از آنتن‌ها فرستاده می‌شود بسیار کمتر است. آیا این تغییر طول‌موج، پراش سیگنال‌ها به داخل ناحیهٔ سایه را افزایش می‌دهد یا کاهش؟

۱۰۲

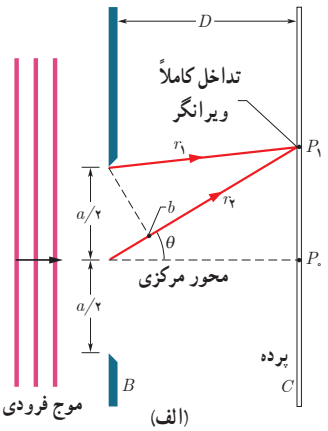
برای توضیح بهتر شکل ۴ـ۲۶، خوب است در شکل‌هایی متوالی مانند شکل زیر، کوچک و کوچک‌تر شدن عرض شکاف و تأثیر آن بر شکل موج فرودی را نشان دهیم. اگر با شکاف‌هایی با اندازه‌های مختلف در تشت موج آزمایش را انجام دهیم درمی‌یابیم هر قدر اندازهٔ شکاف کمتر باشد، پراش بیشتر نمایان می‌شود و موج‌های تخت به شکل امواجی نیم‌دایره‌ای، گسترده‌تر می‌شوند. در شکل الف که اندازهٔ شکاف در مقایسه با طول موج بزرگ‌تر است، امواج عبوری همچنان تخت هستند، اما در شکل‌های ب و پ با کوچک‌تر شدن شکاف‌ها، امواجی نیم‌دایره‌ای به‌وجود آمده‌اند، به‌طوری‌که در شکل پ گویی امواج از چشمه‌ای نقطه‌ای در محلّ شکاف منشأ گرفته‌اند.

(الف) (ب) (پ)

حتماً تأکید شود که این رفتار نور تأییدی بر موجی بودن نور است.

در اینجا به درستی آمده است که تحلیل نقش پراش مبتنی بر بحث تداخل امواج است. اما توجه کنید مفاهیمی که در بخش ۴ـ۴ آمده است دانشی کافی برای این تحلیل را ارائه نمی‌کند. در واقع کتاب‌های مبتنی بر حسابان، نخست به تداخل و سپس به پراش می‌پردازند تا دانش ریاضی لازم برای تحلیل این مبحث را داشته باشند.

همان‌طور که در «دانستنی برای معلم» بخش تداخل خواهید دید، در تداخل دوشکافی، شرط تداخل کاملاً ویرانگر آن است که $a\sin\theta=(m+\frac{۱}{۲})\lambda$ باشد که در آن a فاصلهٔ دو شکاف است. برای تحلیل نقش پراش از روشی مشابه و البته هوشمندانه استفاده می‌کنیم. در این روش تمام پرتوهای عبوری از شکاف را به صورت جفت ـ جفت در نظر می‌گیریم و سپس شرط تداخل ویرانگر را به‌کار می‌بندیم.



(الف)

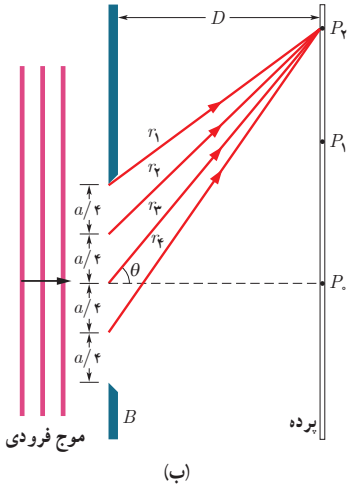
این روش را در شکل الف برای تعیین مکان نخستین فریز تاریک به‌کار برده‌ایم. یعنی به طور ذهنی شکاف را به دو منطقه با پهنای مساوی $a/۲$ تقسیم کرده‌ایم. پرتوی نور $r_۱$ از نقطهٔ بالایی منطقهٔ بالا و پرتوی نور $r_۲$ از نقطهٔ بالایی منطقهٔ پایین به نقطهٔ $p_۱$ وصل شده‌اند. برای اینکه موجک‌های این پرتو در هنگام رسیدن به $p_۱$ یکدیگر را حذف کنند باید داشته باشیم

$$\frac{a}{۲}\sin\theta=\frac{\lambda}{۲}$$

سپس در حالی که طول موج ثابت است شروع به باریک کردن شکاف می‌کنیم. بدین ترتیب زاویه‌ای که در آن نخستین فریز دیده می شود افزایش می‌یابد. یعنی میزان پراش (پهن شدن پهنای نقش پراش) برای یک شکاف باریک‌تر، بیشتر است.

وقتی پهنای شکاف را به اندازهٔ طول موج کاهش دهیم (یعنی $a=\lambda$)، زاویهٔ نخستین فریزهای تاریک 90° می‌شود. چون نخستین فریزهای تاریک دو لبهٔ فریز روشن مرکزی را مشخص می کنند، این فریز روشن باید کلّ پرده را بپوشاند. با تقسیم شکاف به منطقه‌های بیشتری با پهنای مساوی می توانیم به یافتن محلّ فریزهای تاریک در نقش پراش ادامه دهیم. مثلاً شکل (ب) چگونگی یافتن دومین فریز تاریک را نشان می‌دهد.

همواره می‌توان زوج منطقه‌هایی را انتخاب کرد که این منطقه‌ها (و موج‌های آنها) جفت هم باشند. می‌توان دریافت که فریزهای تاریک بالا و پایین محور مرکزی در مکان‌هایی واقع‌اند که در حالت کلی با معادلهٔ $a\sin\theta=m\lambda$ به ازای $m=1,2,3,\ldots$ داده می‌شود.



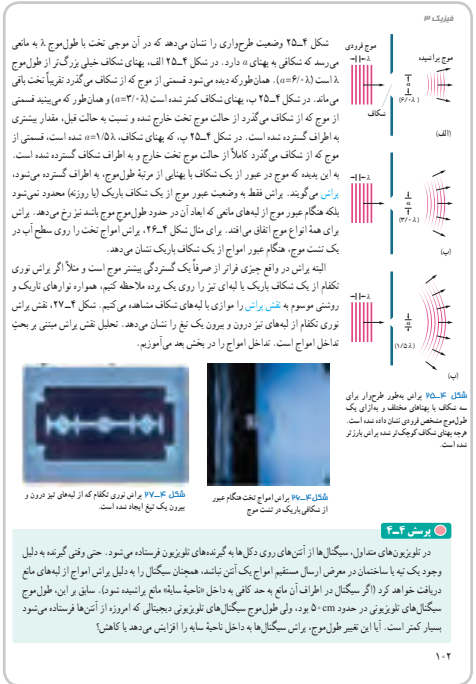
(ب)

فیلم

در این فیلم، به زیبایی پراش برای موج‌های آب و نور را مشاهده می‌کنید.

فیلم

در این فیلم، ایجاد نوارهای تاریک و روشن موسوم به *نقش پراش* را می‌بینید.


فیزیک ۳

شکل ۴ـ۲۵ وضعیت طرح‌واری را نشان می‌دهد که در آن موجی تخت با طول‌موج λ به مانعی می‌رسد که شکافی به پهنای a دارد. در شکل ۴ـ۲۵ الف، پهنای شکاف خیلی بزرگ‌تر از طول‌موج λ است ($a=60\lambda$). همان‌طور که دیده می‌شود قسمتی از موج که از شکاف می‌گذرد تقریباً تخت باقی می‌ماند. در شکل ۴ـ۲۵ ب، پهنای شکاف کمتر شده است ($a=30\lambda$) و همان‌طور که می‌بینید قسمتی از موج که از شکاف می‌گذرد از حالت موج تخت خارج شده و نسبت به حالت قبل، مقدار بیشتری به اطراف گسترده شده است. در شکل ۴ـ۲۵ پ، که پهنای شکاف، $a=1/5\lambda$ شده است، قسمتی از موج که از شکاف می‌گذرد کاملاً از حالت موج تخت خارج و به اطراف شکاف گسترده شده است. به این پدیده که موج در عبور از یک شکاف یا پهنایی از مرتبهٔ طول‌موج، به اطراف گسترده می‌شود، پراش می‌گویند. پراش فقط به وضعیت عبور موج از یک شکاف باریک (یا روزنه) محدود نمی‌شود بلکه هنگام عبور موج از لبه‌های مانعی که ابعاد آن در حدود طول‌موج موج باشد نیز رخ می‌دهد. پراش برای همهٔ انواع موج اتفاق می‌افتد. برای مثال شکل ۴ـ۲۶، پراش امواج تخت را روی سطح آب در یک تشت موج، هنگام عبور امواج از یک شکاف باریک نشان می‌دهد.

البته پراش در واقع چیزی فراتر از صرفاً یک گستردگی بیشتر موج است و مثلاً اگر پراش توری تکفام از یک شکاف باریک یا لبه‌ای تیز را روی یک پرده ملاحظه کنیم، همواره نوارهای تاریک و روشنی موسوم به نقش پراش را موازی با لبه‌های شکاف مشاهده می‌کنیم. شکل ۴ـ۲۷، نقش پراش توری تکفام از لبه‌های تیز درون و بیرون یک تیغ را نشان می‌دهد. تحلیل نقش پراش مبتنی بر بحث تداخل امواج است. تداخل امواج را در بخش بعد می‌آموزیم.

شکل ۴ـ۲۵ پراش به‌طور طرح‌وار برای سه شکاف با پهنای مختلف و به‌ازای یک طول‌موج مشخص فرودی نشان داده شده است. هرچه پهنای شکاف کوچک‌تر شده پراش بارزتر شده است.

شکل ۴ـ۲۶ پراش امواج تخت هنگام عبور از شکافی باریک در تشت موج

شکل ۴ـ۲۷ پراش توری تکفام که از لبه‌های تیز درون و بیرون یک تیغ ایجاد شده است.

پرسش ۴ـ۴

در تلویزیون‌های متداول، سیگنال‌ها از آنتن‌های روی دکل‌ها به گیرنده‌های تلویزیون فرستاده می‌شود. حتی وقتی گیرنده به دلیل وجود یک تپه یا ساختمان در معرض ارسال مستقیم امواج یک آنتن نباشد، همچنان سیگنال را به دلیل پراش امواج از لبه‌های مانع دریافت خواهد کرد (اگر سیگنال در اطراف آن مانع به حد کافی به داخل «ناحیهٔ سایهٔ» مانع پراشیده شود). سابق بر این، طول‌موج سیگنال‌های تلویزیونی در حدود $50\ cm$ بود، ولی طول‌موج سیگنال‌های تلویزیونی دیجیتالی که امروزه از آنتن‌ها فرستاده می‌شود بسیار کمتر است. آیا این تغییر طول‌موج، پراش سیگنال‌ها به داخل ناحیهٔ سایه را افزایش می‌دهد یا کاهش؟

۱۰۲

پاسخ پرسش ۴ـ۴

هرگاه اندازهٔ ابعاد مانع در مقایسه با طول موج، بزرگ باشد ناحیهٔ سایهٔ واضحی تشکیل می‌شود و هرچه مانع در مقایسه با طول موج کوچک‌تر باشد اندازهٔ ناحیهٔ سایه کوچک‌تر می شود تا اینکه عملاً سایه ناپدید گردد. بنابراین برای مانعی با ابعاد مشخص، هرچه طول موج تابیده کوچک‌تر باشد عملاً به این معنی است که اندازهٔ مانع در مقایسه با طول موج بزرگ‌تر می‌شود و به عبارتی ناحیهٔ سایه بزرگ‌تر می‌شود. پس برای سیگنال‌های تلویزیونی دیجیتال که طول موج آنها بسیار کمتر از طول موج سیگنال‌های تلویزیونی قدیمی است، ناحیهٔ سایه بزرگ‌تر است و به عبارتی دور زدن موج در اطراف مانع دشوارتر خواهد بود.

دانستنی برای معلم

شناورها

شناورها[۱] یک نمونهٔ آشنا از پدیدهٔ پراش هستند که ممکن است هنگام نگاه کردن به آسمان صاف آبی متوجه آنها بشوید. این نقش‌ها که مانند خال‌های ریز و ساختارهایی مومانند هستند ناشی از خرده‌های ریزی در مایع زجاجیهٔ چشم هستند که با گذشت عمر و کم شدن یکنواختی مایع زجاجیه، بر میزان آنها افزوده می‌شود. در واقع آنچه شما هنگام دیدن یک شناور می‌بینید، ناشی از پراش نور از لبهٔ این خرده‌ها و تشکیل یک نقش پراشی بر روی شبکیه است. این نقش از نوارهای تاریک و روشنی تشکیل شده است. اگر بی‌نظمی‌های زجاجیه تقریباً دایره‌ای باشند، نقش حاصل نیز دایره‌ای با یک نقطهٔ مرکزی روشن خواهد بود. یک بی‌نظمی کشیده، نقش پراشی کشیده‌ای را ایجاد می‌کند. شناورها به این دلیل ایجاد می‌شوند که زجاجیه صُلب نیست و می‌تواند جابه‌جا شود. برخی از شناورها ناشی از تکه‌های سفت‌شده‌ای از زجاجیه هستند. همچنین آنها می‌توانند ناشی از گویچه‌هایی باشند که در این مایع رخنه کرده‌اند، شناورها را همه دارند و حضور آنها نشانهٔ بیماری نیست، ولی با پیر شدن بر شمار آنها افزوده می‌شود.

دانستنی برای معلم

لکهٔ روشن فرنل

نظریهٔ موجی نور توضیح ساده‌ای برای پدیدهٔ پراش ارائه می‌کند. ولی این نظریه که در اواخر سال‌های ۱۶۰۰ میلادی توسط هویگنس ارائه شد و ۱۲۳ سال بعد توسط *یانگ* برای توضیح تداخل دوشکافی به کار برده شد، به‌کندی مورد پذیرش قرار گرفت، عمدتاً به این دلیل که در مغایرت با نظریهٔ نیوتون بود که نور را جریانی از ذرات می‌پنداشت.

در سال ۱۸۱۸، *آگوستین جان فرنل*[۲] یک مدل موجی نور را برای مسابقه‌ای در *آکادمی علوم فرانسه*[۳] ارائه داد. *سایمون دی . پوآسون*[۴]، یکی از اعضای کمیتهٔ داوری، شدیداً با این مدل به مخالفت برخاست و سعی کرد آن را با این آزمایش فکری، نامعقول جلوه دهد : اگر یک جسم کدر با سطح مقطع دایره‌ای (مثل یک سکه یا یک گوی) توسط باریکه‌ای از نور روشن شود، مدل موجی فرنل پیش‌بینی می‌کند که باید نقطه‌ای روشن در مرکز سایه‌ای که آن جسم بر روی یک پرده در فاصله‌ای دور می‌اندازد، ظاهر شود.

دومنیک اف. آراگو، عضو دیگر کمیته، ترتیبی داد که به رغم این نتیجهٔ نامعقول پیش‌بینی فرنل را امتحان کند. او، در کمال تعجب، آن نقطهٔ مرکزی روشن را یافت. از عجایب تاریخ آنکه، این نقطه اکنون به عنوان *نقطه‌ای پوآسون* یا نقطهٔ *آراگو* شناخته می‌شود، هرچند که هیچ یک از آن دو در ابتدا اعتقادی به وجود آن نداشتند.

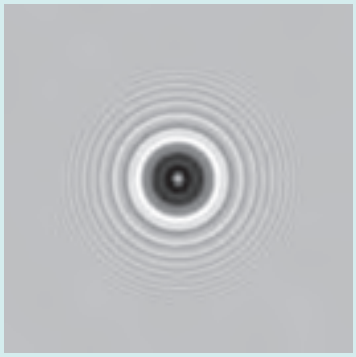
از زمان کشف این نقطه، پژوهشگرانِ بسیاری اشیا کدری مثل ساچمهٔ یک یاتاقان را به کار گرفته‌اند تا به عنوان یک عدسی برای ایجاد تصویر عمل کنند. اگر این تصویر بر روی فیلم شکل گیرد، شما می‌توانید درست مثل یک دوربین، عکسی از آن تهیه کنید.

۱ــ floaters

۲ــ Augustin Jean Fresnel

۳ــ French Academy

۴ــ Simeon D. Poisson



چرا نقطهٔ پوآسون شکل می‌گیرد؟ و چگونه جسمی مثل یک گوی فلزی می‌تواند نور را به ایجاد یک تصویر وادارد؟

فرض کنید چشمهٔ نور، نقطه‌ای روشن در فاصله‌ای دور است و تصویر توسط یک گوی صلب ایجاد می‌شود. وقتی امواج نوری به گوی می‌رسند، از اطراف آن پراشیده می‌شوند و به طور شعاعی به سمت بیرون و نیز به درون ناحیهٔ سایهٔ گوی پخش می‌شوند. اگر پرده‌ای کاملاً در پشت گوی قرار گیرد، نور نقش پراش کوچکی از دایره‌های هم‌مرکزِ تاریک و روشن را بر روی آن شکل می‌دهد. مرکز این نقش، نقطه‌ای روشن است، زیرا امواج عبوری از یک سمت گوی همان مسافتی را تا مرکز پرده طی می‌کنند که امواج عبوری از سمت مقابلِ آن طی می‌کنند و بنابراین، این امواج به طور هم‌فاز به یکدیگر می‌رسند و تداخل سازنده می‌کنند.

نخستین دایرهٔ تاریک، ناشی از تداخل ویرانگر است. بالای این دایره را در نظر بگیرید. امواج عبوری از پایین گوی باید مسافت بیشتری را نسبت به امواج عبوری از بالای گوی طی کنند تا به آن نقطه برسند. این مسافتِ اضافی برابر با نصف یک طول موج است و بنابراین این دو دسته موج (یکی از پایین و یکی از بالا) وقتی به نقطه‌ای روی پرده می‌رسند، تداخل ویرانگر می‌کنند.

بقیهٔ این نقش نیز ناشی از تداخل سازنده و ویرانگر مشابهی است. در بعضی جاها، فاصلهٔ طی‌شده توسط امواجی که از طرف‌های مقابلِ هم می‌آیند به اندازهٔ مضرب صحیحی از یک طول موج تفاوت دارند، که این به تداخل سازنده می‌انجامد، زیرا امواج را هم‌فاز می‌کند. در جاهای دیگر، تفاوت مسافت طی شده، برابر با مضرب فردی از نصف یک طول موج است، که این به تداخل ویرانگر می‌انجامد، زیرا امواج را ناهم‌فاز می‌کند.

وقتی یک گوی تصویری از یک جسم را به وجود می‌آورد، هر بخش روشنِ آن جسم به عنوان یک چشمهٔ نور نقطه‌ای عمل می‌کند و نقطه‌ای نسبتاً روشن را در نزدیکی مرکز نقش پراش ایجاد می‌کند. ترکیب این نقاط روشن، تقریباً شکل آن جسم را دوباره می‌سازد و بنابراین تصویری از جسم به وجود می‌آورد.

فیلم

در این فیلم، نمایشی از پراش فرنل را می‌بینید.

پرسش پیشنهادی

چرا امواج برنامه‌های تلویزیونی برخلاف امواج رادیویی به‌طور مستقیم پخش می‌شوند؟

پاسخ: ایستگاه‌های تلویزیونی در طول موج‌های کمتری از امواج رادیویی کار می‌کنند. برای چنین امواجی یون‌سپهر شفاف است و امواج را مانند امواج رادیویی بازنمی‌گرداند. بنابراین نمی‌توان آنها را مانند امواج رادیویی منتشر کرد. با توجه به بلند بودن طول‌موجِ این امواج، آنها را کلاً به‌طور مستقیم انتشار می‌دهند، زیرا از موانعی مانند خانه‌ها و... چندان پراشیده نمی‌گردند. البته همان‌طور که در پرسش ۴ــ۴ مطرح شده است، طول‌موج سیگنال تلویزیون‌های دیجیتال کمتر است و این به پراشیدگی بیشتری می‌انجامد.

۱ــ Dominique F. Arago

در اینجا نیز خوب است توجه دهید که تداخل در ریسمان برای تداخل در یک بُعد، تداخل امواج سطحی برای تداخل در دوبعد، تداخل امواج صوتی، و تداخل امواج نوری به عنوان تداخل در سه بُعد بررسی می‌شوند.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

۴ـ۴ تداخل امواج

وقتی در تالاری به نوای موسیقی گوش می‌دهید، امواج صوتی حاصل از سازهای مختلف به‌طور هم‌زمان به گوشتان می‌رسد. الکترون‌ها در آنتن گیرنده‌های رادیو و تلویزیون تحت تأثیر هم‌زمان امواج الکترومغناطیسی زیادی که از فرستنده‌های مختلف ارسال می‌شوند، به حرکت می‌افتند. آب یک دریاچه یا بندرگاه ممکن است بر اثر تأثیر هم‌زمان موج‌هایی که به دنبال تعداد زیادی قایق در حال حرکت به‌راه می‌افتند، متلاطم شود. اینها همگی نمونه‌هایی از اصل برهم‌نهی امواج هستند که بیان می‌دارد وقتی چندین موج به‌طور هم‌زمان بر ناحیه‌ای از فضا تأثیر بگذارند، اثر خالص آنها برابر مجموع اثرهای مجزای هر یک از آنها است.

شکل ۴ـ۲۸، عکس‌های دو تب را که در جهت‌های مخالف هم در یک ریسمان کشیده شده حرکت می‌کنند در چند لحظهٔ متوالی نشان می‌دهد. وقتی این تب‌ها به هم می‌رسند و با یکدیگر همپوشانی می‌کنند، بنا بر اصل برهم‌نهی، تب برایند یا مجموع دو تب برابر است. توجه کنید چه برای تب‌ها و چه برای موج‌هایی که همپوشانی می‌کنند، آنها به هیچ وجه شکل و حرکت یکدیگر را تغییر نمی‌دهند، و بنابراین پس از همپوشانی، بدون هرگونه تغییر شکلی به حرکت خود ادامه می‌دهند. به ترکیب موج‌ها با یکدیگر، تداخل می‌گویند. به بیان دیگر تداخل، ترکیب دو یا چند موج است که هم‌زمان از یک منطقه عبور می‌کنند. در شکل ۴ـ ۲۸ الف، تب‌ها هنگام همپوشانی تب بزرگ‌تری را ایجاد کرده‌اند که به آن تداخل سازنده می‌گویند، در حالی که در شکل ۴ـ۲۸ ب، تب‌ها هنگام همپوشانی اثر یکدیگر را حذف کرده‌اند که به آن تداخل ویرانگر می‌گویند. تداخل‌های سازنده و ویرانگر برای موج‌ها نیز همچون تب‌ها رخ می‌دهد که آن را در قسمت‌های بعدی بررسی خواهیم کرد.

شکل ۴ـ۲۸ دو تب پیش‌رونده، در جهت‌های مخالف هم در طول یک ریسمان کشیده که با یکدیگر الف) تداخل سازنده و ب) تداخل ویرانگر انجام می‌دهند

(ب) (الف)

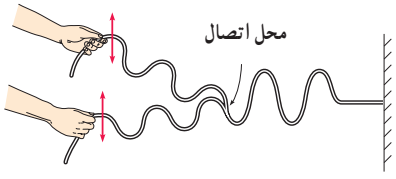
تداخل امواج سطحی آب. برای مشاهدهٔ تداخل امواج سطحی بر سطح آب، دو گوی کوچک را با بسامد یکسان، به‌طور هم‌زمان بر سطح آب به نوسان درمی‌آوریم. دو دسته موج دایره‌ای ایجاد می‌شود که بی‌آنکه بر انتشار یکدیگر تأثیر بگذارند با یکدیگر همپوشانی می‌کنند و نقشی مانند نقش شکل ۴ـ۲۹ را بر سطح آب به‌وجود می‌آورند. امواج در برخی نقاط همدیگر را تقویت می‌کنند و تداخل سازنده انجام می‌دهند و در برخی نقاط همدیگر را تضعیف می‌کنند و تداخل ویرانگر انجام می‌دهند. به عبارتی، برآمدگی‌ها یا فرورفتگی‌های دو موج که در یک زمان در نقطه‌ای به همدیگر برسند، سطح آب را در آن نقطه به‌ندت بالا یا پایین می‌برند، در

شکل ۴ـ۲۹ تداخل امواج دایره‌ای بر سطح آب یک تشت موج. هرگاه فاصلهٔ دو گوی از هم از طول‌موج بزرگ‌تر باشد چنین نقشی ایجاد می‌شود.

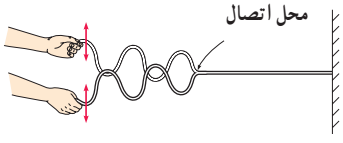
خوب است در اینجا این مفاهیم را برای امواج، با ایجاد دو موج سینوسی در دو ریسمان نیز بررسی کنید.

فرض کنید دو موج سینوسی با طول موج و دامنهٔ یکسان را مطابق شکل الف در دو ریسمان که در نقطه‌ای به ریسمان سومی وصل شده‌اند، روانه کنیم. توجه کنید ریسمان‌ها از هر لحاظ مشابه یکدیگرند و جرم واحد طول آنها با هم برابر است. روش آزمایش به این ترتیب است که یکی از ریسمان‌ها را در دست چپ خود و دیگری را در دست راست خود بگیرید و آنها را مطابق شکل به‌طور همگام به نوسان درآورید؛ یعنی آنها را به شیوهٔ یکسانی بالا و پایین ببرید، به‌طوری‌که امواج تولید شده در هر دو ریسمان کاملاً مشابه هم باشند.

وقتی این دو موج به محل اتصال ریسمان‌ها برسند، مشاهده خواهیم کرد که موجی با همان طول موج ولی با دامنه‌ای دو برابر بزرگ‌تر در ریسمان سوم ایجاد می‌شود. در واقع آنچه رخ می‌دهد آن است که قله‌های دو موج اولیه و نیز درّه‌های آنها در ریسمان سوم بر یکدیگر منطبق می‌شوند و اصطلاحاً می‌گوییم این دو موج با یکدیگر ***هم‌فاز*** بوده‌اند. به این نوع تداخل، **تداخل کاملاً سازنده** می‌گویند. حال اگر دو ریسمان را مانند شکل ب طوری حرکت دهیم که در حالی که یکی روبه بالا می‌رود دیگری روبه پایین برود، اصطلاحاً می‌گوییم موج‌هایی ***کاملاً ناهم‌فاز*** نسبت به یکدیگر ایجاد شده‌اند. و اگر این دو موج دامنهٔ یکسانی داشته باشند، اصل بر هم‌نهی پیش‌بینی می‌کند که وقتی این دو موج به محل اتصال برسند، اثر همدیگر را خنثی می‌کنند و جابه‌جایی خالص صفر می‌شود. در واقع آنچه رخ می‌دهد آن است که در ریسمان سوم قله‌های یک موج درست بر دره‌های موج دیگر منطبق می‌شود. به این نوع تداخل، **تداخل کاملاً ویرانگر** می‌گویند.

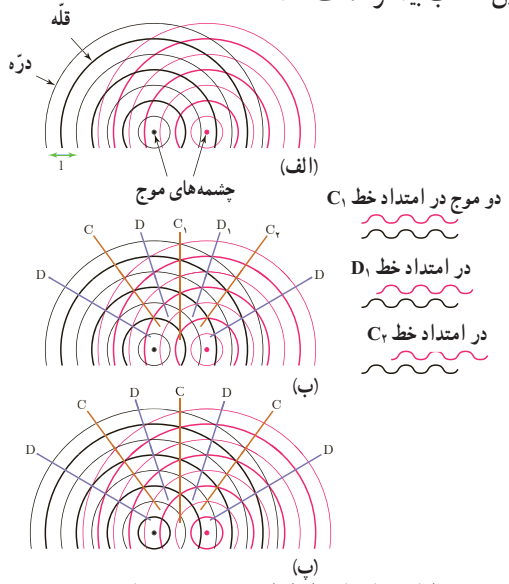


الف) دو موج که به‌طور هم‌فاز در دو ریسمان یکسان ایجاد شده‌اند، با رسیدن به ریسمان سومی با جرم واحد طول مشابه، موجی بزرگ‌تر در این ریسمان ایجاد کرده‌اند.



ب) دو موج که به طور کاملاً ناهم‌فاز در دو ریسمان مشابه ایجاد شده‌اند، هیچ جابه‌جایی در ریسمان مشابه دیگری که به آنها متصل شده است، ایجاد نمی‌کنند.

رسم شکل‌هایی مانند شکل‌های زیر می‌تواند دانش‌آموزان را در تفهیم این مطالب بیشتر کمک کند.



برای رسیدن به هر نقطه‌ای در امتداد خطوطی که با C مشخص شده‌اند قله‌ها بر هم و دره‌ها بر یکدیگر منطبق می‌شوند، در حالی که در امتداد خطوطی که با D مشخص شده‌اند قله‌ها بر دره‌ها و بالعکس قرار می‌گیرند.

در این فیلم، طرحی از تداخل انواع دایره‌ای را می‌بینید.

فیلم

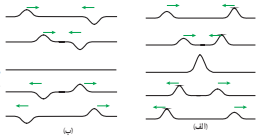
در این فیلم تداخل امواج سطحی آب را می‌بینید.

فیلم

۴ـ۴ تداخل امواج

وقتی در تالاری به نوای موسیقی گوش می‌دهید، امواج صوتی حاصل از سازهای مختلف به‌طور هم‌زمان به گوشتان می‌رسند. الکترون‌ها در آنتن گیرنده‌های رادیو و تلویزیون تحت تأثیر هم‌زمان امواج الکترومغناطیسی زیادی که از فرستنده‌های مختلف ارسال می‌شوند، به حرکت می‌افتند. آب یک دریاچه یا بندرگاه ممکن است بر اثر تأثیر هم‌زمان موج‌هایی که به دنبال تعداد زیادی قایق در حال حرکت پدراه می‌افتند، متلاطم شود. اینها همگی نمونه‌هایی از اصل برهم‌نهی امواج هستند که بیان می‌دارد وقتی چندین موج به‌طور هم‌زمان بر ناحیه‌ای از فضا تأثیر بگذارند، اثر خالص آنها برابر مجموع اثرهای مجزای هر یک از آنها است.

شکل ۴ـ۲۸، عکس‌های دو تب را که در جهت‌های مخالف هم در یک ریسمان کشیده شده حرکت می‌کنند در چند لحظهٔ متوالی نشان می‌دهد. وقتی این تب‌ها به هم می‌رسند و با یکدیگر همپوشانی می‌کنند، بنا بر اصل برهم‌نهی، تب برایند به وجود می‌آید. توجه کنید چه برای تب‌ها و چه برای موج‌هایی که همپوشانی می‌کنند، آنها به هیچ وجه شکل و حرکت یکدیگر را تغییر نمی‌دهند، و بنابراین پس از همپوشانی، بدون هرگونه تغییر شکلی به حرکت خود ادامه می‌دهند. به ترکیب موج‌ها با یکدیگر، تداخل می‌گویند. به بیان دیگر تداخل، ترکیب دو یا چند موج است که هم‌زمان از یک منطقه عبور می‌کنند. در شکل ۴ـ۲۸ الف، تب‌ها هنگام همپوشانی از یکدیگر را حذف کرده‌اند که به آن تداخل ویرانگر می‌گویند. تداخل‌های سازنده و ویرانگر برای موج‌ها نیز همچون تب‌ها رخ می‌دهد که آن را در قسمت‌های بعدی بررسی خواهیم کرد.

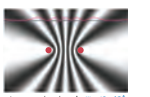


شکل ۴ـ۲۸ در تب پیش‌رونده در جهت‌های مخالف هم در طول یک ریسمان کشیده که با یکدیگر (الف) تداخل سازنده و (ب) تداخل ویرانگر انجام می‌دهند.

تداخل امواج سطحی آب: برای مشاهدهٔ تداخل امواج سطحی بر سطح آب، دو گوی کوچک را با بسامد یکسان، به‌طور هم‌زمان بر سطح آب به نوسان درمی‌آوریم. دو دسته موج دایره‌ای ایجاد می‌شود که می‌آنکه بر انتشار یکدیگر تأثیر بگذارند با یکدیگر همپوشانی می‌کنند و نقشی مانند نقش شکل ۴ـ۲۹ را بر سطح آب به‌وجود می‌آورند. امواج در برخی نقاط همدیگر را تقویت می‌کنند و تداخل سازنده انجام می‌دهند و در برخی نقاط همدیگر را تضعیف می‌کنند و تداخل ویرانگر انجام می‌دهند. به عبارتی، برآمدگی‌ها با فرورفتگی‌های دو موج که در یک زمان در نقطه‌ای به همدیگر برسند، سطح آب را در آن نقطه به‌شدت بالا یا پایین می‌برند، در

شکل ۴ـ۲۹ تداخل امواج دایره‌ای بر سطح آب. یک تشت موج. هرگاه فاصلهٔ دو گوی از هم از طول‌موج بزرگ‌تر باشد چنین نقشی ایجاد می‌شود.

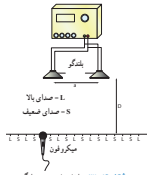
توجه کنید در این آزمایش از میکروفون به این دلیل استفاده کردیم که تمایز بین صداهای کم و زیاد را با وضوح بیشتری حس کنیم، وگرنه این آزمایش بدون استفاده از میکروفون، صرفاً با شنیدن نیز قابل انجام است. همچنین در توضیح آنچه رخ داده است، می‌توانید دانش‌آموزان را به تداخل امواج سطحی ارجاع دهید. مانند آنجا، وقتی موج‌های هم‌بسامد (و در نتیجه هم‌طول‌موج) به طور هم‌زمان ایجاد شوند، بر اثر تداخل این امواج، بسته به آنکه تداخل کاملاً سازنده یا کاملاً ویرانگر باشد، مکان‌هایی یافت می‌شود که در آنها دامنهٔ موج برانید وبه عبارتی بلندی صوت بیشینه یا کمینه باشد. این نقاط در شکل ۴ـ۳۱ به ترتیب با حروف L (سرواژهٔ Loud sound به معنی صدای بلند) و حرف S (سرواژهٔ Soft sound به معنی صدای ضعیف) نشان داده شده است. که یک در میان ظاهر می‌شوند. این آزمایش همچنین مدخلی مناسب برای بحث تداخل امواج نوری از دو شکاف باریک است.



شکل ۴ـ۳۰ طرحی از نواحی بیشینه‌ها و کمینه‌های یک نقش تداخل حاصل از امواج سطحی آب. نمودار، این‌رنگ، دامنهٔ موج برایند است که همان‌طور که می‌بینید در نواحی با تداخل سازنده (نواحی کاملاً روشن) بیشینه و در نواحی با تداخل ویرانگر (نواحی کاملاً تیره) کمینه است.

حالی که اگر برآمدگی یک موج در یک زمان و در یک نقطه به فرورفتگی موج دیگر برسد، دو موج یکدیگر را تضعیف می‌کنند و بنابراین سطح آب در چنین نقطه‌ای نوسان چندانی نخواهد داشت. به این ترتیب، در برخی نواحی روی سطح آب دامنهٔ موج برایند بیشینه و در برخی ناحیه‌ها، کمینه است. چنین نقش متناوب یک‌درمیانی از بیشینه‌ها و کمینه‌ها را نقش تداخلی امواج سطحی آب می‌نامیم و آنها را به‌وضوح می‌توانیم در سایهٔ تشکیل شده بر سطح ورقهٔ کاغذ زیر تشت موج مشاهده کنیم (شکل ۴ـ۳۰).

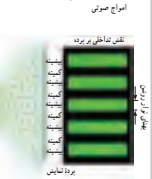
تداخل امواج صوتی: امواج صوتی نیز می‌توانند تداخل کنند. به این منظور، آزمایش نشان داده شده در شکل ۴ـ۳۱ را در نظر بگیرید. در این آزمایش دو بلندگو که به یک مولّد سیگنال الکتریکی متصل‌اند امواج سینوسی هم‌بسامدی را در فضا منتشر می‌کنند. با حرکت دادن میکروفون در امتداد خط فرضی نشان داده شده در شکل که در فاصلهٔ مناسبی از بلندگوها قرار دارد درمی‌یابیم که بلندی صدا به‌طور متناوب کم و زیاد می‌شود. علت این پدیده را به‌سادگی می‌توان براساس تداخل‌های سازنده و ویرانگر امواج صوتی توضیح داد. (چگونه؟)



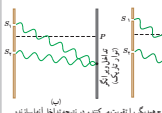
شکل ۴ـ۳۱ تداخل سازنده و ویرانگر امواج صوتی

تداخل امواج نوری: در سال ۱۸۰۱ میلادی توماس یانگ (۱۸۲۹ـ۱۷۷۳ م.) دانشمند انگلیسی به‌طور تجربی ثابت کرد نور یک موج است که این بر خلاف نظر بیشتر فیزیک‌دانان آن زمان بود. در واقع او نشان داد که نور نیز مانند موج‌های سطحی آب، موج‌های صوتی و همهٔ انواع موج‌های دیگر تداخل می‌کند.

شکل ۴ـ۳۲، طرحی از چگونگی آزمایش اولیهٔ یانگ برای تحقیق تداخل امواج نوری را نشان می‌دهد. نور حاصل از یک چشمهٔ تکفام (اینجا سبزرنگ) بر تک‌شکافی می‌تابد. سپس نور خروجی بر اثر پراش، گسترده می‌شود و دو شکاف S_1 و S_2 را روشن می‌کند. موج‌های حاصل از پراش نور توسط این دو شکاف با یکدیگر تداخل می‌کنند و نقش حاصل از این تداخل را می‌توان روی پرده‌ای که در ناحیهٔ سمت راست دو شکاف قرار دارد مشاهده کرد. روی پرده، نقطه‌های با تداخل سازنده، نوارها یا فریزهای[1] روشن را تشکیل می‌دهند (شکل ۴ـ۳۳ الف)، و نقطه‌های با تداخل ویرانگر نوارها یا فریزهای تاریک را تشکیل می‌دهند (شکل ۴ـ۳۳ ب) که می‌توان آنها را بین نوارهای روشن مجاور شکل ۴ـ۳۲ مشاهده کرد. نقش



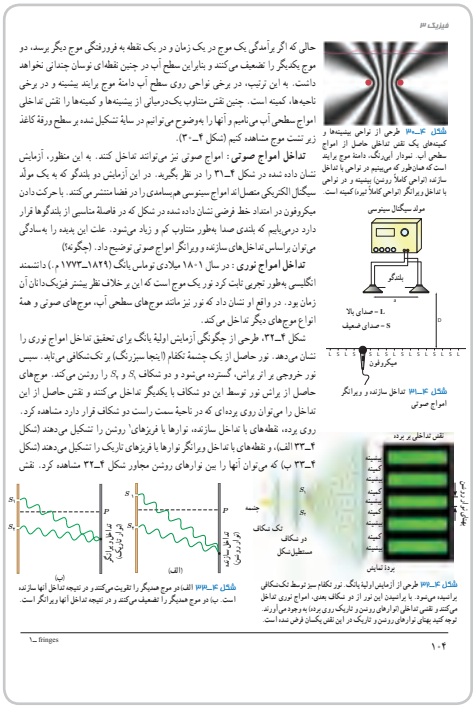
شکل ۴ـ۳۲ طرحی از آزمایش اولیهٔ یانگ. نور تکفام سبز توسط تک‌شکافی پراشیده می‌شود. با برآمدن این نور از دو شکاف بعدی، امواج نوری تداخل می‌کنند و نقشی تداخلی (نوارهای روشن و تاریک روی پرده) به وجود می‌آورند. توجه کنید پهنای نوارهای روشن و تاریک در این نقش یکسان فرض نشده است.



شکل ۴ـ۳۳ (الف) دو موج همدیگر را تقویت می‌کنند و در نتیجه تداخل آنها سازنده است. (ب) دو موج همدیگر را تضعیف می‌کنند و در نتیجه تداخل آنها ویرانگر است.

۱ـ fringes

توجه دهید تداخل امواج صوتی در یک بُعد نیز صورت می‌گیرد که آن را در مبحث لوله‌های صوتی بررسی خواهیم کرد.



فیزیک ۳

شکل ۴ـ۳۰ طرحی از نوارهای پیشینه‌ها و کمینه‌های یک نقش تداخلی حاصل از امواج سطحی آب. نمودار آبی‌رنگ، دامنهٔ موج برایند است که همان‌طور که می‌بینیم در نواحی با تداخل سازنده، (نواحی کاملاً روشن) پیشینه و در نواحی با تداخل ویرانگر (نواحی کاملاً تیره) کمینه است.

حالی که اگر برآمدگی یک موج در یک زمان و در یک نقطه به فرورفتگی موج دیگر برسد، دو موج یکدیگر را تضعیف می‌کنند و بنابراین سطح آب در چنین نقطه‌ای نوسان چندانی نخواهد داشت. به این ترتیب، در برخی نواحی روی سطح آب دامنهٔ موج برایند پیشینه و در برخی ناحیه‌ها، کمینه است. چنین نقش متناوب یک‌درمیانی از پیشینه‌ها و کمینه‌ها را نقش تداخلی امواج سطحی آب می‌نامیم و آنها را به‌وضوح می‌توانیم در سایهٔ تشکیل شده بر سطح ورقهٔ کاغذ زیر تشت موج مشاهده کنیم (شکل ۴ـ۳۰).

تداخل امواج صوتی: امواج صوتی نیز می‌توانند تداخل کنند. به این منظور، آزمایش نشان داده شده در شکل ۴ـ۳۱ را در نظر بگیرید. در این آزمایش دو بلندگو که به یک مولد سیگنال الکتریکی متصل‌اند امواج سینوسی هم‌بسامدی را در فضا منتشر می‌کنند. با حرکت دادن میکروفون در امتداد خط فرضی نشان داده شده در شکل که در فاصلهٔ مناسبی از بلندگوها قرار دارد درمی‌یابیم که بلندی صدا به‌طور متناوب کم و زیاد می‌شود. علت این پدیده را به‌سادگی می‌توان براساس تداخل‌های سازنده و ویرانگر امواج صوتی توضیح داد. (چگونه؟)

تداخل امواج نوری: در سال ۱۸۰۱ میلادی توماس یانگ (۱۸۲۹ـ۱۷۷۳ م.) دانشمند انگلیسی به‌طور تجربی ثابت کرد نور یک موج است که این بر خلاف نظر بیشتر فیزیک‌دانان آن زمان بود. در واقع او نشان داد که نور نیز مانند موج‌های سطحی آب، موج‌های صوتی و همهٔ انواع موج‌های دیگر تداخل می‌کند.

شکل ۴ـ۳۲، طرحی از چگونگی آزمایش اولیهٔ یانگ برای تحقیق تداخل امواج نوری را نشان می‌دهد. نور حاصل از یک چشمهٔ تکفام (اینجا سبزرنگ) بر تک‌شکافی می‌تابد. سپس نور خروجی پر اثر پراش، گسترده می‌شود و دو شکاف S_1 و S_2 را روشن می‌کند. موج‌های حاصل از پراش نور توسط این دو شکاف با یکدیگر تداخل می‌کنند و نقش حاصل از این تداخل را می‌توان روی پرده‌ای که در ناحیهٔ سمت راست دو شکاف قرار دارد مشاهده کرد. روی پرده، نقطه‌های با تداخل سازنده، نوارها یا فریزهای[1] روشن را تشکیل می‌دهند (شکل ۴ـ۳۳ الف)، و نقطه‌های با تداخل ویرانگر نوارها یا فریزهای تاریک را تشکیل می‌دهند (شکل ۴ـ۳۳ ب) که می‌توان آنها را بین نوارهای روشن مجاور شکل ۴ـ۳۲ مشاهده کرد. نقش

شکل ۴ـ۳۱ تداخل سازنده و ویرانگر امواج صوتی

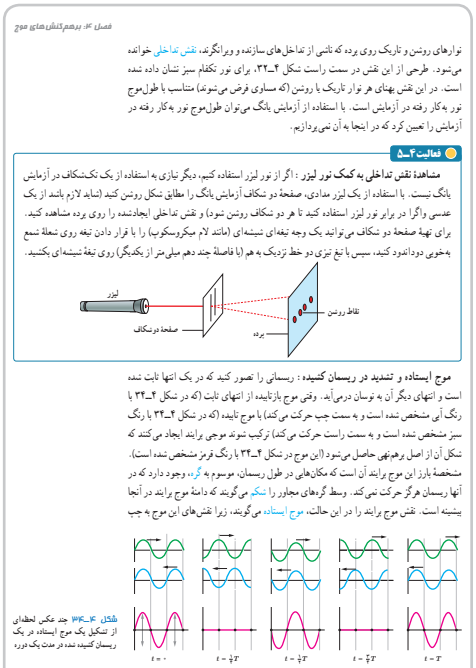
شکل ۴ـ۳۲ طرحی از آزمایش اولیهٔ یانگ. نور تکفام سبز توسط تک‌شکافی پراشیده می‌شود. با پراشیدن این نور از دو شکاف بعدی، امواج نوری تداخل می‌کنند و نقشی تداخلی (نوارهای روشن و تاریک روی پرده) به وجود می‌آورند. توجه کنید بهنای نوارهای روشن و تاریک در این نقش یکسان فرض شده است.

شکل ۴ـ۳۳ الف) در موج همدیگر را تقویت می‌کنند و در نتیجه تداخل آنها سازنده است. ب) دو موج همدیگر را تضعیف می‌کنند و در نتیجه تداخل آنها ویرانگر است.

۱ـ fringes

۱۰۴

در اینجا خوب است دانش‌آموزان علاقه‌مند را به دانستنی «اختلاف طول مسیر و مکان نوارهای تداخلی» ارجاع دهید تا در صورت تمایل تحلیل ریاضی این موارد را دریابند. همچنین دانستنی «رنگ‌های حاصل از تداخل : لایه‌های روغن و جانوران» که در مورد نقش‌های حاصل از فشردن یکی از صفحه‌های دو لایهٔ نازک که بین‌شان هواست کاربرد دارد، می‌تواند برای دانش‌آموزان جالب باشد.



فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

نوارهای روشن و تاریک روی پرده که ناشی از تداخل‌های سازنده و ویرانگرند، نقش تداخلی خوانده می‌شود. طرحی از این نقش در سمت راست شکل ۴ـ۳۲، برای نور تکفام سبز نشان داده شده است. در این نقش بهنای هر نوار تاریک یا روشن (که مساوی فرض می‌شوند) متناسب با طول‌موج نور به‌کار رفته در آزمایش است. با استفاده از آزمایش یانگ می‌توان طول‌موج نور به‌کار رفته در آزمایش را تعیین کرد که در اینجا به آن نمی‌پردازیم.

فعالیت ۴ـ۵

مشاهدهٔ نقش تداخلی به کمک نور لیزر: اگر از نور لیزر استفاده کنیم، دیگر نیازی به استفاده از یک تک‌شکاف در آزمایش یانگ نیست. با استفاده از یک لیزر مدادی، صفحهٔ دو شکاف آزمایش یانگ را مطابق شکل روشن کنید (نباید لازم باشد از یک عدسی واگرا در برابر نور لیزر استفاده کنید تا هر دو شکاف روشن شوند) و نقش تداخلی ایجادشده را روی پرده مشاهده کنید. برای تهیهٔ صفحهٔ دو شکاف می‌توانید یک وجه تیغه‌ای شیشه‌ای (مانند لام میکروسکوپ) را با قرار دادن تیغه روی شعلهٔ شمع به‌خوبی دوده‌اندود کنید، سپس با نخ نیزی دو خط نزدیک به هم (با فاصلهٔ چند دهم میلی‌متر از یکدیگر) روی تیغهٔ شیشه‌ای بکشید.

لیزر
صفحهٔ دو شکاف
نقاط روشن
پرده

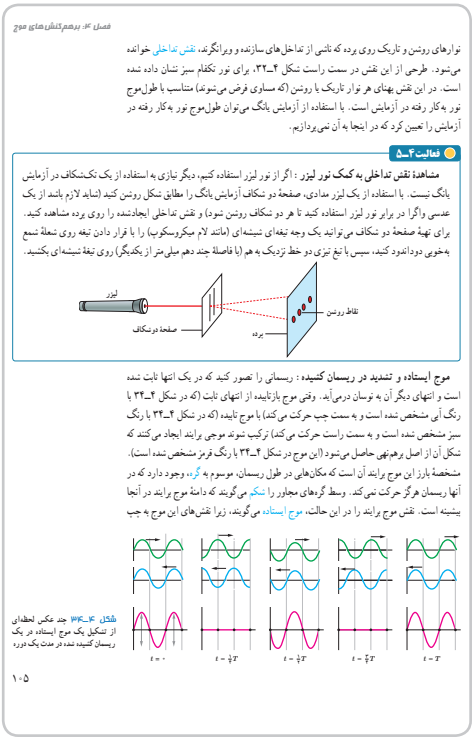
موج ایستاده و تشدید در ریسمان کشیده: ریسمانی را تصور کنید که در یک انتها ثابت شده است و انتهای دیگر آن به نوسان درمی‌آید. وقتی موج بازتابیده از انتهای ثابت (که در شکل ۴ـ۳۴ با رنگ آبی مشخص شده است و به سمت چپ حرکت می‌کند) با موج تابیده (که در شکل ۴ـ۳۴ با رنگ سبز مشخص شده است و به سمت راست حرکت می‌کند) ترکیب شوند موجی برایند ایجاد می‌کنند که شکل آن از اصل برهم‌نهی حاصل می‌شود (این موج در شکل ۴ـ۳۴ با رنگ قرمز مشخص شده است).

منحنیهٔ بارز این موج برایند آن است که مکان‌هایی در طول ریسمان، موسوم به گره، وجود دارد که در آنها ریسمان هرگز حرکت نمی‌کند. وسط گره‌های مجاور را شکم می‌گویند که دامنهٔ موج برایند در آنجا بیشینه است. نقش موج برایند را در این حالت، موج ایستاده می‌گویند، زیرا نقش‌های این موج به جب

شکل ۴ـ۳۴ چند عکس لحظه‌ای از تشکیل یک موج ایستاده در یک ریسمان کشیده شده در مدت یک دوره

$t = 0$ $t = \frac{1}{8}T$ $t = \frac{1}{4}T$ $t = \frac{3}{8}T$ $t = T$

۱۰۵



فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

نوارهای روشن و تاریک روی پرده که ناشی از تداخل‌های سازنده و ویرانگرند، نقش تداخلی خوانده می‌شود. طرحی از این نقش در سمت راست شکل ۴ـ۳۲، برای نور تکفام سبز نشان داده شده است. در این نقش پهنای هر نوار تاریک یا روشن (که مساوی فرض می‌شوند) متناسب با طول‌موج نور به‌کار رفته در آزمایش است. با استفاده از آزمایش یانگ می‌توان طول‌موج نور به‌کار رفته در آزمایش را تعیین کرد که در اینجا به آن نمی‌پردازیم.

فعالیت ۴ـ۵

مشاهدهٔ نقش تداخلی به کمک نور لیزر : اگر از نور لیزر استفاده کنیم، دیگر نیازی به استفاده از یک تک‌شکاف در آزمایش یانگ نیست. با استفاده از یک لیزر مدادی، صفحهٔ دو شکاف آزمایش یانگ را مطابق شکل روشن کنید (شاید لازم باشد از یک عدسی واگرا در برابر نور لیزر استفاده کنید تا هر دو شکاف روشن شود) و نقش تداخلی ایجادشده را روی پرده مشاهده کنید. برای تهیهٔ صفحهٔ دو شکاف می‌توانید یک وجه تیغه‌ای تیغه‌ای (مانند لام میکروسکوپ) را با قرار دادن تیغه روی شعلهٔ شمع به‌خوبی دوده‌دار کنید، سپس با نوک تیزی دو خط نزدیک به هم (با فاصلهٔ چند دهم میلی‌متر از یکدیگر) روی تیغهٔ شیشه‌ای بکشید.

موج ایستاده و تشدید در ریسمان کشیده : ریسمانی را تصور کنید که در یک انتها ثابت شده است و انتهای دیگر آن به نوسان درمی‌آید. وقتی موج بازتابیده از انتهای ثابت (که در شکل ۴ـ۳۴ با رنگ آبی مشخص شده است و به سمت جب حرکت می‌کند) با موج تابیده (که در شکل ۴ـ۳۴ با رنگ سبز مشخص شده است و به سمت راست حرکت می‌کند) ترکیب شوند موجی پدید می‌آید که شکل آن از اصل برهم‌نهی حاصل می‌شود (این موج در شکل ۴ـ۳۴ با رنگ قرمز مشخص شده است). نقطهٔ پارز این موج پدید آن است که مکان‌هایی در طول ریسمان، موسوم به گره، وجود دارد که در آنها ریسمان هرگز حرکت نمی‌کند. وسط گره‌های مجاور را شکم می‌گویند که دامنهٔ موج پدید در آنجا بیشینه است. نقش موج پدید را در این حالت، موج ایستاده می‌گویند، زیرا نقش‌های این موج به جب

شکل ۴ـ۳۴ چند عکس لحظه‌ای از تشکیل یک موج ایستاده در یک ریسمان کشیده شده در مدت یک دوره.

پاسخ فعالیت ۴ـ۵

در مورد این فعالیت موارد زیر را به دانش‌آموزان گوشزد کنید :

۱ از لحاظ ایمنی حتماً مواظب باشید باریکهٔ نور لیزر یا بازتاب آن وارد چشمتان نشود.

۲ پرده در حدود چند متر از صفحهٔ شکاف باشد.

۳ خوب است بدانید با این آزمایش می‌توان طول موج نور لیزر به‌کار رفته را نیز محاسبه کرد. این طول موج از رابطهٔ $\lambda = sd/D$ به‌دست می‌آید که در آن s فاصلهٔ نقطه‌ها است و اگر بر فرض ۹ نقطه داشته باشیم فاصلهٔ دو انتهای نقطه‌ها $8s$ می‌شود که با یک متر می‌توان این فاصله را اندازه گرفت و بر ۸ تقسیم کرد. همچنین d فاصلهٔ شکاف‌ها و D فاصلهٔ صفحهٔ شکاف‌ها تا پرده است.

در این فیلم آزمایش یانگ با نور لیزر را مشاهده می‌کنید.

فیلم

خوب است در اینجا اشاره شود که برای سایر امواج الکترومغناطیسی نیز تداخل رخ می‌دهد و مثلاً فناوری و کاربرد اجاق‌های میکروموج و نیز فعالیت ۴ـ۷ مثال‌هایی از تداخل امواج الکترومغناطیسی هستند. همچنین بررسی فعالیت پیشنهادی «تداخل برای امواج میکروموج» خالی از لطف نیست.

دانستنی معلم

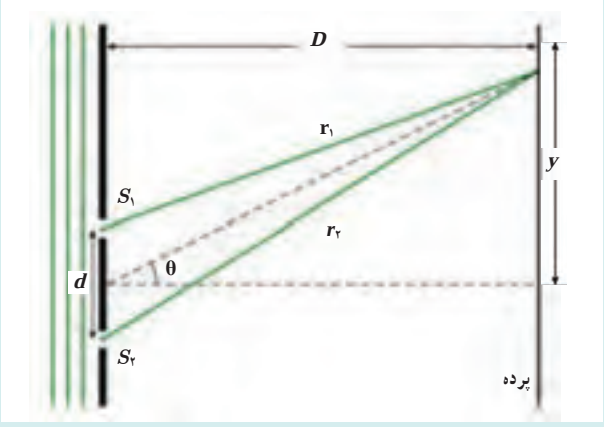
اختلاف طول مسیر و مکان نوارهای تداخلی

دیدیم امواج نوری، نوارهای تداخلی را بر یک پرده ایجاد می‌کنند. اکنون می‌خواهیم بررسی کنیم چگونه می‌توان محل دقیق این نوارها بر پرده را تعیین کید. برای پاسخ به این سؤال از آرایش شکل ۴ـ۳۳ کتاب استفاده می‌کنیم. فرض کنید موج تختی از نوری تک‌فام بر دو شکاف S_1 و S_2 فرود آید. همان‌طور که دیدیم نور در شکاف‌ها پراشیده می‌شود و نقشی تداخلی روی پرده ایجاد می‌کند. یک محور مرکزی را از نقطهٔ وسط بین شکاف تا پرده به عنوان خط مرجع (خط‌چین افقی) رسم می‌کنیم. سپس برای بحث خود، نقطهٔ دلخواه P را روی پرده در نظر می‌گیریم. در این نقطه، پرده موج پرتوی حاصل از شکاف S_1 و موج پرتوی حاصل از شکاف S_2 را قطع می‌کند. این موج‌ها وقتی از دو شکاف می‌گذرند هم‌فازند زیرا در محلّ شکاف‌ها، آنها دقیقاً بخش‌هایی از یک جبههٔ موج هستند. ولی با عبور این موج‌ها از شکاف‌ها، آنها مسیرهای متفاوتی را تا رسیدن به نقطهٔ P طی می‌کنند. اگر دو موج مسیرهایی با طول‌های متفاوت را طی کنند، ممکن است دیگر فازهای آنها در نقطهٔ P برابر نباشد. بنابراین بسته به اختلاف طول

مسیر پرتوها تا نقطهٔ P (که به آن *اختلاف راه* نیز می‌گویند) ممکن است تداخلی سازنده یا ویرانگر در نقطهٔ P ایجاد شود. همچنین نشان داده می‌شود که اگر این اختلاف طول مسیر مضرب درستی از طول موج نور باشد، تداخلی کاملاً سازنده خواهیم داشت و به نوارهای تداخلی روشنی (فریزهای روشن) یا بیشینه‌ها می‌رسیم، و اگر این اختلاف طول مسیر مضرب فردی از نصف طول موج باشد، تداخلی کاملاً ویرانگر خواهیم داشت و به نوارهای تداخلی تاریک (فریزهای تاریک) یا کمینه‌ها می‌رسیم. به عبارتی برای اختلاف راه ΔL داریم

$$\Delta L = m\lambda \ , \ m = ۰, ۱, ۲, \ldots$$ (برای نوارهای تداخلی روشن)

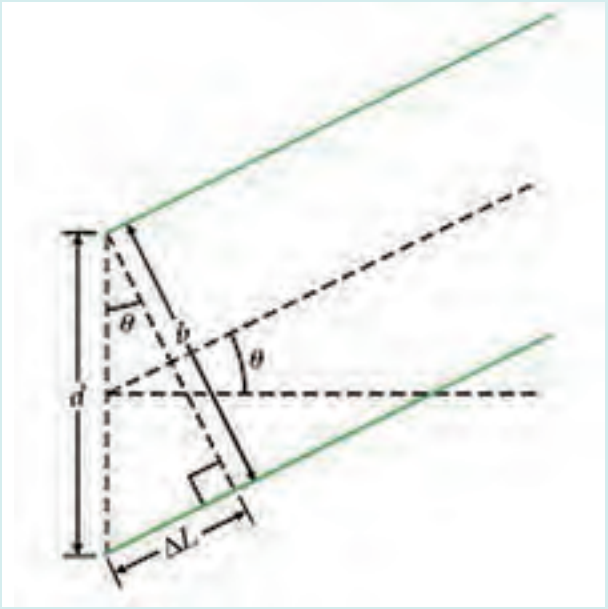
$$\Delta L = (۲m+۱)\frac{\lambda}{۲} \ , \ m = ۰, ۱, ۲, \ldots$$ (برای نوارهای تداخلی تاریک)



شکل ۱ــ موج‌های حاصل از شکاف‌های $S_۱$ و $S_۲$ در نقطهٔ دلخواه P روی پرده در فاصلهٔ y از محور مرکزی ترکیب شده‌اند. با زاویهٔ θ می‌توان مکان P را تعیین کرد.

برای محاسبهٔ ΔL در شکل ۱ (یعنی اختلاف بین طول مسیرهای $S_۱P$ و $S_۲P$) کمانی به مرکز P و به شعاع $PS_۱$ رسم می‌کنیم. این کمان خط $S_۲P$ را در نقطه‌ای قطع می‌کند. آنگاه فاصلهٔ $S_۲$ تا این نقطه همان اختلاف طول مسیر پرتوها است. اما محاسبهٔ این طول دشوار است و برای سادگی محاسبات معمولاً فرض می‌شود که فاصلهٔ Dی شکاف‌ها تا پرده بسیار بزرگ‌تر از فاصلهٔ dی شکاف‌ها از همدیگر است به‌طوری که می‌توانیم تقریباً پرتوهای $r_۱$ و $r_۲$ را موازی در نظر بگیریم (شکل ۲). در این صورت اختلاف طول مسیر پرتوها با رسم عمودی از $S_۱$ بر پرتوی $r_۲$ که در شکل با b نشان داده شده است به دست می‌آید و در نتیجه از مثلث قائم‌الزویهٔ شکل درمی‌یابیم $\Delta L = d\sin\theta$ است که در آن θ زاویهٔ بین محو مرکزی و خطی است که از وسط شکاف‌ها به نقطهٔ P رسم شده است.

بنابراین اکنون معادله‌هایی که برای Δx به دست آوردیم به رابطه‌های زیر می‌انجامد



شکل ۲ــ به ازای D خیلی بزرگ‌تر از d ($D \gg d$) می‌توان پرتوهای r_1 و r_2 را تقریباً موازی در نظر گرفت. در این صورت با توجه به اینکه دو ضلع زاویهٔ θ در مثلث قائم‌الزاویهٔ شکل عمود بر دو ضلع زاویهٔ θ در شکل ۱ است، این دو زاویه با هم برابرند.

$$d\sin\theta = m\lambda \ , \ m = ۰, ۱, ۲, \ldots$$ (برای نوارهای تداخلی روشن)

$$d\sin\theta = (۲m+۱)\frac{\lambda}{۲} \ , \ m = ۰, ۱, ۲, \ldots$$ (برای نوارهای تداخلی تاریک)

و با توجه به اینکه در شکل زاویهٔ θ زاویه‌ای کوچک است $\sin\theta \approx \tan\theta = \frac{y}{D}$ ، که در آن y فاصلهٔ نقطهٔ P تا محور مرکزی است. در نتیجه رابطه‌های بالا چنین می‌شوند

$$y = \frac{m\lambda D}{d} \ , \ m = ۰, ۱, ۲, \ldots$$ (برای نوارهای تداخلی روشن)

$$y = \frac{(m+\frac{۱}{۲})\lambda D}{d} \ , \ m = ۰, ۱, ۲, \ldots$$ (برای نوارهای تداخلی تاریک)

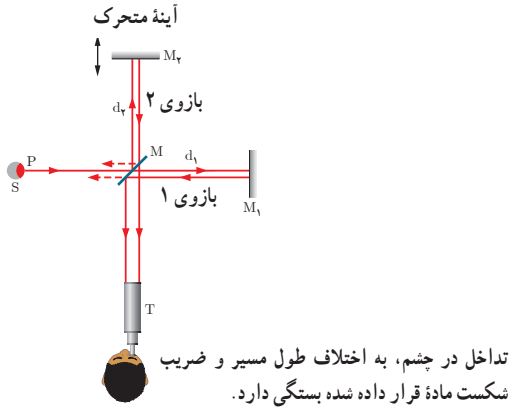
دانستنی معلم

تداخل‌سنج مایکلسون

تداخل‌سنج[۱] وسیله‌ای است که به کمک فریزهای تداخلی می‌تواند برای اندازه‌گیری بسیار دقیق طول یا تغییر طول به‌کار رود. در اینجا شکل اولیهٔ آن را که در سال ۱۸۸۱ توسط *مایکلسون* طراحی و ساخته شد، توضیح می‌دهیم.

نوری را در نظر بگیرید که نقطهٔ P واقع بر چشمهٔ گستردهٔ S در شکل ۱ را ترک می‌کند و به شکافندهٔ باریکهٔ M می‌رسد. شکافندهٔ باریکه، آینه‌ای است که نیمی از نور فرودی را عبور می‌دهد و نیمی دیگر را بازمی‌تاباند. در شکل، برای راحتی کار، فرض کرده‌ایم ضخامت آینه ناچیز است. بنابراین، در نقطهٔ M نور به دو موج تقسیم می‌شود که یکی با عبور از شکافنده به طرف آینهٔ $M_۱$ در انتهای یکی از بازوها و دیگری با بازتاب از شکافنده به طرف آینهٔ $M_۲$ در انتهای بازوی دیگر پیش می‌رود. این موج‌ها از آینه‌ها کاملاً بازمی‌تابند و در امتداد جهت‌های فرودی خود بازمی‌گردند و سرانجام هر یک وارد دوربین T می‌شوند. آنچه ناظر می‌بیند نقشی تداخلی از فریزهای خمیده یا تقریباً مستقیم است که این آخری شبیه نوارهای روی پوست یک گورخر است.

اختلاف طول مسیر دو موج وقتی دوباره در دوربین با هم ترکیب می‌شوند برابر با $۲d_۲ - ۲d_۱$ است، و هر چیزی که این اختلاف طول مسیر را تغییر دهد، موجب تغییر در اختلاف فاز بین این دو موج در چشم می‌شود. مثلاً اگر آینهٔ $M_۲$ به اندازهٔ $\frac{۱}{۲}\lambda$ حرکت کند، اختلاف طول مسیر به اندازهٔ λ تغییر می‌کند و نقش فریز به اندازهٔ یک فریز جابه‌جا می‌شود (گویی هر نوار تاریک گورخر به محلّ نوار تاریک مجاور حرکت کرده است). به همین ترتیب، حرکت آینهٔ $M_۲$ به اندازهٔ $\frac{۱}{۴}\lambda$ موجب جابه‌جایی به اندازهٔ نیم فریز می‌شود (هر نوار تیرهٔ گورخر به محلّ نوار روشن مجاور جابه‌جا می‌شود).



شکل ۱ــ تداخل‌سنج مایکلسون که مسیر نوری را نشان می‌دهد که از نقطهٔ P چشمهٔ گسترده نشأت گرفته است. آینهٔ M نور را به دو باریکه تقسیم می‌کند، که از آینه‌های $M_۱$ و $M_۲$ به سمت M و سپس به دوربین T بازمی‌تاباند. ناظر در دوربین فریزهای تداخلی را می‌بیند.

۱ــ interferometer

جالب است بدانید که وجود امواج گرانشی را به چنین روشی در «رصدخانهٔ تداخل‌سنج لیزری امواج گرانشی» یا **لایگو**[۱] (شکل ۲) رصد کردند که البته بحث آن در اینجا نمی‌گنجد ولی می‌توانید به فیلمی که در این رابطه در سایت گروه گذاشته شده است مراجعه کنید.

شکل ۲ــ تصویری از رصدخانه‌های لایگو درلیوینگستون و هانفورد

فیلم

در این فیلم چگونگی آشکارسازی امواج گرانشی در لایگو را می‌بینید.

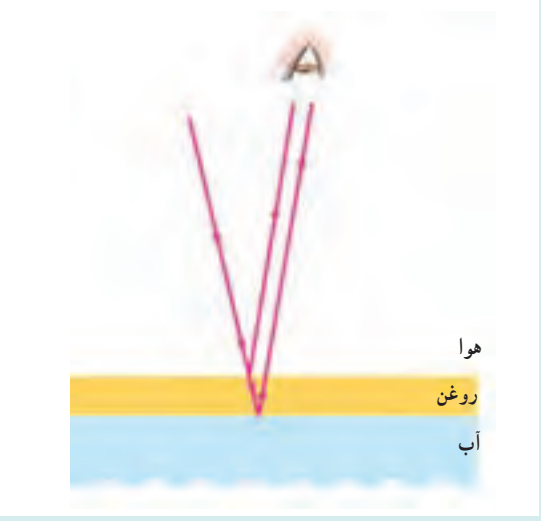
قرار دادن مادهٔ شفاف. با قرار دادن یک مادهٔ شفاف نازک در مسیر نوری یکی از آینه‌ها ــ مثلاً M_1 ــ نیز می‌توان باعث جابه‌جایی در نقش فریزها شد. اگر ضخامت ماده L و ضریب شکست آن n باشد، نشان داده می‌شود که تعداد فریزهای جابه‌جا شده از رابطهٔ $\frac{2L}{\lambda}(n-1)$ به‌دست می‌آید. برای هر تغییر فاز، نقش نواری به اندازهٔ یک فریز جابه‌جا می‌شود. بنابراین با شمردن تعداد فریزهایی که بر اثر حضور ماده باعث جابه‌جایی نقش نواری شده‌اند می‌توان ضخامت ماده برحسب λ را تعیین کرد. با چنین روش‌هایی می‌توان طول اجسام را برحسب طول موج معین کرد. در زمان مایکلسون، معیار طول، فاصلهٔ بین دو خراش ظریف روی یک میلهٔ فلزی معین بود که در جایی نزدیکی پاریس نگهداری می‌شد. مایکلسون با استفاده از تداخل‌سنج خود نشان داد که مترِ معیار معادل ۱۵۵۳۱۶۳/۵ طول موج نور قرمز تک‌فامی است که از یک چشمهٔ کادمیُم گسیل شده است. مایکلسون برای این اندازه‌گیری دقیق، جایزهٔ نوبل سال ۱۹۰۷ را دریافت کرد. کار او زمینه را برای کنار گذاشتن میلهٔ متر به عنوان معیار طول مهیا کرد و به تعریف دوبارهٔ متر برحسب طول موج نور در سال ۱۹۶۱ انجامید. البته این معیار نیز برای برآوردن الزامات روبه پیشرفت علم و فناوری به حدّ کافی دقیق نبود و در سال ۱۹۸۳ معیار جدیدی مبتنی بر مقداری تعریف شده برای تندی نور، جایگزین آن شد.

۱ــ Laser Interferomenter Gravitional wave Obeservatory

دانستنی برای معلم

رنگ‌های حاصل از تداخل : لایه‌های روغن و جانوران

اگر به لایه‌ها و حباب‌های صابون یا لکه‌های روغن در خیابانی خیس نگاه کنید، تنوع رنگیِ چشم‌نوازی را در آنها مشاهده می‌کنید. این تنوع رنگی ناشی از پدیدهٔ داخل نور است. در واقع، وقتی یک لایهٔ شفاف که ضخامتی تقریباً برابر با طول موج نور مرئی دارد توسط نور سفیدی روشن شود، به دلیل تداخل نور می‌تواند رنگ‌هایی ایجاد کند. فرض کنید پرتویی تکفام بر چنین لایه‌ای بتابد. بخشی از این نور از سطح جلویی لایه بازمی‌تابد، در حالی که بخشی از بقیهٔ نور با عبور از لایه، از سطح عقبی آن بازمی‌تابد، دوباره از لایه می‌گذرد، و سپس از آن خارج می‌شود. وقتی شما این دو موج خروجی از لایه را دریافت می‌کنید آنها با هم تداخل می‌کنند (شکل ۱). اگر آنها هم‌فاز باشند، به طور سازنده تداخل می‌کنند و شما رنگ روشنی را روی لایه می‌بینید و اگر آنها ناهم‌فاز باشند، به طور ویرانگر تداخل می‌کنند و شما روی لایه را سیاه می‌بینید. وقتی شما زاویهٔ دید خود را تغییر دهید، مسافتی که نور در لایه می‌پیماید تغییر می‌کند که این می‌تواند تداخل دو پرتو را از سازنده به ویرانگر و بالعکس تبدیل می‌کند. نور سفید آمیزه‌ای از رنگ‌های مختلف است و بنابراین رنگ‌هایی را که می‌بینید با تغییر زاویهٔ دید شما تغییر می‌کنند و نمایش‌های رنگارنگی را مشاهده خواهید کرد.



شکل ۱ــ نور بازتابیده از سطوح جلویی و عقبی لایه به چشم شما می‌رسد.

همچنین طبیعت دیرزمانی است از تداخل نوری برای ایجاد رنگ استفاده کرده است. رنگی که از برخی پروانه‌ها و حشرات می‌بینیم ناشی از تداخل نوری است. این پروانه‌ها و حشرات باله‌هایی دارند که رنگ آنها با تغییر زاویهٔ دید شما تغییر می‌کند. یک نمونهٔ جالب، پروانهٔ مورفو[1] است که گرچه رنگ بال آن قهوه‌ای است (و آن را می‌توانید از سطح پایینی بال آن ببینید)، ولی سطح بالایی بال آن بر اثر تداخل نور بازتابیده به رنگ آبی درخشانی دیده می‌شود (شکل ۲) و اگر زاویهٔ دید خود را تغییر دهید، این رنگ

۱ــ Morpho

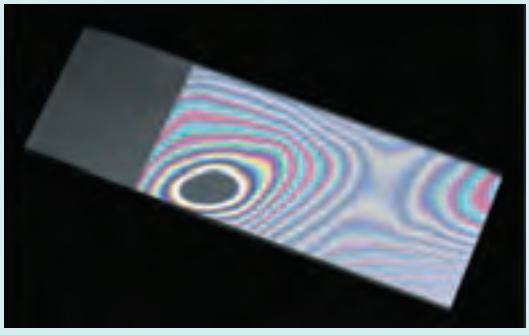
شکل ۲ــ تصویری از پروانهٔ مورفو

تغییر می‌کند. *شاه‌ماهی*[۱] نیز از همین ویژگی استفاده می‌کند و خود را به رنگ سفید نقره‌ای می‌نمایاند تا شکارچی‌ها کار سختی در یافتن آن داشته باشد. وقتی به برخی از سوسک‌های *آبزی استوایی*[۲] از زاویهٔ خاصی نگاه شود، رنگ‌های زیبایی را نشان می‌دهند. برخی سوسک‌ها از این ویژگی جهت استتار خود استفاده می‌کنند.

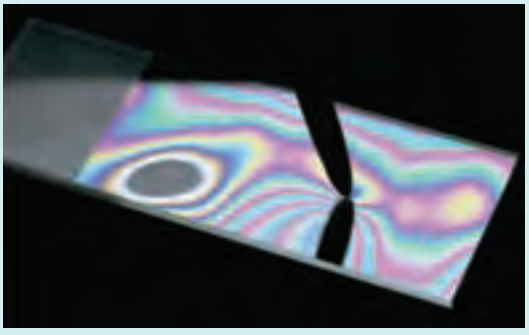
ویژگی این پروانه‌ها و حشرات ناشی از لایه‌های پوسته‌مانند شفافی است که موجب تداخل نور می‌شوند. مثلاً در سطح بالایی بال یک پروانهٔ مورفو، این پوسته‌ها ساختاری پله‌کانی دارند. ضخامت و فاصلهٔ این پوسته‌ها به‌گونه‌ای است که وقتی نور سفیدی از آنها می‌گذرد، بازتاب‌های حاصل از پوسته‌های متوالی (مثلاً پوستهٔ بالایی و پوستهٔ پایین‌تر بعدی) به تداخل ویرانگر می‌انجامد و بنابراین شما رنگی آبی از این بال می‌بینید. با تغییر زاویهٔ دید خود، مسیر نوری که به شما می‌رسد را تغییر می‌دهید و این موجب تغییر طول موجی می‌شود که به تداخل سازنده می‌انجامد.

از جابه‌جایی رنگی مشابهی در جوهرهای به‌کار رفته در بسیاری از اسکناس‌ها برای مقابله با جعل‌کنندگان استفاده می‌شود. وقتی از زاویه‌ای به یک نقطه از اسکناس نگاه می‌کنید آن نقطه را به رنگی می‌بینید و وقتی از زاویه‌ای دیگر به همان نقطه نگاه می‌کنید آن را به رنگی دیگر می‌بینید. دستگاه‌های نسخه‌برداری (کپی) فقط می‌توانند از یک زاویهٔ دید نسخه‌برداری کنند و بنابراین نمی‌توانند هر انتقال رنگی را که بر اثر تغییر زاویهٔ دید ایجاد می‌شود، به وجود آورند.

همچنین تغییر فاصلهٔ لایه‌هایی که برهم نهاده شده‌اند می‌تواند به تغییر رنگ بیانجامد. شکل ۳.الف دو لایهٔ شیشه با گاف هوای باریک را نشان می‌دهد که بر اثر تابش نور تقش‌هایی تداخلی بر آن ایجاد شده است. وقتی لایهٔ بالایی را می‌فشاریم (شکل ۳.ب) نقش‌های تداخلی تغییر شکل می‌دهند که این ناشی از آن است که با اعمال فشار، فاصلهٔ هوای بین لایه‌ها تغییر کرده است.



شکل ۳.الف دو فیلم نازک با گاف باریکی از هوا که به آن نور سفید تابانده شده است.

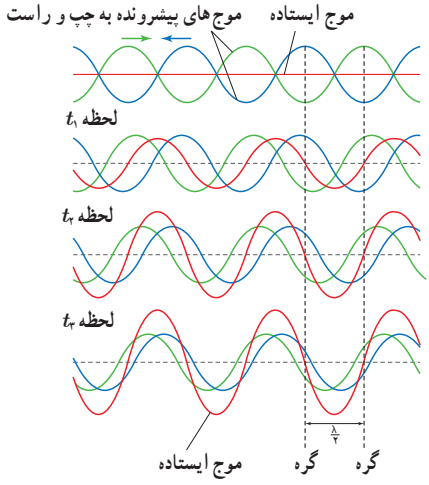


شکل ۳.ب با اعمال فشار به فیلم نازک بالایی، نقش های تداخلی تغییر می‌کنند.

۱ــ Herring

۲ــ Eropical Gyrinid Beetle

اشاره کنید دو موج سینوسی با طول موج و دامنهٔ یکسان را بررسی می‌کنید که در جهت‌های مخالف هم حرکت می‌کنند (یعنی برخلاف آنچه که در حاشیهٔ دوم مربوط به صفحهٔ ۱۰۳ کتاب درسی آمده است و در آنجا دو موج سینوسی با طول موج و دامنهٔ یکسان در یک جهت حرکت می‌کنند). از این لحاظ می‌توان اشاره کرد که لزوماً نیازی به این نیست که ریسمانی را در نظر بگیرند. مثلاً شکل‌های زیر در حالت کلی این را برای دو موج، یک چپ رونده (سبزرنگ) و دیگری راست رونده (آبی) و تشکیل موج ایستاده برای چهار لحظه نشان می‌دهد.



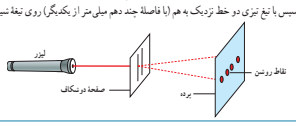
چند عکس لحظه‌ای از تشکیل یک موج ایستاده

در شکل ۴ــ۳۵ دوباره تأکید شود فاصلهٔ مکان‌های حدّی شکم، محدودهٔ حرکت شکم است.

توارهای رونشن و تاریک روی پرده که ناشی از تداخل‌های سازنده و ویرانگرند، نقش تداخلی خوانده می‌شود. طرحی از این نقش در سمت راست شکل ۴ــ۳۲، برای نور تکفام سبز نشان داده شده است. در این نقش بهنای هر نوار تاریک یا رونشن (که مساوی فرض می‌شوند) متناسب با طول‌موج نور به‌کار رفته در آزمایش است. با استفاده از آزمایش یانگ می‌توان طول‌موج نور به‌کار رفته در آزمایش را تعیین کرد که در اینجا به آن نمی‌پردازیم.

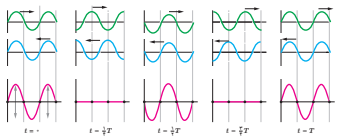
فعالیت ۴ــ۵

مشاهدهٔ نقش تداخلی به کمک نور لیزر : اگر از نور لیزر استفاده کنید، دیگر نیازی به استفاده از یک تک‌شکاف در آزمایش یانگ نیست. با استفاده از یک لیزر مدادی، صفحهٔ دو شکاف آزمایش یانگ را مطابق شکل روشن کنید (شاید لازم باشد از یک عدسی واگرا در برابر نور لیزر استفاده کنید تا هر دو شکاف روشن شود) و نقش تداخلی ایجادشده را روی پرده مشاهده کنید. برای تهیهٔ صفحهٔ دو شکاف می‌توانید یک وجه تیغه‌ای تیغه‌ای (مانند لام میکروسکوپ) را با قرار دادن تیغه روی شعلهٔ شمع به‌خوبی دود دهید کنید، سپس با نوک تیزی دو خط نزدیک به هم (با فاصلهٔ چند دهم میلی‌متر از یکدیگر) روی تیغهٔ تیغه‌ای بکشید.

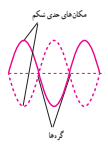


موج ایستاده و تشدید در ریسمان کشیده : ریسمانی را تصور کنید که در یک انتها ثابت شده است و انتهای دیگر آن به نوسان درمی‌آید. وقتی موج بازتابیده از انتهای ثابت (که در شکل ۴ــ۳۴ با رنگ آبی مشخص شده است و به سمت چپ حرکت می‌کند) با موج تابیده (که در شکل ۴ــ۳۴ با رنگ سبز مشخص شده است و به سمت راست حرکت می‌کند) ترکیب شوند موجی برایند ایجاد می‌کنند که شکل آن از اصل برهم‌نهی حاصل می‌شود (این موج در شکل ۴ــ۳۴ با رنگ قرمز مشخص شده است).

مشخصهٔ بارز این موج برایند آن است که مکان‌هایی در طول ریسمان، موسوم به گره، وجود دارد که در آنها ریسمان هرگز حرکت نمی‌کند. وسط گره‌های مجاور را شکم می‌گویند که دامنهٔ موج برایند در آنجا بیشینه است. نقش موج برایند را در این حالت، موج ایستاده می‌گویند، زیرا نقش‌های این موج به جب



شکل ۴ــ۳۴ چند عکس لحظه‌ای از تشکیل یک موج ایستاده در یک ریسمان کشیده شده در مدت یک دوره



شکل ۴ــ۳۵ تشکل یک موج ایستاده که با گره‌ها و شکم‌ها و یک ریسمان نشان داده شده است. برمبنای آنست در رسم موج‌های ایستاده، در مکان حدی شکم‌ها نشان داده شود.

با راست حرکت نمی‌کنند و محل شکم‌ها و گره‌ها تغییر نمی‌کند. شکل ۴ــ۳۴، چند عکس در لحظه‌های مختلف از موج‌های تابیده، بازتابیده، و موج برایند آنها را نشان می‌دهد. از روی شکل درمی‌یابیم که فاصلهٔ گره‌های مجاور از هم برابر با نصف طول‌موج ($\lambda/2$) و بنابراین فاصلهٔ گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر با ربع طول‌موج ($\lambda/4$) است. شکل ۴ــ۳۵، طرحی از موج ایستاده در این ریسمان را نشان می‌دهد که در آن حالت‌های مختلف ریسمان در لحظات مختلف شکل ۴ــ۳۴ دیده می‌شود.

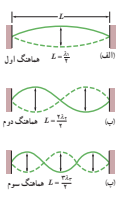
اگر در شکل ۴ــ۳۴ به موج‌های تابیده و بازتابیده در مکان گره‌ها و در لحظه‌های مختلف بنگاه کنیم، می‌بینیم که در تمام لحظات وضعیت موج‌های تابیده و بازتابیده در هر یک از گره‌ها به گونه‌ای است که یکدیگر را حذف و اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند (تداخل ویرانگر). در این حالت اصطلاحاً می‌گوییم این دو موج در این نقطه‌ها (گره‌ها) کاملاً ناهم‌فاز (در فاز مخالف)اند. اما در مکان هر یک از شکم‌ها وضعیت موج‌های تابیده و بازتابیده در تمام لحظات به گونه‌ای است که همدیگر را تقویت می‌کنند (تداخل سازنده). در این حالت اصطلاحاً می‌گوییم این دو موج در این نقاط هم‌فازند.

بسامدهای تشدید تار : شکل ۴ــ۳۶ تصویری واقعی از اسباب آزمایشی را نشان می‌دهد که در آن تاری کشیده شده، از یک سر به یک مولد نوسان و از سر دیگر به گیره‌ای متصل است. به‌ازای بسامدهای معیّنی از مولد نوسان، تداخل موجب ایجاد موج ایستادهٔ بازرَی (یا اصطلاحاً یک «مد نوسان») در تار می‌شود. گفته می‌شود تار در این بسامدهای معیّن که بسامدهای تشدیدی خوانده می‌شوند به تشدید درآمده است. اگر تار در بسامدی غیر از بسامدهای تشدیدی نوسان کند موج ایستادهٔ بازرَی ایجاد نمی‌شود.

شکل ۴ــ۳۶ اسباب آزمایشی برای ایجاد موج ایستاده در تار کشیده. توجه کنید سری که به مولد نوسان متصل است، تقریباً در محل گره واقع است.

توجه کنید که اگرچه در این آزمایش از یک نوسان‌ساز الکتریکی برای ایجاد ارتعاش در تار استفاده کردیم، اما در سازهای موسیقی، موج‌های ایستاده را می‌توان با ضربه زدن بر تارها (مانند سنتور، سه‌تار، یانو) و پوسته‌ها (مانند طبل، دف، تنبک)، و با دمیدن در ستون‌های هوا (مانند نی، فلوت، آرگ) ایجاد کرد.

در آزمایش نشان داده شده در شکل ۴ــ۳۶، و در بسامدهای تشدیدی تار، ساده‌ترین نقش موج ایستاده فقط یک شکم دارد که در مرکز ریسمان واقع است (شکل ۴ــ۳۷ الف). نقش سادهٔ بعدی وضعیتی است که سه گره و دو شکم داریم (شکل ۴ــ۳۷ ب). نقش سوم، چهار گره و سه شکم دارد (شکل ۴ــ۳۷ پ). در حالت کلی اگر طول این تار را با L نشان دهیم برای نقش موج ایستاده‌ای با

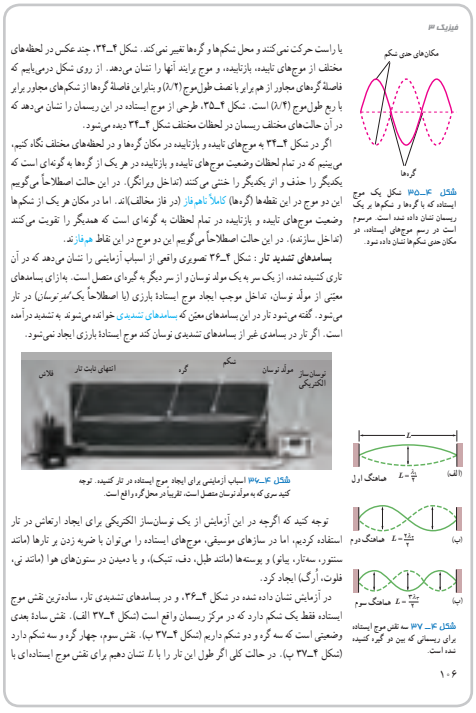


شکل ۴ــ۳۷ سه نقش موج ایستاده برای ریسمانی که بین دو گیره کشیده شده است.

فیلم

در این فیلم تشریح جامعی از انتشار امواج و برهم‌کنش‌های آنها را می‌بینید.

شاید از لحاظ اطلاعات عمومی خوب باشد اشاره شود که به این آزمایش، *آزمایش ملد* (Meld's experiment) می‌گویند. به‌خصوص اگر دانش‌آموزان بخواهند آن را به عنوان واژه‌ای کلیدی در اینترنت جست‌وجو کنند مفید خواهد بود. در واقع این آزمایش را نخستین بار فیزیکدان آلمانی *فرانتز ملد* (۱۹۰۱ـ۱۸۳۲ م.) برای تشکیل موج‌های ایستاده در یک ریسمان انجام داد. در آزمایش‌های اولیه از یک دیاپازن به عنوان چشمهٔ نوسانی استفاده می‌شد. همچنین می‌توانید مانند فیلمی که در سایت گروه فیزیک بارگذاری شده است دانش‌آموزان را ترغیب به ایجاد موج‌های ایستاده بکنید.



فیزیک ۳

با راست حرکت نمی‌کنند و محل شکم‌ها و گره‌ها تغییر نمی‌کند. شکل ۴ـ۳۴، چند عکس در لحظه‌های مختلف از موج‌های تابیده، بازتابیده، و موج برایند آنها را نشان می‌دهد. از روی شکل درمی‌یابیم که فاصلهٔ گره‌های مجاور از هم برابر با نصف طول‌موج ($\lambda/2$) و بنابراین فاصلهٔ گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر با ربع طول‌موج ($\lambda/4$) است. شکل ۴ـ۳۵، طرحی از موج ایستاده در این ریسمان را نشان می‌دهد که در آن حالت‌های مختلف ریسمان در لحظات مختلف شکل ۴ـ۳۴ دیده می‌شود.

اگر در شکل ۴ـ۳۴ به موج‌های تابیده و بازتابیده در مکان گره‌ها و در لحظه‌های مختلف نگاه کنیم، می‌بینیم که در تمام لحظات وضعیت موج‌های تابیده و بازتابیده در هر یک از گره‌ها به گونه‌ای است که یکدیگر را حذف و از یکدیگر را خنثی می‌کنند (تداخل ویرانگر). در این حالت اصطلاحاً می‌گوییم این دو موج در این نقطه‌ها (گره‌ها) کاملاً ناهم‌فاز (در فاز مخالف)اند. اما در مکان هر یک از شکم‌ها وضعیت موج‌های تابیده و بازتابیده در تمام لحظات به گونه‌ای است که همدیگر را تقویت می‌کنند (تداخل سازنده). در این حالت اصطلاحاً می‌گوییم این دو موج در این نقاط هم‌فازند.

بسامدهای تشدید تار : شکل ۴ـ۳۶ تصویری واقعی از اسباب آزمایشی را نشان می‌دهد که در آن تاری کشیده شده، از یک سر به یک مولد نوسان و از سر دیگر به گیره‌ای متصل است. به‌ازای بسامدهای معیّنی از مولد نوسان، تداخل موجب ایجاد موج ایستادهٔ بازرَی (یا اصطلاحاً یک *مُد نوسان*) در تار می‌شود. گفته می‌شود تار در این بسامدهای معیّن که بسامدهای تشدیدی خوانده می‌شوند به تشدید درآمده است. اگر تار در بسامدی غیر از بسامدهای تشدیدی نوسان کند موج ایستادهٔ بازرَی ایجاد نمی‌شود.

شکل ۴ـ۳۶ اسباب آزمایشی برای ایجاد موج ایستاده در تار کشیده. توجه کنید سری که به مولد نوسان متصل است، تقریباً در محل گره، واقع است.

توجه کنید که اگرچه در این آزمایش از یک نوسان‌ساز الکتریکی برای ایجاد ارتعاش در تار استفاده کردیم، اما در سازهای موسیقی، موج‌های ایستاده را می‌توان با ضربه زدن بر تارها (مانند سنتور، سه‌تار، پیانو) و یوسته‌ها (مانند طبل، دف، تنبک)، و یا دمیدن در سنون‌های هوا (مانند نی، فلوت، اُرگ) ایجاد کرد.

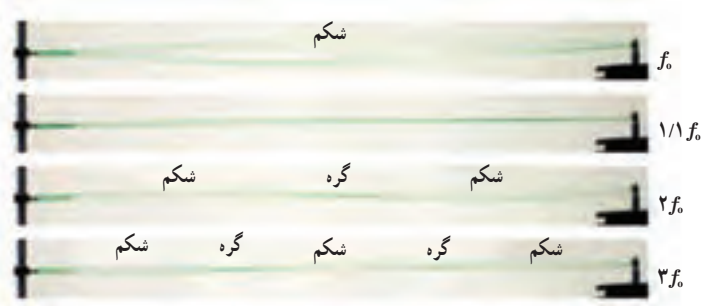
در آزمایش نشان داده شده در شکل ۴ـ۳۶، و در بسامدهای تشدیدی تار، ساده‌ترین نقش موج ایستاده فقط یک شکم دارد که در مرکز ریسمان واقع است (شکل ۴ـ۳۷ الف). نقش سادهٔ بعدی وضعیتی است که سه گره و دو شکم داریم (شکل ۴ـ۳۷ ب). نقش سوم، چهار گره و سه شکم دارد (شکل ۴ـ۳۷ پ). در حالت کلی اگر طول این تار را با L نشان دهیم برای نقش موج ایستاده‌ای با

شکل ۴ـ۳۵ شکل یک موج ایستاده که با گره‌ها و شکم‌ها بر یک ریسمان نشان داده شده است. مرسوم است در رسم موج‌های ایستاده، در مکان حدی شکم‌ها نشان داده نشود.

شکل ۴ـ۳۷ سه نقش موج ایستاده برای ریسمانی که بین دو گیره کشیده شده است.

۱۰۶

در اینجا خوب است تأکید شود که اگر تار در بسامدی غیر از بسامدهای تشدیدی نوسان کند موج ایستادهٔ بازرَی تشکیل نمی‌شود. شکل زیر برای درک این موضوع بسیار آموزنده است.



در حالی که به ازای بسامدی تشدیدی f_0، $2f_0$ و $3f_0$ موج‌های ایستادهٔ بازرَی در یک تار ایجاد شده‌اند، به ازای بسامد غیرتشدیدی ۱/۱ f_0 موج ایستادهٔ بازرَی تشکیل نشده است.

فیلم

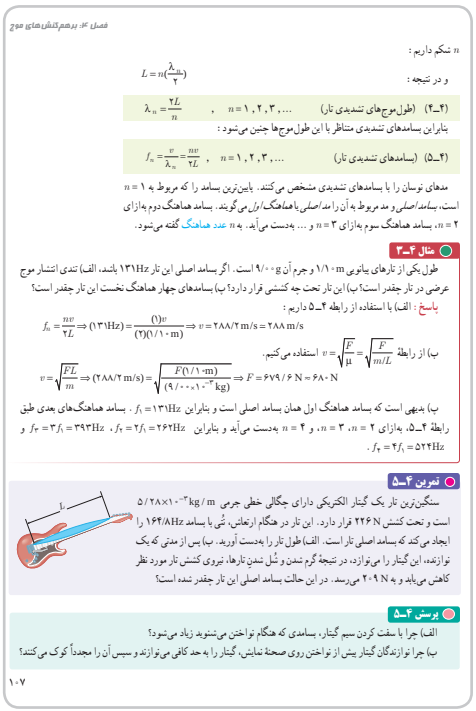
در این فیلم می‌بینید که چگونه می‌توان موج‌های ایستاده را به‌سادگی ایجاد کرد.

فیلم

در این فیلم آزمایشی مشابه را برای تشکیل گره و شکم می‌بینید.

فیلم

در این فیلم‌ها ایجاد هماهنگ‌های دوم تا پنجم را می‌بینید.



فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

n تکم داریم :

و در نتیجه : $L = n(\frac{\lambda_n}{2})$

(۴ـ۴) (طول‌موج‌های تشدیدی تار) $\lambda_n = \frac{2L}{n}$, $n = 1, 2, 3, \ldots$

بنابراین بسامدهای تشدیدی متناظر با این طول‌موج‌ها چنین می‌شود :

(۵ـ۴) (بسامدهای تشدیدی تار) $f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L}$, $n = 1, 2, 3, \ldots$

مدهای نوسان را با بسامدهای تشدیدی مشخص می‌کنند. پایین‌ترین بسامد را که مربوط به $n = 1$ است، *بسامد اصلی* و مد مربوط به آن را *مد اصلی* یا *هماهنگ اول* می‌گویند. بسامد هماهنگ دوم به‌ازای $n = 2$، بسامد هماهنگ سوم به‌ازای $n = 3$ و ... به‌دست می‌آید. به n عدد هماهنگ گفته می‌شود.

مثال ۴ـ۳

طول یکی از تارهای پیانویی $1/10\,m$ و جرم آن $9/00\,g$ است. اگر بسامد اصلی این تار $131\,Hz$ باشد، الف) تندی انتشار موج عرضی در تار چقدر است؟ ب) این تار تحت چه کشنی قرار دارد؟ پ) بسامدهای چهار هماهنگ نخست این تار چقدر است؟

پاسخ : الف) با استفاده از رابطهٔ ۴ـ۵ داریم :

$$f_n = \frac{nv}{2L} \Rightarrow (131\,Hz) = \frac{(1)v}{(2)(1/10\,m)} \Rightarrow v = 262/2\,m/s \approx 262\,m/s$$

ب) از رابطهٔ $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{F}{m/L}}$ استفاده می‌کنیم.

$$v = \sqrt{\frac{FL}{m}} \Rightarrow (262/2\,m/s) = \sqrt{\frac{F(1/10\,m)}{(9/00\times10^{-3}\,kg)}} \Rightarrow F = 679/6\,N \approx 680\,N$$

پ) بدیهی است که بسامد هماهنگ اول همان بسامد اصلی است و بنابراین $f_1 = 131\,Hz$. بسامد هماهنگ‌های بعدی طبق رابطهٔ ۴ـ۵، به‌ازای $n = 2$، $n = 3$، و $n = 4$ به‌دست می‌آید و بنابراین $f_2 = 2f_1 = 262\,Hz$، $f_3 = 3f_1 = 393\,Hz$ و $f_4 = 4f_1 = 524\,Hz$.

تمرین ۴ـ۵

سنگین‌ترین تار یک گیتار الکتریکی دارای چگالی خطی جرمی $5/28\times10^{-3}\,kg/m$ است و تحت کشش $226\,N$ قرار دارد. این تار در هنگام ارتعاش، تُنی با بسامد $164/8\,Hz$ را ایجاد می‌کند که بسامد اصلی تار است. الف) طول تار را به‌دست آورید. ب) پس از مدتی که یک نوازنده، این گیتار را می‌نوازد، در نتیجهٔ گرم شدن و شُل شدن تارها، نیروی کشش تار مورد نظر کاهش می‌یابد و به $209\,N$ می‌رسد. در این حالت بسامد اصلی این تار چقدر شده است؟

پرسش ۴ـ۵

الف) چرا با سفت کردن سیم گیتار، بسامدی که هنگام نواختن می‌شنوید زیاد می‌شود؟

ب) چرا نوازندگان گیتار پیش از نواختن روی صفحهٔ نمایش، گیتار را به حد کافی می‌نوازند و سپس آن را مجدداً کوک می‌کنند؟

۱۰۷

پاسخ تمرین ۴ـ۵

از رابطهٔ ۴ـ۵ ($f_n = nv/2L$) برای بسامدهای تشدیدی که در آن $v = \sqrt{F/\mu}$ است استفاده می‌کنیم.

الف) با قرار دادن تندی v در رابطهٔ f_n و حل آن برای L خواهیم داشت :

$$L = \frac{n}{2f_n}\sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

که به ازای $n = 1$ چنین به‌دست می‌دهد

$$L = \frac{1}{2(164/8\,Hz)}\sqrt{\frac{266\,N}{5/28\times10^{-3}\,kg/m}}$$

$$= 0/6277\,m \approx 0/628\,m$$

ب) اکنون $F = 209\,N$ و $L = 0/628\,m$ را در رابطهٔ بسامد تشدید قرار می‌دهیم، و از آنجا بسامد اصلی را به‌دست می‌آوریم.

$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

$$= \frac{1}{2(0/6277\,m)}\sqrt{\frac{209\,N}{5/28\times10^{-3}\,kg/m}}$$

$$= 158/48\,Hz \approx 158\,Hz$$

فیلم

در این فیلم‌ها چگونگی ایجاد صدا توسط گیتار و چگونگی تأثیر طول و کشش تارها بر آن را مشاهده می‌کنید.

پاسخ پرسش ۴ـ۵

الف) اگر در رابطهٔ $v = \sqrt{F/\mu}$ به‌جای چگالی خطی جرم، مقدار m/L را قرار دهیم به $v = \sqrt{FL/m}$ می‌رسیم و از آنجا $f_n = n\sqrt{\frac{F}{4Lm}}$ می‌شود. چون با سفت کردن سیم گیتار جرم و طول آن تغییر چندانی نمی‌کند ولی کشش F آن زیاد می‌شود، در نتیجه امواجی سریع‌تر بر روی سیم روانه می‌شود و بسامد صدای بالاتری به گوش می‌رسد. ولی اگر کشی را در بین شست و انگشت خود بکشید، بسامدی که می‌شنویم تغییر محسوسی نمی‌کند. دلیل آن است که گرچه کشش افزایش می‌یابد، ولی همچنین طول آن نیز زیاد می شود و بنابراین بسامد گسیل‌یافته تغییر محسوسی نمی‌کند.

ب) وقتی به سیم گیتار زخمه می‌زنید، این حرکت موجب افزایش دمای آن و انبساط سیم می‌گردد و بنابراین کشش سیم هم کاهش می‌یابد. پس بسامدهایی که سیم می‌تواند تولید کند کم می‌شود. یک نوازندهٔ گیتار نمی‌خواهد چنین اتفاقی روی صحنه رخ دهد، زیرا در این صورت باید سیم را سفت کند تا دوباره کوک شود. بنابراین گیتار را در پایین سن آنقدر می‌نوازد تا سیم‌ها گرم شوند و سپس کشش سیم‌ها را تنظیم می‌کند تا روی سن کوک بمانند.

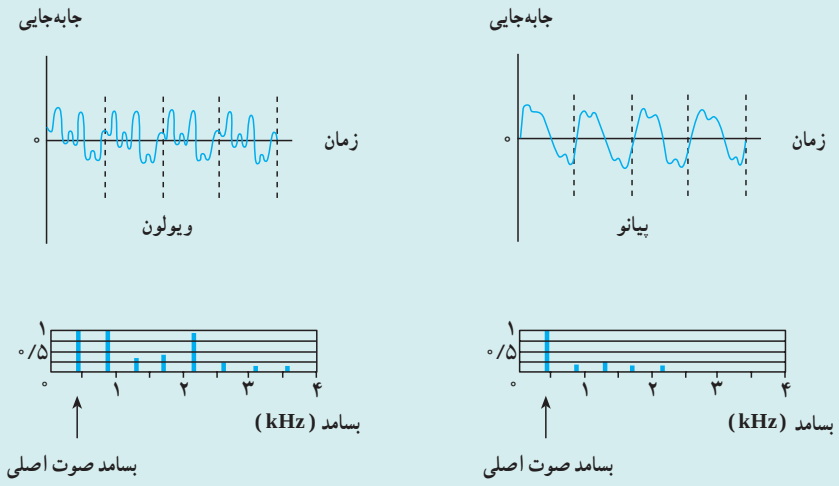
دانستنی برای معلم

صوت‌های موسیقایی

معمولاً صوتی را که انسان با دستگاه شنوایی خود درک می‌کند برحسب سه مشخصهٔ بلندی، ارتفاع و طنین بیان می‌کنند. برای تعریف این مشخصه‌ها به بررسی صوتی که یک تار مرتعش تولید می‌کند، می‌پردازیم.

هنگامی‌که یک تار را مرتعش می‌کنیم، تنها هماهنگ اوّل آن ایجاد نمی‌شود، بلکه هماهنگ‌های دیگر آن نیز به‌وجود می‌آیند و از برهم نهی این هماهنگ‌ها یک موج مرکب ایجاد می‌شود. آنچه ما پس از مرتعش کردن یک تار می‌شنویم از این موج مرکب حاصل می‌شود. در شکل زیر موج صوتی حاصل از پیانو و ویولون نشان داده شده است. در این شکل نسبت دامنهٔ هماهنگ‌ها به دامنهٔ صوت اصلی نیز آمده است. در هر دو مورد، بسامد صوت اصلی ۴۴۰ هرتز است. و لی تعداد و دامنهٔ هماهنگ‌هایی که در ساختن این موج مرکب سهیم‌اند در این دو مورد متفاوت است. در نتیجه شکل موج مرکب حاصل با یکدیگر فرق می‌کنند.

اکنون به توصیف مشخصه‌های صوت می‌پردازیم. طنین صوت به شکل موج مرکب بستگی دارد. یعنی طنین به نوع، تعداد و دامنهٔ هماهنگ‌هایی که ایجاد شده‌اند وابسته است. ارتفاع صوت با بسامد موج اصلی که موج مرکب از آن ساخته می‌شود تعیین می‌شود و بلندی صوت، به شدت صوت و خصوصیت‌های شنوایی بستگی دارد.



اکنون به توصیف صوت‌های موسیقی می‌پردازیم. برای این منظور لازم است چند مفهوم را تعریف کنیم.

۱ صوت موسیقی یا نت، صوتی است که مانند شکل از ارتعاش‌های منظم تشکیل شده است و اثر خوشایندی بر گوش انسان دارد.

۲ فاصلهٔ موسیقی، نسبت بسامد دو نت را فاصلهٔ موسیقی می‌نامند. تجربه نشان می‌دهد که هر فاصله‌ای برای انسان خوشایند نیست.

۳ گام موسیقی، مجموعه‌ای از چند نت است که فاصلهٔ آنها برای گوش خوشایند است. گام‌های متفاوتی در موسیقی وجود دارد. اکنون به توصیف گام طبیعی (زارلن) می‌پردازیم.

گام طبیعی از هشت نت do_1، re، mi، fa، sol، la، si، do_2 تشکیل شده است که فاصلهٔ آنها از یک نت مبنا (do_1) که کمترین بسامد را دارد، به‌صورت زیر است :

$$\frac{do_2}{do_1}=2 \quad , \quad \frac{re}{do_1}=\frac{9}{8} \quad , \quad \frac{mi}{do_1}=\frac{5}{4} \quad , \quad \frac{fa}{do_1}=\frac{4}{3} \quad , \quad \frac{sol}{do_1}=\frac{3}{2} \quad , \quad \frac{la}{do_1}=\frac{5}{3} \quad , \quad \frac{si}{do_1}=\frac{15}{8}$$

بسامد do_2 دو برابر بسامد do_1 است و اکتاو do_1 نامیده می‌شود. اگر do_2 را نت مبنا بگیریم، با رعایت فاصله‌های فوق می‌توان گام دوم را ساخت. به‌همین ترتیب می‌توان بر مبنای do_2 که اکتاو do_2 است گام سوم را ساخت و به همین ترتیب ادامه داد.

به‌عنوان مثال اگر بسامد نت مبنا را ۶۵/۲۵ هرتز اختیار کنیم، با استفاده از نسبت‌های بالا می‌توانیم بسامد نت‌های دیگر را به‌دست آوریم. در این‌صورت داریم :

$$\frac{re_1}{do_1}=\frac{9}{8}$$

$$re_1=\frac{9}{8}do_1=73/41\,Hz$$

به‌همین ترتیب بسامدهای ۸۱/۵۶، ۸۷، ۹۷/۸۸، ۱۰۸/۷۵ و ۱۲۲/۳۴ هرتز به‌ترتیب برای me_1، fa_1، sol_1، la_1، si_1 به‌دست می‌آیند. برای do_2 که اکتاو do_1 است بسامد ۱۳۰/۵ هرتز محاسبه می‌شود. اکنون می‌توانیم بر مبنای do_2 گام بعدی را بسازیم. برای نت‌های این گام به ترتیب مقدارهای ۱۴۶/۸۱، ۱۶۳/۱۳، ۱۷۴، ۱۹۵/۷۵، ۲۱۷/۵، ۲۴۴/۶۹ هرتز به‌دست می‌آیند. هر یک از این نت‌ها اکتاو نت متناظر در گام اول است (چرا؟) به‌همین ترتیب برای گام سوم به ترتیب مقدارهای ۲۶۱، ۲۹۳/۶، ۳۲۶/۲۵، ۳۴۸، ۳۹۱/۵، ۴۳۵، ۴۸۹/۳۸ هرتز به‌دست می‌آیند. این مثال نت‌های گام طبیعی را بر مبنای قرارداد $la_4 = 435\ Hz$ به‌دست می‌دهد. اکنون به‌عنوان تمرین تعیین کنید که بسامدهای ۱۰۴۴ و ۸۷۰ هرتز بسامد چه نت‌هایی هستند و در کدام گام قرار دارند؟

دانستنی برای معلم

«آیا می‌توانید شکل یک طبل را بشنوید»؟

مقاله‌ای با این عنوان وایده در سال ۱۹۶۶ توسط ریاضیدانی به‌نام *مارک کاک*[1] منتشر شد. می‌توان این پرسش را این‌طور هم بیان کرد : آیا می‌توانید از روی بسامدهای گسیل‌شده از یک پوست طبل صاف شکل آن را حدس بزنید؟ یعنی، آیا می‌توانید پس از شنیدن بسیاری از این بسامدها بگویید شکل پوست طبل در هر یک از این بسامدها چگونه است ــ چه قسمت‌هایی در نوسان‌اند و چه قسمت‌هایی نوسان نمی‌کنند؟

در مورد تاری که بین دو پایه کشیده شده است، شما می‌توانید شکل تار را بشنوید، زیرا یک بسامد خاص متناظر با نقش معینی از نوسان تار است. برای مثال، پایین‌ترین بسامدی که تار می‌تواند در آن نوسان کند متناظر با نقش معینی است : دو انتهای تار ساکن هستند (چون در جای خود گره خورده‌اند)، مرکز تار به بیشترین مقدار و نقاط میانی به میزان متوسطی نوسان می‌کنند. بسامد بالاترِ بعدی مربوط به نقش پیچیده‌تر بعدی است، و الی آخر. همان‌طور که می‌دانیم به این بسامدها، بسامدهای هماهنگ تار و به شکل‌های متناظر آنها مُدهای تشدیدی، می‌گویند. وقتی شما برخی از این بسامدها را می‌شنوید می‌توانید از روی هر یک از آنها مُد متناظر آنها را بگویید. افزون بر این، اگر اتفاقاً چگالی و کشش تار را از قبل بدانید، می‌توانید از روی پایین‌ترین بسامد طول تار را نیز بگویید.

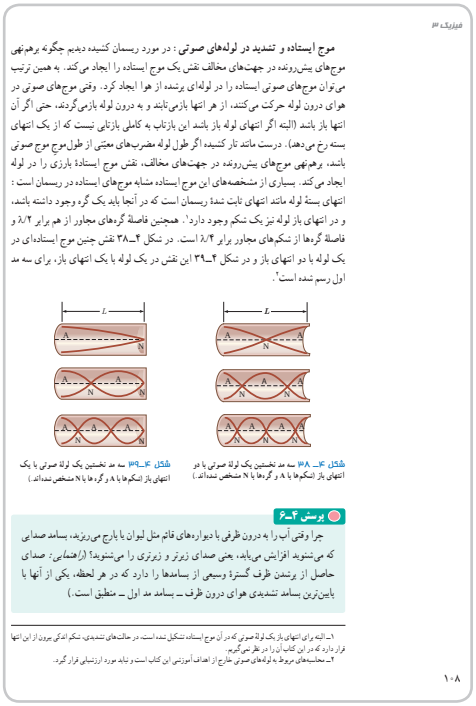
یک پوست طبل صاف مدهای تشدیدی و بسامدهای هماهنگ مشابهی دارد. اما، این مدها با توجه به این واقعیت که پوست طبل دوبعدی است پیچیده‌تر می‌شوند. برای طبل‌های دایره‌ای کار آسان است، امّا برای هر طبل دیگری ممکن است ارتباط مُد نوسانی (قسمت‌هایی که نوسان می‌کنند و قسمت‌هایی که نوسان نمی‌کنند) به شکل پوست طبل دشوار باشد. برای پوست طبل‌های پیچیده‌تر، همیشه نمی‌توانیم شکل نوسان را تعیین کنیم، زیرا دستِ‌کم دو شکل بسیار متفاوت می‌توانند همان دسته بسامدهای هماهنگ را تولید کنند. با این وجود، حتی در این وضعیت‌های دشوار نیز می‌توان مساحت پوست طبل را گفت، و در نتیجه حتی اگر نتوانید همیشه شکل یک طبل را بشنوید، می‌توانید مساحت آن را بشنوید.

فیلم

در این فیلم‌ها نمایش از نقش‌های نوسان (موسوم به *نقش‌های چلادنی*) را می‌بینید.

۱ــ این مقاله تحت عنوان «Can One Hear the Shape of a Drum» نوشته Mark Kac در اینترنت موجود است. تاکنون به این مقاله ۱۸۶۰ بار ارجاع داده شده است.

در اینجا خوب است اشاره شود غیر از آلات موسیقایی بادی (نظیر نی، فلوت و اُرگ) که با دمیدن ستون‌های هوا نوای موسیقی ایجاد می‌کنند، اساس کار آلات موسیقایی زهی (مانند تار، گیتار، ویولن) که با ضربه زدن بر تارهای نوسان، و آلات موسیقایی کوبه‌ای (مانند طبل، دُهُل، تنبک) که با ضربه زدن بر پوسته‌های نوسان کننده، نوایی ایجاد می‌کنند نیز مبتنی بر دانشی است که در این مبحث ارائه شده است. همچنین توجه داده شود که تشدید در لولهٔ صوتی مثالی از تداخل در یک بُعد امواج است.



فیزیک ۳

موج ایستاده و تشدید در لوله‌های صوتی : در مورد ریسمان کشیده دیدیم چگونه برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف نقش یک موج ایستاده را ایجاد می‌کند. به همین ترتیب می‌توان موج‌های صوتی ایستاده را در لوله‌ای پرنده از هوا ایجاد کرد. وقتی موج‌های صوتی در هوای درون لوله حرکت می‌کنند، از هر انتها بازمی‌تابند و به درون لوله بازمی‌گردند، حتی اگر آن انتها باز باشد (البته اگر انتهای لوله باز باشد این بازتاب به کاملی بازتابی نیست که از یک انتهای بسته رخ می‌دهد). درست مانند تار کشیده اگر طول لوله مضرب‌های معینی از طول‌موج موج صوتی باشد، برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف، نقش موج ایستادهٔ بازرَی را در لوله ایجاد می‌کند. بسیاری از مشخصه‌های این موج ایستاده مشابه موج‌های ایستاده در ریسمان است : انتهای بستهٔ لوله مانند انتهای ثابت شدهٔ ریسمان است که در آنجا باید یک گره وجود داشته باشد، و در انتهای باز لوله نیز یک شکم وجود دارد[۱]. همچنین فاصلهٔ گره‌های مجاور از هم برابر $\lambda/2$ و فاصلهٔ گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر $\lambda/4$ است. در شکل ۴ـ۳۸ نقش چنین موج ایستاده‌ای در یک لوله با دو انتهای باز و در شکل ۴ـ۳۹ این نقش در یک لوله با یک انتهای باز، برای سه مد اول رسم شده است[۲].

شکل ۴ـ ۳۸ سه مد نخستین یک لولهٔ صوتی با دو انتهای باز (شکم‌ها با A و گره‌ها با N مشخص شده‌اند.)

شکل ۴ـ۳۹ سه مد نخستین یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز (شکم‌ها با A و گره‌ها با N مشخص شده‌اند.)

پرسش ۴ـ۶

چرا وقتی آب را به درون ظرفی با دیواره‌های قائم مثل لیوان یا پارچ می‌ریزید، بسامد صدایی که می‌شنوید افزایش می‌یابد، یعنی صدای زیرتر و زیرتری را می‌شنوید؟ (*راهنمایی:* صدای حاصل از پرندن ظرف گسترهٔ وسیعی از بسامدها را دارد که در هر لحظه، یکی از آنها با پایین‌ترین بسامد تشدیدی هوای درون ظرف ــ بسامد مد اول ــ منطبق است.)

۱ـ البته برای انتهای باز یک لولهٔ صوتی که در آن موج ایستاده تشکیل شده است، در حالت‌های تشدیدی، شکم اندکی بیرون از این انتها قرار دارد که در این کتاب آن را در نظر نمی‌گیریم.

۲ـ مخلصه‌های مربوط به لوله‌های صوتی خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

۱۰۸

در فیلم دمیدن در فلوت‌هایی با ابعاد مختلف برای ایجاد هماهنگ‌ها را می‌بینید.

فیلم

آزمایش‌های جالبی برای تحقیق تجربی این موارد وجود دارد که جالب‌ترین آن معروف به *لولهٔ روبین* (Rubin's Tube) است که اساس کار آن در شکل‌های زیر نشان داده شده است.

بلندگو‌ی در فاصلهٔ کمی از صفحهٔ دیافراگم لوله‌ای فلزی قرار دارد که روی آن حفره‌هایی تعبیه شده است. بلندگو به یک نوسان‌ساز الکتریکی متصل است که بسامد آن را می‌توان تغییر داد. با تغییر بسامد صوت به بسامدهایی می‌رسیم که در آنها دامنهٔ موج‌های ایستاده زیاد می‌شود و می‌توان با افروختن گاز، آن نقاط را تشخیص داد و حتی فاصلهٔ بین قله‌ها را اندازه گرفت و از آنجا به‌راحتی تندی صوت در گاز را نیز محاسبه کرد.

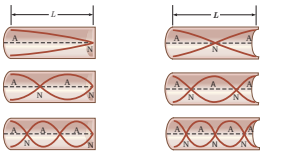
فیلم

در این فیلم‌ها اقسامی از آزمایش با لولهٔ روبین را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم لولهٔ روبین دو بعدی یا تختهٔ *پایرو* را می‌بینید.

موج ایستاده و تندید در لوله‌های صوتی : در مورد ریسمان کشیده دیدیم چگونه برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف تقش یک موج ایستاده را ایجاد می‌کند. به همین ترتیب می‌توان موج‌های صوتی ایستاده را در لوله‌ای پرنده از هوا ایجاد کرد. وقتی موج‌های صوتی در هوای درون لوله حرکت می‌کنند، از هر انتها بازمی‌تابند و به درون لوله بازمی‌گردند، حتی اگر آن انتها باز باشد (البته اگر انتهای لوله باز باشد این بازتاب به کاملی بازتابی نیست که از یک انتهای بسته رخ می‌دهد). درست مانند تار کشیده اگر طول لوله مضرب‌های معینی از طول‌موج موج صوتی باشد، برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف، تقش موج ایستادهٔ بازرزی را در لوله ایجاد می‌کند. بسیاری از مشخصه‌های این موج ایستاده مشابه موج‌های ایستاده در ریسمان است : انتهای بستهٔ لوله مانند انتهای ثابت شدهٔ ریسمان است که در آنجا باید یک گره وجود داشته باشد، و در انتهای باز لوله نیز یک شکم وجود دارد[۱]. همچنین فاصلهٔ گره‌های مجاور از هم برابر $\lambda/2$ و فاصلهٔ گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر $\lambda/4$ است. در شکل ۴ــ۳۸ تقش چنین موج ایستاده‌ای در یک لوله با دو انتهای باز و در شکل ۴ــ۳۹ این تقش در یک لوله با یک انتهای باز، برای سه مد اول رسم شده است[۲].



شکل ۴ــ۳۸ سه مد نخستین یک لولهٔ صوتی با دو انتهای باز (شکم‌ها با A و گره‌ها با N مشخص نشده‌اند.)

شکل ۴ــ۳۹ سه مد نخستین یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز (شکم‌ها با A و گره‌ها با N مشخص نشده‌اند.)

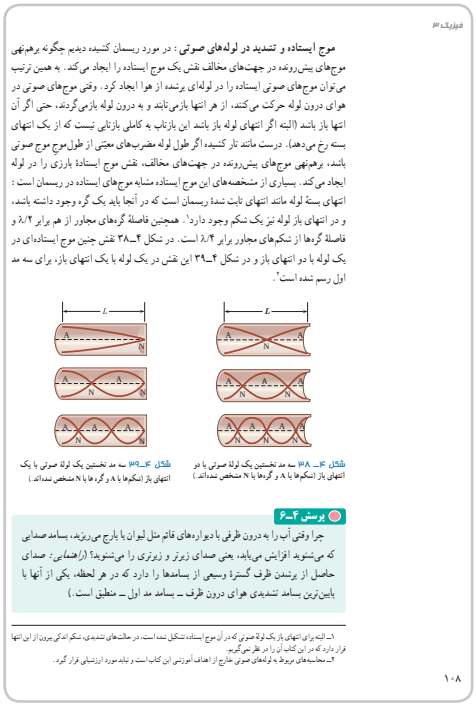
پرسش ۴ــ۶

چرا وقتی آب را به درون ظرفی با دیواره‌های قائم مثل لیوان یا پارچ می‌ریزید، بسامد صدایی که می‌شنوید افزایش می‌یابد، یعنی صدای زیرتر و زیرتری را می‌شنوید؟ (*راهنمایی*: صدای حاصل از پرشدن ظرف گسترهٔ وسیعی از بسامدها را دارد که در هر لحظه، یکی از آنها با پایین‌ترین بسامد تشدیدی هوای درون ظرف ــ بسامد مد اول ــ منطبق است.)

۱ــ البته برای انتهای باز یک لولهٔ صوتی که در آن موج ایستاده تشکیل شده است، در حالت‌های تشدیدی، شکم اندکی بیرون از این انتها قرار دارد که در این کتاب آن را در نظر نمی‌گیریم.
۲ــ محاسبه‌های مربوط به لوله‌های صوتی خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

خوب است با مثال‌هایی که جنبهٔ کاربردی دارند، این مباحث را بیشتر روشن کنید. مثلاً اشاره به برخی از دانستنی‌های این فصل خالی از لطف نیست. ولی می‌توان در همین مرحله با نشان دادن تصاویری مانند تصویر زیر نشان دهید که بر فرض اساس کار گوش انسان نیز مشابه یک لولهٔ صوتی یک سر باز است.

اشاره شود که ارتعاشات هوای داخل ستون هوا طولی هستند، یعنی حرکت ذرات هوا در راستای انتشار امواج صورت می‌گیرد و اگر مولکول یا ذره‌ای در حدّ شکم امواج در نظر گرفته شود این ذره در راستای طولی لوله با بیشترین دامنه نوسان می‌کند، ولی برای نمایش دادن مطابق شکل‌های ۴ــ۳۸ و ۴ــ۳۹، دامنهٔ نوسان‌ها را در قسمت عرضی لوله نشان می‌دهند و این مطلب نباید اشتباه شود که ارتعاشات در راستای عرضی صورت می‌گیرند.


فیزیک ۳

موج ایستاده و تشدید در لوله‌های صوتی : در مورد ریسمان کشیده دیدیم چگونه برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف نقش یک موج ایستاده را ایجاد می‌کند. به همین ترتیب می‌توان موج‌های صوتی ایستاده را در لوله‌ای پرنده از هوا ایجاد کرد. وقتی موج‌های صوتی در هوای درون لوله حرکت می‌کنند، از هر انتها بازمی‌تابند و به درون لوله بازمی‌گردند، حتی اگر آن انتها باز باشد (البته اگر انتهای لوله باز باشد این بازتاب به کاملی بازتابی نیست که از یک انتهای بسته رخ می‌دهد). درست مانند تار کشیده اگر طول لوله مضرب‌های معینی از طول‌موج موج صوتی باشد، برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف، نقش موج ایستادهٔ بازرزی را در لوله ایجاد می‌کند. بسیاری از مشخصه‌های این موج ایستاده مشابه موج‌های ایستاده در ریسمان است : انتهای بستهٔ لوله مانند انتهای ثابت شدهٔ ریسمان است که در آنجا باید یک گره وجود داشته باشد، و در انتهای باز لوله نیز یک شکم وجود دارد[۱]. همچنین فاصلهٔ گره‌های مجاور از هم برابر $\lambda/2$ و فاصلهٔ گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر $\lambda/4$ است. در شکل ۴ـ۳۸ نقش چند موج ایستاده‌ای در یک لوله با دو انتهای باز و در شکل ۴ـ۳۹ این نقش در یک لوله با یک انتهای باز، برای سه مد اول رسم شده است[۲].

شکل ۴ـ۳۸ سه مد نخستین یک لولهٔ صوتی با دو انتهای باز (شکم‌ها با A و گره‌ها با N مشخص شده‌اند.)

شکل ۴ـ۳۹ سه مد نخستین یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز (شکم‌ها با A و گره‌ها با N مشخص شده‌اند.)

پرسش ۴ـ۶

چرا وقتی آب را به درون ظرفی با دیواره‌های قائم مثل لیوان یا پارچ می‌ریزید، بسامد صدایی که می‌شنوید افزایش می‌یابد، یعنی صدای زیرتر و زیرتری را می‌شنوید؟ (*راهنمایی: صدای حاصل از برندمن ظرف گسترهٔ وسیعی از بسامدها را دارد که در هر لحظه، یکی از آنها با پایین‌ترین بسامد تشدیدی هوای درون ظرف ــ بسامد مد اول ــ منطبق است.*)

۱ـ البته برای انتهای باز یک لولهٔ صوتی که در آن موج ایستاده تشکیل شده است، در حالت‌های تشدیدی، شکم اندکی بیرون از این انتها قرار دارد که در این کتاب آن را در نظر نمی‌گیریم.

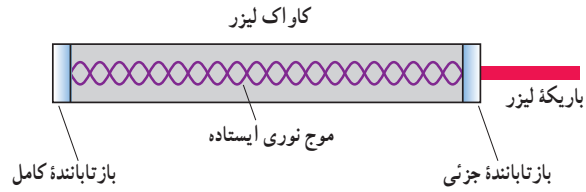
۲ـ محاسبه‌های مربوط به لوله‌های صوتی خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و تنها مورد ارزشیابی قرار گیرد.

خوب است در اینجا به یک تداخل در یک بُعد دیگر نیز که مربوط به امواج الکترومغناطیسی است و بعداً دانش‌آموزان به ترتیبی دیگر با آن نیز آشنا می‌شوند اشاره کرد. به‌عبارتی امواج الکترومغناطیسی ایستاده را می‌توان میان دو آینهٔ موازی که نور را به جلو و عقب بازمی‌تابانند نیز ایجاد کرد. این آینه‌ها مشابه دو انتهای یک ریسمان کشیده هستند.

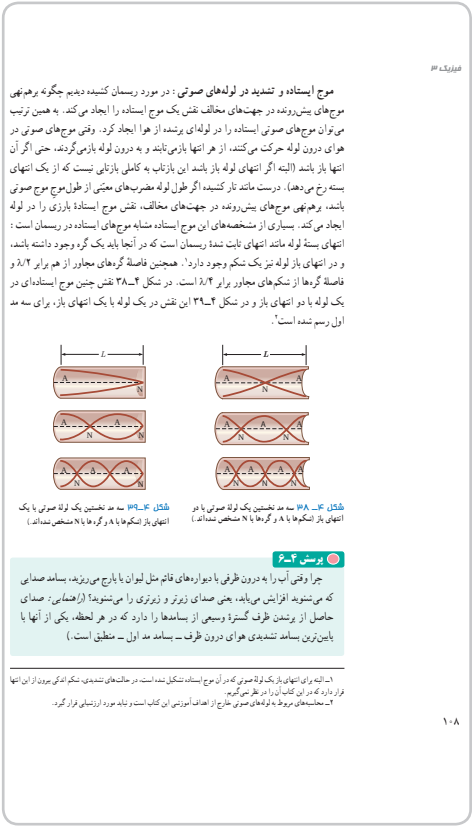
این دو آینهٔ مقابل هم اصطلاحاً یک *کاواک لیزر* را تشکیل می‌دهند (شکل زیر). چون آینه‌ها مانند دو انتهای یک ریسمان کشیده عمل می‌کنند، موج ایستادهٔ نوری باید در سطح هر آینه یک گره داشته باشد. البته یکی از آینه‌ها بازتابندهٔ کامل نیست و همین سبب می‌شود که بخشی از نور از کاواک خارج شده و باریکهٔ لیزر را تشکیل دهد. اما این تأثیری بر تشکیل گره روی این آینه نمی‌گذارد. بنابراین همان رابطه‌ای که بین طول ریسمان و طول موج یک موج ایستاده بر ریسمان وجود دارد ($\lambda = 2L/n$) بین طول یک کاواک لیزر و طول موج ایستادهٔ درون آن نیز برقرار است. یک کاواک نوعی لیزر طولی تقریباً برابر $L = 30\,cm$ دارد و مثلاً اگر طول موج نور مرئی این لیزر $\lambda = 600\,nm$ باشد تعداد حلقه‌های موج ایستادهٔ تشکیل شده در کاواک تقریباً برابر می‌شود با

$$n = \frac{2L}{\lambda} = \frac{2\times 0/30\,m}{6/00\times 10^{-7}\,m} = 1/00\times 10^{6}$$

به عبارت دیگر، یک موج نوری ایستاده در داخل یک کاواک لیزر تقریباً یک میلیون شکم دارد. این نشانی از طول موج بسیار کوتاه یک موج نوری است.



یک کاواک لیزر شامل یک موج نوری ایستاده بین دو آینهٔ موازی است.



فیزیک ۳

موج ایستاده و تشدید در لوله‌های صوتی : در مورد ریسمان کشیده دیدیم چگونه برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف نقش یک موج ایستاده را ایجاد می‌کند. به همین ترتیب می‌توان موج‌های صوتی ایستاده را در لوله‌ای پرنده از هوا ایجاد کرد. وقتی موج‌های صوتی در هوای درون لوله حرکت می‌کنند، از هر انتها بازمی‌تابند و به درون لوله بازمی‌گردند، حتی اگر آن انتها باز باشد (البته اگر انتهای لوله باز باشد این بازتاب به کاملی بازتابی نیست که از یک انتهای بسته رخ می‌دهد). درست مانند تار کشیده اگر طول لوله مضرب‌های معیّنی از طول موج موج صوتی باشد، برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف، نقش موج ایستادهٔ بازرزی را در لوله ایجاد می‌کند. بسیاری از مشخصه‌های این موج ایستاده مشابه موج‌های ایستاده در ریسمان است : انتهای بستهٔ لوله مانند انتهای ثابت تندهٔ ریسمان است که در آنجا باید یک گره وجود داشته باشد، و در انتهای باز لوله نیز یک تکم وجود دارد[1]. همچنین فاصلهٔ گره‌های مجاور از هم برابر $\lambda/2$ و فاصلهٔ گره‌ها از تکم‌های مجاور برابر $\lambda/4$ است. در شکل ۴ـ۳۸ نقش چنین موج ایستاده‌ای در یک لوله با دو انتهای باز و در شکل ۴ـ۳۹ این نقش در یک لوله با یک انتهای باز، برای سه مد اول رسم شده است[2].

شکل ۴ـ۳۸ سه مد نخستین یک لولهٔ صوتی با دو انتهای باز (تکم‌ها با A و گره‌ها با N مشخص شده‌اند.)

شکل ۴ـ۳۹ سه مد نخستین یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز (تکم‌ها با A و گره‌ها با N مشخص شده‌اند.)

پرسش ۴ـ۶

چرا وقتی آب را به درون ظرفی با دیواره‌های قائم مثل لیوان یا پارچ می‌ریزید، بسامد صدایی که می‌شنوید افزایش می‌یابد، یعنی صدای زیرتر و زیرتری را می‌شنوید؟ (*راهنمایی:* صدای حاصل از پرشدن ظرف گسترهٔ وسیعی از بسامدها را دارد که در هر لحظه، یکی از آنها با پایین‌ترین بسامد تشدیدی هوای درون ظرف ــ بسامد مد اول ــ منطبق است.)

۱ـ البته برای انتهای باز یک لولهٔ صوتی که در آن موج ایستاده تشکیل شده است، در حالت‌های تشدیدی، تکم اندکی بیرون از این انتها قرار دارد که در این کتاب آن را در نظر نمی‌گیریم.

۲ـ محاسبه‌های مربوط به لوله‌های صوتی خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

پاسخ پرسش ۴ـ۶

با ریختن آب، فضای هوای داخل ظرف کمتر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ـ۲۹ کتاب دیده می‌شود، هرچه فضای هوای داخل کمتر شود، طول‌موج‌های تشدیدی کوتاه‌تر می‌گردند و بنابراین بسامدهای تشدید بیشتر می‌شوند. به عبارتی، بسامدهای تشدیدی با طول ستون هوا رابطهٔ معکوس دارند. صدای حاصل از پرشدن ظرف، گسترهٔ وسیعی از بسامدها را دارد که در هر لحظه با یکی از بسامدهای تشدید هوای درون ظرف منطبق می‌شود و بنابراین مدام صدای زیرتر و زیرتری را می‌شنویم.

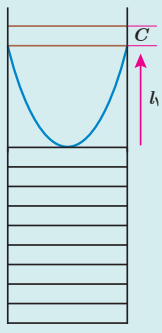
در واقع برای این کار روشی تصحیحی به کار می‌گیرند که به آن end correction pipe (تصحیح دهانهٔ لوله) می‌گویند که در دانستنی معلم مربوط، در این مورد توضیح بیشتری داده شده است. *هلمهولتز* به طور تقریبی نشان داده بود چنانچه شعاع لولهٔ صوتی r باشد، مقدار تصحیح $c = ۰/۵۸r$ می‌شود که البته مقدار c به طول موج صوت نیز تا اندازه‌ای بستگی دارد.

دانستنی برای معلم

تصحیح دهانهٔ لوله

همان‌طور که در پانوشت کتاب نیز اشاره شده است، در واقع شکم دقیقاً در محل دهانهٔ لوله ایجاد نمی‌شود و شکم اندکی از دهانهٔ لوله بالاتر قرار می‌گیرد. بنابراین اگر فاصلهٔ یک گره و یک شکم در درون لوله اندازه‌گیری شود، این مقدار از فاصلهٔ شکم دهانه تا اولین گره نزدیک به دهانه کوچک‌تر است. یعنی امواج صوتی که از دهانهٔ لولهٔ باز در هوا گسیل می‌شوند طول موجی بیشتر از طول موجی دارند که طبق روابط ریاضی محاسبه می‌شود. برای اندازه‌گیری طول موج حقیقی می‌توان این مقدار اضافی را که معمولاً با c نشان داده می‌شود، محاسبه کرد. برای لولهٔ یک سر باز می‌توانیم شرط تشدید را به صورت زیر نیز بنویسیم

$$l = (۲n-۱)\frac{\lambda}{۴} \quad \text{و} \quad \text{به‌ازای} \quad n = ۱, ۲, ۳, \ldots$$



شکل مربوط به نخستین مُد نوسانی

حال اگر مقدار اضافی طول را به l بیافزاییم، برای دو نخستین مُد نوسان خواهیم داشت :

$$\frac{\lambda}{۴} = (l_۱ + c)$$

$$\frac{۳\lambda}{۴} = (l_۲ + c)$$

از دو رابطهٔ بالا می‌توان c را چنین به‌دست آورد :

$$c = \frac{l_۲ - ۳l_۱}{۲}$$

در مورد لوله‌های با دو سرِ باز نیز می‌توانیم شرط تشدید را به‌صورت زیر بنویسیم :

$$l = ۲n\frac{\lambda}{۴} \quad \text{و} \quad \text{به‌ازای} \quad n = ۱, ۲, ۳, \ldots$$

در اینجا نیز می‌توانیم با طول‌های تصحیح شده برای دو نخستین مُد نوسان، c را به‌دست آوریم :

$$\frac{۲\lambda}{۴} = l_۱ + ۲c$$

و

$$\frac{۴\lambda}{۴} = l_۲ + ۲c$$

و از آنجا $c = \frac{l_۲ - ۲l_۱}{۲}$

دانستنی برای معلم

چین (پرده) و فرمت‌های صوتی

مجرای صوتی انسان در واقع لوله‌ای است که یک انتهای آن (در حنجره) بسته و انتهای دیگر آن (در دهان و سوراخ‌های بینی) باز است. اگر امواج صوتی بسامد مناسبی داشته باشند می‌توانند باعث تشدید هوای درون مجرای صوتی گردند. بسامدهای تشدید هوای درون مجرای صوتی را فرمت می‌نامند. صدا را عضلاتی موسوم به چین (پرده) صوتی تولید می‌کنند که در حنجره قرار دارند. وقتی صدا از چین‌های صوتی به مجرای صوتی وارد می‌شود، در صورتی که بسامد صوت تولیدشده توسط چین‌های صوتی با بسامد یکی از این فرمت‌ها منطبق شود، آن صدا برای شنیدن به حدّ کافی بلند است. می‌توان با تغییر بسامد فرمت‌ها از طریق تغییر جای زبان، تغییر میزان باز بودن دهان، یا با گرفتن بینی و... صداهای متنوعی را ایجاد کرد. همچنین می‌توان با تغییر کشش چین‌های صوتی بسامد امواج صوتی را که به درون مجرای صوتی فرستاده می‌شود را تغییر داد. مثلاً خواننده‌های سوپرانو می‌توانند به چین‌های صوتی خود چنان فشاری بیاورند که بسامدی را تولید کنند که با فرمتی از مجرای صوتی که بسامد بالایی دارد منطبق شود. افزون بر این، توجه کنید که بسامد فرمت‌ها به دو عامل بستگی دارد، یکی شکل و طول مجرای صوتی و دیگری تندی صوت در این مجرا. بنابراین اگر مثلاً هوا در مجرای صوتی با مخلوطی از هوا و هلیوم جایگزین شود، با توجه به اینکه تندی صوت بسیار بیشتر می‌شود این موجب افزایش بسامدهای فرمت‌ها می‌شود و بنابراین صدای با بسامد بیشتری تولید می‌شود که دیگر برای ما آشنا نیست، اما انجام این شیرین‌کاری خطرناک است و حتی می‌تواند کشنده باشد.

خوب است در کنار شکل ۴ــ۴۰، تصاویری مانند تصویر زیر را نیز نشان دهید تا دانش‌آموزان با دانش قبلی‌ای که دارند درک بهتری از مفاهیم این بحث پیدا کنند.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

تشدید در بطری و تشدیدگر هلمهولتز : اگر در دهانهٔ باریک یک بطری بدمید، می‌توانید آن را به صدا درآورید (شکل ۴ــ ۴۰). در واقع یک بطری مانند یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز است که بسامدهای تشدیدی معیّنی دارد. وقتی در دهانهٔ یک بطری می‌دمید گسترهٔ وسیعی از بسامدها ایجاد می‌شود. حال اگر یکی از این بسامدها با یکی از بسامدهای تشدیدی بطری منطبق باشد، یک موج صوتی قوی ایجاد می‌شود. البته نوسان‌های بطری دقیقاً مانند نوسان‌هایی نیست که در یک لولهٔ صوتی ساده ایجاد می‌شود، زیرا بطری یک گردن دارد و هوای موجود در این گردن با هوای موجود در بقیهٔ قسمت‌های بطری جرمی موسوم به تشدیدگر هلمهولتز را تشکیل می‌دهد که این موجب نوسانات هوای درون بطری می‌شود. نوع اولیهٔ تشدیدگر هلمهولتز کره‌هایی توخالی با دهانه‌ای باز به شکل یک گردن است که در سال ۱۸۵۰ میلادی توسط دانشمند آلمانی، هرمن فون هلمهولتز، ساخته شد (شکل ۴ــ۴۱). تشدیدگرهای هلمهولتز نیز همانند لوله‌های صوتی بسامدهای تشدیدی معیّنی دارند و هرگاه بسامد یک صوت برابر با یکی از بسامدهای تشدیدی آنها باشد، تشدیدگر پاسخ قوی‌تری به این صوت می‌دهد.

هرمن فون هلمهولتز (۱۸۹۴ــ۱۸۲۱ م.)
در آلمان به دنیا آمد. از بخست به مطالعهٔ زبان‌شناسی و فلسفه پرداخت و سپس به سمت علوم طبیعی گرایش پیدا کرد. وی در سال ۱۸۴۹ دانشیار فیزیولوژی دانشگاه کونیگزبرگ شد. در سال ۱۸۵۵ به استادتمامی رشته‌های آناتومی و فیزیولوژی دانشگاه بُن رسید. سه سال بعد به دانشگاه هایدلبرگ رفت و استاد فیزیولوژی آن دانشگاه شد. آخرین مقام دانشگاهی او، استادی فیزیک در دانشگاه برلین بود که از سال ۱۸۷۱ تا پایان عمر در آنجا خدمت کرد و شاگردان درخشانی چون هانریش هرتز، ویلهلم وین، آلو فوم آلبرت‌مایکلسون، فردریک‌ناتکاک و... تربیت کرد. هلمهولتز نابغه‌ای بزرگ بود که به علوم فیزیولوژی، نورچشم، فیزیک و ریاضی تسلط داشت. برخی از اکتشاف‌های وی عبارتند از اندازه‌گیری سرعت سگنال‌های عصبی، تجزیه و تحلیل حرکت انواع صوتی، نظریهٔ هماهنگ‌های موسیقایی و نظریه‌ای در رنگ‌ها. دستگاه اتالموسکوپ که امروزه در پزشکی از آن برای تشخیص بیماری‌های چشم استفاده می‌شود، از اختراعات اوست.

(ب) (الف)

شکل ۴ــ۴۱ الف) طرحی از تشدیدگر اولیه هلمهولتز و ب) تصویری از چند تشدیدگر هلمهولتز کروی با اندازه‌های متفاوت

شکل ۴ــ۴۰ با دمیدن در دهانهٔ یک بطری، می‌توانید آن را به‌صدا درآورید.

فعالیت ۴ــ۶

یک بلندگو را در برابر دهانهٔ یک تشدیدگر هلمهولتز با بسامدهای تشدیدی معیّن قرار دهید و جلوی زائدهٔ خروجی آن یک شمع روشن یا یک فرفرهٔ کوچک و کم‌اصطکاک بگذارید. بسامد صوت ایجاد شده توسط بلندگو را در نزدیکی بسامد تشدید تشدیدگر آن‌قدر کم و زیاد کنید تا شعلهٔ شمع، منحرف شود و یا فرفره شروع به چرخیدن کند. درصورتی که منبع صوتی با بسامد قابل تنظیم ندارید می‌توانید از چند دیاپازون با بسامدهای معلوم و متفاوت، که بسامد یکی از آنها با یکی از بسامدهای تشدیدی تشدیدگر برابر باشد، استفاده کنید[1]. دلیل آنچه را که مشاهده می‌کنید در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

۱ــ می‌توانید از برنامه‌هایی با نام‌های Signal Generator، Function Generator، Audio Generator و Sound Generator که روی گوشی همراه نصب می‌شوند نیز به‌عنوان منبع صوتی با بسامد قابل تنظیم استفاده کنید.

۱۰۹

خوب است از جنبهٔ تاریخی اشاره شود که هلمهولتز به عنوان یک پزشک تشدیدگرهای خود را نخستین‌بار به این دلیل ساخت که با استفاده از آنها به طریقی ابتدایی نوعی آزمون شنوایی‌سنجی انجام دهد.

محض اطلاعات عمومی خوب است بدانید رابطهٔ بسامد f با قطر دهانه در تشدیدگر هلمهولتز از رابطهٔ زیر به دست می‌آید :

$$f = \frac{n\,v}{۲(L + ۰/۸d)}$$

که در آن L طول لوله، v تندی صوت در هوا، و d قطر دهانهٔ تشدیدگر است.

در این فیلم آزمایش تشدید در تشدیدگر هلمهولتز را با دیاپازن می‌بینید.

فیلم

پاسخ فعالیت ۴ـ۶

همان طور که در متن درس نیز اشاره شده است یک تشدیدگر هلمهوتز بسامدهایی تشدیدی دارد و اگر بسامد صوت ایجادشده توسط بلندگو با یکی از این بسامدهای تشدیدی منطبق شود موجب نوسانات هوای درون بطری (تشدیدگر) می‌شود که این به انحراف شعلهٔ شمع یا چرخاندن فرفره می‌انجامد. (در مورد این فعالیت، فیلمی نیز در سایت گروه گذاشته خواهد شد.) توجه کنید سوراخ انتهای تشدیدگر هلمهوتز گذرگاهی برای انتقال تلاطم ایجاد شده در درون تشدیدگر به فضای بیرون است.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

تشدید در بطری و تشدیدگر هلمهولتز : اگر در دهانهٔ باریک یک بطری بدمید، می‌توانید آن را به صدا درآورید (شکل ۴ـ۴۰). در واقع یک بطری مانند یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز است که بسامدهای تشدیدی معیّنی دارد. وقتی در دهانهٔ یک بطری می‌دمید گستردهٔ وسیعی از بسامدها ایجاد می‌شود. حال اگر یکی از این بسامدها با یکی از بسامدهای تشدیدی بطری منطبق باشد، یک موج صوتی قوی ایجاد می‌شود. البته نوسان‌های بطری دقیقاً مانند نوسان‌هایی نیست که در یک لولهٔ صوتی ساده ایجاد می‌شود، زیرا بطری یک گردن دارد و هوای موجود در این گردن با هوای موجود در بقیهٔ قسمت‌های بطری جیزی موسوم به تشدیدگر هلمهولتز را تشکیل می‌دهد که این موجب نوسانات هوای درون بطری می‌شود. نوع اولیهٔ تشدیدگر هلمهولتز کره‌هایی توخالی با دهانه‌ای باز به شکل یک گردن است که در سال ۱۸۵۰ میلادی توسط دانشمند آلمانی، هرمن فون هلمهولتز، ساخته شد (شکل ۴ـ۴۱). تشدیدگرهای هلمهولتز نیز همانند لوله‌های صوتی بسامدهای تشدیدی معیّنی دارند و هرگاه بسامد یک صوت برابر با یکی از بسامدهای تشدیدی آنها باشد، تشدیدگر پاسخ قوی‌تری به این صوت می‌دهد.

شکل ۴ـ۴۰ با دمیدن در دهانهٔ یک بطری، می‌توانید آن را به‌صدا درآورید.

شکل ۴ـ۴۱ الف) طرحی از تشدیدگر اولیه هلمهولتز و ب) تصویری از چند تشدیدگر هلمهولتز گروی با اندازه‌های متفاوت

(الف) (ب)

فعالیت ۴ـ۶

یک بلندگو را در برابر دهانهٔ یک تشدیدگر هلمهولتز با بسامدهای تشدیدی معیّن قرار دهید و جلوی زائدهٔ خروجی آن یک شمع روشن یا یک فرفرهٔ کوچک و کم‌اصطکاک بگذارید. بسامد صوت ایجاد شده توسط بلندگو را در نزدیکی بسامد تشدیدگر آن‌قدر کم و زیاد کنید تا شعلهٔ شمع، منحرف شود و یا فرفره، شروع به چرخیدن کند. درصورتی که منبع صوتی با بسامد قابل تنظیم ندارید می‌توانید از چند دیاپازون با بسامدهای معلوم و متفاوت، که بسامد یکی از آنها با یکی از بسامدهای تشدیدی تشدیدگر برابر باشد، استفاده کنید[1]. دلیل آنچه را که مشاهده می‌کنید در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

۱ـ می‌توانید از برنامه‌هایی با نام‌های Sound Generator ،Signal Generator ،Function Generator ،Audio Generator و ... که روی گوشی همراه نصب می‌شوند نیز به‌عنوان منبع صوتی با بسامد قابل تنظیم استفاده کنید.

۱۰۹

هرمن فون هلمهولتز (۱۸۹۴ـ۱۸۲۱ م.)
در آلمان به دنیا آمد. او نخست به مطالعه زیان‌شناسی و فلسفه پرداخت و سپس به سمت علوم طبیعی گرایش پیدا کرد. وی در سال ۱۸۴۹ دانشیار فیزیولوژی دانشگاه کونیگزبرگ شد. در سال ۱۸۵۵ به استادی عالی رشته‌های آناتومی و فیزیولوژی دانشگاه بن رسید. سه سال بعد به دانشگاه هایدلبرگ رفت و استاد فیزیولوژی آن دانشگاه شد. آخرین مقام دانشگاهی او، استادی فیزیک در دانشگاه برلین بود که از سال ۱۸۷۱ تا پایان عمر در آنجا خدمت کرد و شاگردان درخشانی چون هانریش هرتز، ویلهم وین، آلوتوم، آلبرت مایکلسون، فردریک شاکی و ... تربیت کرد. هلمهولتز نابغه‌ای بزرگ بود که به علوم فیزیولوژی، تشریح، فیزیک و ریاضی تسلط داشت. برخی از اکتشافات وی عبارتند از: اندازه‌گیری سرعت سیگنال‌های عصبی، تجزیه و تحلیل حرکت امواج صوتی، نظریهٔ هماهنگ‌های موسیقایی و نظریه‌ای در رنگ‌ها. دستگاه اتالموسکوپ که امروزه در پزشکی از آن برای تشخیص بیماری‌های چشم استفاده می‌شود، از اختراعات اوست.

در این فیلم آزمایش تشدید در تشدیدگر هلمهولتز را با دستگاه مولّد نوسان می‌بینید.

فیلم

دانستنی برای معلم

سی‌شی‌ها، پارادوکس بندرگاه و مشابهت آن با بطری هلمهولتز

وقتی یک ظرف درباز، مثل کاسه‌ای حاوی آب را قدم‌زنان حمل می‌کنید، مایع شروع به چلپ و چلوپ می‌کند. ولی حتماً متوجه شده‌اید که گاهی چنان چلپ و چلوپ مایع شدید می‌شود که عنان کار از دستتان خارج می‌شود و آب شروع به سرریز شدن از ظرف می‌کند. در این وضعیت، شما با آهسته کردن قدم‌های خود یا تغییر روش راه رفتن خود می‌توانید احتمال سرریز شدن را کاهش دهید. در واقع وقتی شما راه می‌روید، طرز راه رفتن و چگونگی گرفتن ظرف حاوی آب باعث می‌شود آب به‌صورت افقی و عمودی حرکت کند. یعنی، امواجی در سطح مایع شکل می‌گیرند. اکثر امواج به صورت تصادفی تداخل می‌کنند و امواج ایستاده را تشکیل می‌دهند که در آنها نقش نوسان‌های عمودی تکرار می‌شود. برخی نقاط بیشترین نوسان را دارند و برخی کلاً فاقد هرگونه نوسانی هستند. بسامد اصلی (پایه) نوسان به ابعاد افقی ظرف و عمق آب بستگی دارد. وقتی بسامد قدم‌های شما تقریباً با بسامد اصلی برابر شود، تشدید رخ می‌دهد و در این وضعیت چلپ و چلوپ چنان شدید می‌شود که آب از ظرف سرریز می‌گردد. تغییر نحوهٔ راه رفتن و یا آهسته کردن آن باعث می‌شود که بسامد قدم‌های شما دیگر برابر بسامد اصلی نباشد و بدین ترتیب احتمال سرریز شدن آب کاهش یابد. به‌عنوان یک آزمایش جالب می‌توانید با چوب پارویی پهنی نیز به‌گونه‌ای دیگر این پدیده را مشاهده

کنید. چوب پارویی پهن را در آب وان حمام جلو و عقب ببرید و باعث چلپ و چلوپ آب آن شوید. آنقدر بسامد حرکت پارو را تغییر دهید تا آنکه بسامد اصلی نوسان را به‌دست آورید. از آن پس، چلپ و چلوپ آب چنان قوی می‌شود که حیرت خواهید کرد. مشابه همین چلپ و چلوپ‌ها در کامیون‌های حمل بنزین یا واگن‌های نفتکش نیز می‌تواند رخ دهد و اگر از کنترل خارج شوند می‌تواند موجب ناپایداری خود وسایل نقلیه نیز بشوند که این می‌تواند حتی به تصادف بیانجامد. از همین‌رو، در داخل این وسایل نقلیه ضربه‌گیرهایی نصب شده است تا موجب کاهش چلپ و چلوپ مایع گردند. در یک استخر شنا نیز اگر شناگرها به‌طور هماهنگ و پشت هم در آب بپرند می‌توانند مُد اصلی نوسان را ایجاد کنند و آب را به چلپ و چلوپ بارزی درآورند.

بندرگاه‌ها و آبگیرهای کشندی نیز اگر توسط جزر و مد یا آشفتگی‌هایی نظیر توفان بالا و پایین شوند می‌توانند سی‌شی ایجاد کنند که این می‌تواند خسارت بار باشد. به‌طور کلی میزان نوسان و در نتیجه احتمال تخریب برای بندرگاه‌هایی که دهانهٔ رو به دریای باریک‌تری دارند بیشتر است. یک دلیل آن چیزی است که به آن ***پارادوکس بندرگاه*** می‌گویند. بنابه این پارادوکس، دهانهٔ پهن به انرژی موج ورودی اجازه می‌دهد تا به عقب (یعنی درون دریا) بگریزد، در حالی که یک دهانهٔ باریک عملاً انرژی موج ورودی را به دام می‌اندازد. این کاملاً مشابه امواج صوتی است. اگر در دهانهٔ باریک یک بطری نیمه‌پر نوشابه فوت کنید، می‌توانید یک صوت بلند را در قسمت خالی بطری ایجاد کنید (مانند بطری هلمهولتز) اما اگر در یک بطری با دهانهٔ پهن فوت کنید، تولید این صوت بسیار سخت و حتی غیرممکن است.

فیزیک ۳

پرسش ۴ـ۷

با دمیدن در بطری‌های یکسان با سطوح مایع مختلف می‌توان آهنگی با بسامدهای متفاوت ایجاد کرد. دلیل آن چیست؟

فناوری و کاربرد: امواج ایستاده در اجاق‌های میکروموج

اجاق‌های میکروموج (مایکروفر) بر اساس تداخل امواج الکترومغناطیسی و تشکیل امواج ایستاده کار می‌کنند. بسامد امواج ایستادهٔ ایجاد شده در این اجاق‌ها ۲/۴۵×GHz و طول‌موج آنها حدود ۱۲cm است. میکروموج‌های بازتابیده از دیواره‌های فلزی اجاق با برهم‌نهی با موج‌های تابیده، موج‌های ایستاده‌ای را در داخل محفظهٔ اجاق ایجاد می‌کنند که از گردها و شکم‌ها تشکیل شده‌اند. در محل شکم‌ها دامنهٔ نوسان میدان الکتریکی بیشینه است. مولکول‌های آب موجود در مواد غذایی در این نقاط به‌شدت به ارتعاش درمی‌آیند و بیشترین افزایش دما ایجاد می‌شود. در حالی که در محل گردها، دامنهٔ نوسان میدان الکتریکی صفر است و هیچ نوسان میدان الکتریکی‌ای نداریم که موجب پختن یا گرم شدن مواد غذایی شود و در گردها اصطلاحاً نقاط سرد داریم. بنابراین غذا به‌طور یکنواخت پخته یا گرم نمی‌شود. به همین دلیل اجاق‌های میکروموج صفحه‌های گردانی دارند تا با گرداندن غذا در اجاق، هیچ بخشی از غذا در گرد (نقطهٔ سردی) باقی نماند.

تصویری یک بعدی از ایجاد امواج ایستاده در داخل یک اجاق میکروموج

فعالیت ۴ـ۷

تداخل در امواج الکترومغناطیسی (آزمایش هرتز): اگرچه ماکسول بیش از پایان قرن نوزدهم وجود امواج الکترومغناطیسی را پیش‌بینی کرده بود، این هرتز بود که با آزمایش‌های تداخلی خود که به تولید موج‌های الکترومغناطیسی ایستاده انجامید، وجود موج‌های الکترومغناطیسی را در گسترهٔ بسامد رادیویی اثبات کرد. هایتریش هرتز در سال ۱۸۸۸ میلادی با وسایل ابتدایی آن زمان این آزمایش را به انجام رساند. در مورد چگونگی آزمایش هرتز تحقیق کنید.

۱۱۰

پاسخ پرسش ۴ـ۷

هریک از این بطری‌ها با سطوح مایع متفاوت تشدیدگر هلمهولتز هستند و مانند لوله‌های صوتی بسامدهای تشدیدی معینی دارند. چون سطح مایع در بطری‌ها متفاوت است، بسامد تشدیدی متفاوتی نیز دارند (هرچه سطح مایع درون ظرف ها بالاتر و حجم فضای بالای آنها کمتر باشد بسامد تشدیدی بیشتر است و بالعکس). بنابراین وقتی در دهانهٔ این بطری‌های یک‌شکل می‌دمیم، با ایجاد گسترهٔ وسیعی از بسامدها، یکی از این بسامدها با یکی از بسامدهای تشدیدی بطری‌ها منطبق می‌شود و هر بطری با بسامد متفاوتی به‌صدا درمی‌آید. بنابراین می‌توان آهنگی با بسامدهای متفاوت ایجاد کرد.

فیلم

در این فیلم بسیار زیبا نواختن را با چندین لیوان با سطوح مختلف آب را می‌بینید.

فیزیک ۳

پرسش ۴ـ۷

با دمیدن در بطری‌های یکسان با سطوح مایع مختلف می‌توان آهنگی با بسامدهای متفاوت ایجاد کرد. دلیل آن چیست؟

فناوری و کاربرد: امواج ایستاده در اجاق‌های میکروموج

تصویری یک بُعدی از ایجاد امواج ایستاده در داخل یک اجاق میکروموج

اجاق‌های میکروموج (مایکروفر) بر اساس تداخل امواج الکترومغناطیسی و تشکیل امواج ایستاده کار می‌کنند. بسامد امواج ایستادهٔ ایجاد شده در این اجاق‌ها ۲/۴۵۰GHz و طول‌موج آنها حدود ۱۲cm است. میکروموج‌های بازتابیده از دیواره‌های فلزی اجاق با برهم‌نهی با موج‌های تابیده، موج‌های ایستاده‌ای را در داخل محفظهٔ اجاق ایجاد می‌کنند که از گره‌ها و شکم‌ها تشکیل شده‌اند. در محل شکم‌ها دامنهٔ نوسان میدان الکتریکی بیشینه است. مولکول‌های آب موجود در مواد غذایی در این نقاط به‌شدت به ارتعاش درمی‌آیند و بیشترین افزایش دما ایجاد می‌شود. در حالی که در محل گره‌ها، دامنهٔ نوسان میدان الکتریکی صفر است و هیچ نوسان میدان الکتریکی‌ای نداریم که موجب پختن یا گرم شدن مواد غذایی شود و در گره‌ها اصطلاحاً نقاط سرد داریم. بنابراین غذا به‌طور یکنواخت پخته یا گرم نمی‌شود. به همین دلیل اجاق‌های میکروموج صفحه‌های گردانی دارند تا با گرداندن غذا در اجاق، هیچ بخشی از غذا در گره (نقطهٔ سردی) باقی نماند.

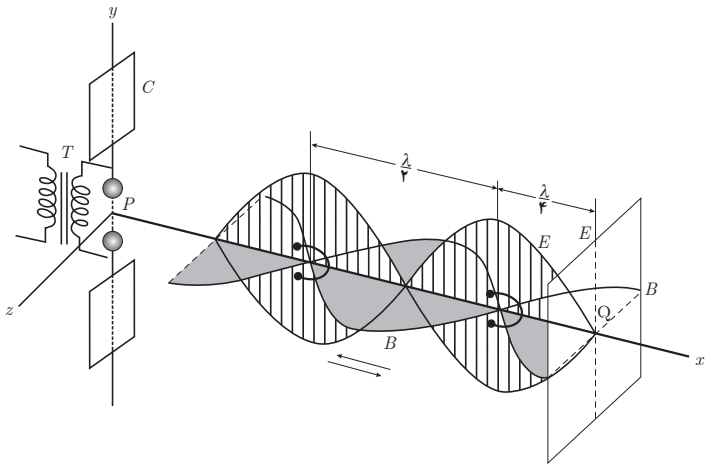
فعالیت ۴ـ۷

تداخل در امواج الکترومغناطیسی (آزمایش هرتز): اگرچه ماکسول پیش از پایان قرن نوزدهم وجود امواج الکترومغناطیسی را پیش‌بینی کرده بود، این هرتز بود که با آزمایش‌های تداخلی خود که به تولید موج‌های الکترومغناطیسی ایستاده انجامید، وجود موج‌های الکترومغناطیسی را در گسترهٔ بسامد رادویی اثبات کرد. هایزیش هرتز در سال ۱۸۸۸ میلادی با وسایل ابتدایی آن زمان این آزمایش را به انجام رسانید. در مورد چگونگی آزمایش هرتز تحقیق کنید.

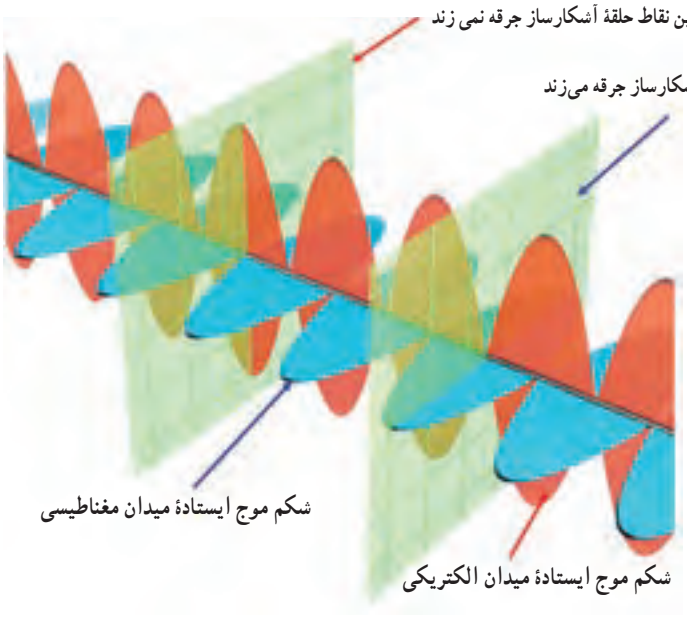
۱۱۰

پاسخ فعالیت ۴ـ۷

نوسانگر هرتز در شکل الف نشان داده شده است. مبدّل T، صفحه‌های فلزی C و C' را باردار می‌کند. این صفحه‌ها از طریق شکاف P تخلیه می شوند و بدین ترتیب یک موج الکترومغناطیسی ایجاد می‌شود. در امتداد خط Px راستای میدان الکتریکی موازی محور y و راستای میدان مغناطیسی موازی با محور z است. هرتز برای مشاهدهٔ این موج‌ها از سیمی که آن را به شکل حلقه درآورده بود و دوسر آن فاصلهٔ کمی از هم داشت، استفاده کرد. اگر صفحهٔ این حلقه عمود بر میدان مغناطیسی موج می‌بود، میدان مغناطیسی متغیر بنا بر قانون القاءِ فاراده نیروی محرکهٔ الکتریکی القایی در حلقه ایجاد می‌کرد و این موجب جرقه زدن دو سر باز حلقه می‌شد. ولی اگر صفحهٔ حلقه با میدان مغناطیسی موازی می‌بود، هیچ نیروی محرکهٔ الکتریکی‌ای القا نمی شد و در نتیجه جرقه‌ای نیز مشاهده نمی شد، هرتز برای ایجاد امواج الکترومغناطیسی ایستاده از سطحی فلزی به‌عنوان بازتاباننده استفاده کرد که این در شکل الف در نقطهٔ Q نشان داده شده است. بنابراین موج الکترومغناطیسی پس از بازتاب از سطح بازتاباننده با برهم‌نهی با موج تابیده، موج‌های ایستادهٔ مغناطیسی و الکتریکی ایجاد می‌کند. نشان داده می‌شود درحالی که موج‌های میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی در مسیر رفت هم‌فازند، در مسیر برگشت کاملاً ناهم‌فازند و بنابراین همان‌طور که در شکل ب با وضوح بیشتری نشان داده شده است شکم‌های موج ایستادهٔ میدان مغناطیسی بر گره‌های موج ایستاده میدان الکتریکی منطبق می‌شود و بالعکس. حال اگر حلقهٔ آشکارساز در گرهٔ موج ایستادهٔ میدان مغناطیسی قرار گیرد، هیچ نیروی محرکهٔ القایی در آن ایجاد نمی‌شود و در نتیجه جرقه‌ای مشاهده نمی‌گردد. ولی اگر حلقه‌ای آشکارساز را در محل شکم‌های موج ایستادهٔ مغناطیسی قرار دهیم، شدیدترین جرقه‌ها را خواهیم داشت. هرتز با حرکت دادن حلقهٔ آشکارساز در امتداد خطّ PQ محل‌های گره‌ها و شکم‌های موج ایستادهٔ میدان مغناطیسی را پیدا کرد. او با اندازه‌گیری فاصلهٔ بین دو گرهٔ متوالی توانست طول موج λ را حساب کند و چون بسامد f نوسان را می‌دانست، با استفاده از رابطهٔ $v=\lambda f$، تندی موج الکترومغناطیسی را که برابر با تندی نور می‌شود، به‌دست آورد. این نخستین مقدار تجربی برای تندی انتشار موج‌های الکترومغناطیسی بود.



الف) طرحی از آزمایش هرتز و تشکیل امواج ایستادهٔ الکترومغناطیسی در آن



ب) طرحی از امواج ایستادهٔ میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی توجه کنید شکم های یکی بر گره‌های دیگری منطبق است.

در این فیلم رفتار یک لامپ در اجاق میکروموج (مایکروفر) را می‌بینید.

فیلم

پرسش‌های پیشنهادی

۱ دو تپ مثلثی یکسان با دامنهٔ A در امتداد یک تار به سمت یکدیگر حرکت می‌کنند. در لحظهٔ نشان داده شده در شکل زیر، نقطهٔ M بین دو تپ قرار دارد. وقتی تپ‌ها از نقطهٔ M بگذرند، دامنهٔ اعوجاج حاصل چقدر می‌شود؟

پاسخ : صفر

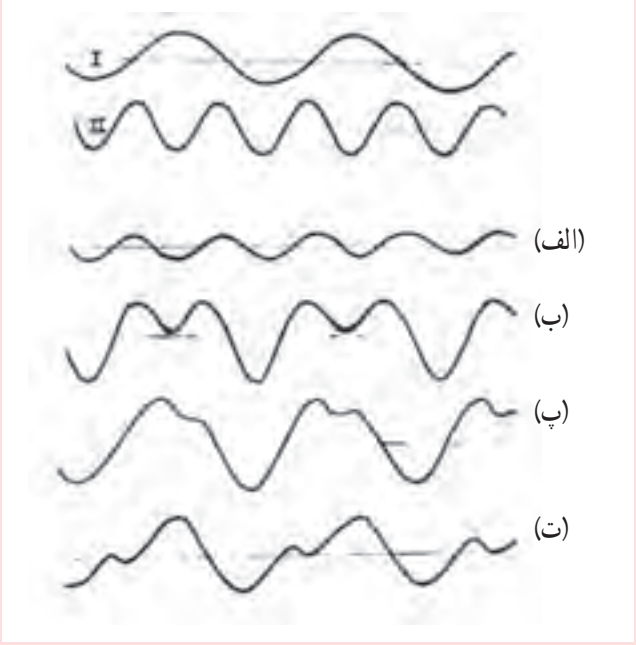
۲ دیاپازنی با بسامد طبیعی مشخص را در بالای یک لولهٔ استوانه‌ای بلندی با ارتفاع مشخص به ارتعاش درمی‌آوریم و در همان حال آب را به آرامی درون لوله می‌ریزیم. چه اتفاقی می‌افتد؟

پاسخ : در ارتفاع خاصی از آب، صدای دیاپازن به‌طور قابل ملاحظه‌ای شدید خواهد شد. زیرا بسامد نوسان طبیعی ستون هوا در لوله با بسامد دیاپازن یکی می‌گردد.

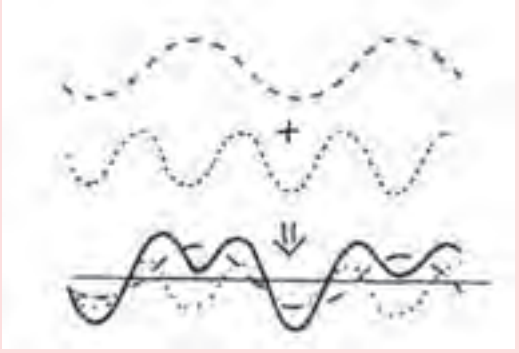
۳ اگر بر فرض آزمایش یانگ در آب انجام شود، پهنای نوارها افزایش می‌یابد یا کاهش؟

پاسخ : پهنای نوارها متناسب با طول موج به‌کار رفته است. چون در داخل آب طول موج λ/n می‌شود، بنابراین کوچک‌تر از طول موج نور به‌کار رفته در خلأ است و بنابراین پهنای نوارها کاهش می‌یابد.

۴ دو موج سینوس I و II برهم نهاده می‌شوند. به گمان شما کدام یک از شکل‌های الف تا ت ممکن است حاصل شود؟

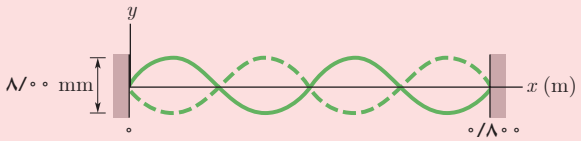


پاسخ : شکل ب. زیرا تقریباً از برهم نهی چنین چیزی حاصل می‌شود.



تمرین پیشنهادی

۱ الف) شکل زیر نقشی از نوسان‌های تشدیدی تاری به طول $L = ۰/۸۰۰\,\mathrm{m}$ و جرم $m = ۲/۵۰۰\,\mathrm{g}$ را نشان می‌دهد که تحت کشش $۳۲۵/۰\,\mathrm{N}$ قرار دارد. الف) طول‌موج موج عرضی‌ای که این نقش موج ایستاده را ایجاد کرده و عدد هماهنگ n چیست؟ ب) بسامد f موج عرضی و نوسان اجزای تار چقدر است؟



پاسخ :

الف) شکل، دو طول موج کامل را در طول $L = ۰/۸۰۰\,\mathrm{m}$ تار نشان می‌دهد. بنابراین داریم :

و یا $۲\lambda = L$

$$\lambda = \frac{L}{۲} = \frac{۰/۸۰۰\,\mathrm{m}}{۲} = ۰/۴۰۰\,\mathrm{m}$$

با شمردن تعداد حلقه‌ها (یا نیم ــ طول موج‌ها) در شکل درمی‌یابیم که عدد هماهنگ $n=۴$ است.

ب) بسامد را از رابطهٔ $f=v/\lambda$ به‌دست می‌آوریم که در آن

$$v=\sqrt{\frac{F}{\mu}}=\sqrt{\frac{F}{m/L}}=\sqrt{\frac{FL}{m}}=\sqrt{\frac{(۳۲۵\text{N})(۰/۸۰۰\text{ m})}{۲/۵۰\times۱۰^{-۳}\text{kg}}}=۳۲۲/۴۹\text{ m/s}$$

آنگاه برای بسامد f خواهید داشت :

$$f=\frac{v}{\lambda}=\frac{۳۲۲/۴۹\text{ m/s}}{۰/۴۰۰\text{ m}}=۸۰۶/۲\text{ Hz}\approx۸۰۶\text{ Hz}$$

روش دیگر آن بود که مستقیماً از معادلهٔ ۴ــ۵ استفاده کنیم :

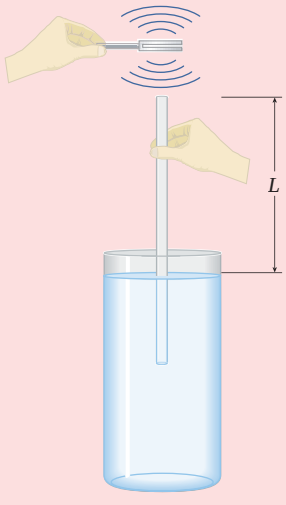
$$f=n\frac{v}{۲L}=۴\frac{۳۲۲/۴۹\text{ m/s}}{۲(۰/۸۰۰)\text{m}}\approx۸۰۶\text{ Hz}$$

فعالیت‌های پیشنهادی

۱ بررسی پدیدهٔ تشدید در لوله‌های صوتی بسته

وسایل مورد نیاز : پنج عدد دیاپازن با بسامدهای متفاوت، جعبهٔ دیاپازن، کوبهٔ پلاستیکی دیاپازن، لولهٔ شیشه‌ای به قطر ۲ یا ۳ سانتی‌متر، ظرف استوانه‌ای

روش آزمایش : ظرف استوانه‌ای را پر از آب کنید و لولهٔ شیشه‌ای را در آن قرار دهید. بدیهی است سطح آب در لوله و ظرف یکی خواهد شد. با بالا و پایین بردن لوله می‌توانید طول ستون هوای درون لوله را به مقدار دلخواهی تنظیم کنید. اکنون اگر شاخه‌های یک دیاپازن مرتعش را در بالای دهانه لوله قرار دهیم، ممکن است صدای ضعیفی به گوش برسد. در صورتی که چنین صدایی به گوش برسد حاکی از آن است که بسامد طبیعی ستون هوا برابر با بسامد دیاپازن شده است. با درنظر گرفتن اینکه همیشه در سر باز لوله یک شکم پدید می‌آید و قسمت انتهای لوله نیز جای گرهٔ موج است و با دانستن این مطلب که فاصلهٔ دو گره و یا دو شکم متوالی برابر نصف طول موج است می‌توان طول‌های ستون هوایی که به تشدید می‌انجامد را تعیین کرد.

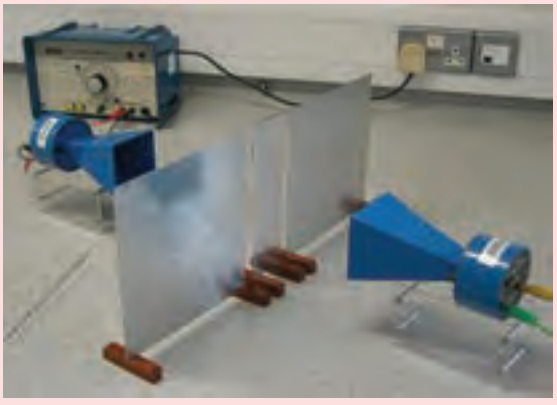


۲ بررسی پدیدهٔ تشدید در لوله‌های صوتی باز

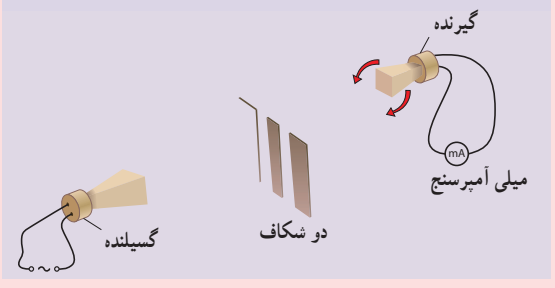
دو لولهٔ دوسر باز را انتخاب کنید که یکی بتواند در داخل دیگری بالا و پایین برود. در این صورت می‌توان طول لوله را به دلخواه تغییر داد و آن را طوری تنظیم کرد که هوای درون لوله بر اثر ارتعاشات شاخهٔ دیاپازن به تشدید درآید. در این صورت با توجه به اینکه همیشه دو سر لولهٔ باز محل تشکیل شکم نوسان‌ها است، طول لوله را برای ایجاد تشدید می‌توان به سادگی محاسبه کرد.

۳ تداخل برای امواج میکروموج

آزمایش تداخل دوشکافی یانگ را می‌توان برای امواج الکترومغناطیسی میکروموج نیز انجام داد. روش کار به این ترتیب است که گسیلندهٔ امواج میکروموج را مطابق شکل الف در برابر یک صفحهٔ دو شکافی قرار می‌دهند. توجه کنید هم گسیلنده و هم گیرندهٔ امواج در فاصلهٔ مناسبی از صفحهٔ شکاف‌ها قرار گیرند. شکل ب طرحی از اسباب انجام این آزمایش را نشان می‌دهد. با استفاده از این اسباب نیز می‌توان طول موج میکروموج را تعیین کرد.



الف) اسباب آزمایش دو شکافی برای موج الکترومغناطیسی میکروموج



ب) طرحی از اسباب این آزمایش و چگونگی انجام آن

۴ لولهٔ روبین

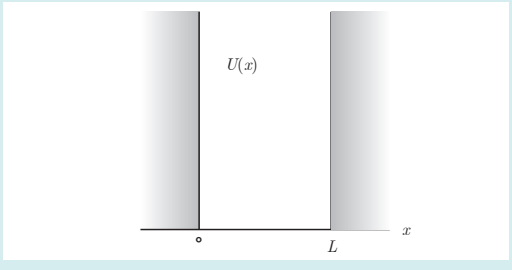
با کمک دبیر خود بکوشید با وسایل سادهٔ آزمایشگاه یک لولهٔ روبین را که توضیح آن در صفحهٔ ۲۴۹ درست کنید و حدّ شکم‌ها و محلّ گره‌های موج را تعیین کنید.

دانستنی برای معلم

موج‌های ایستاده رهیافتی مناسب به مبحث فیزیک کوانتومی

با توجه به اینکه فصل ۵ به مقدمات فیزیک کوانتومی می‌پردازد، بد ندانستم پایان مباحث فصل ۴ را به رهیافتی اختصاص بدهم که برخی کتاب‌ها از آن طریق وارد مبحث فیزیک کوانتومی می‌شوند. اگر طول تار مرتعش نامحدود باشد، می‌توانیم موج پیشرونده را با هر بسامدی روی آن ایجاد کنیم. ولی دیدیم اگر دوسر آن به جایی بسته شده باشد و طول آن محدود گردد، فقط می‌توانیم روی آن موج‌های ایستاده ایجاد کنیم که این موج‌های ایستاده فقط می‌توانند بسامدهای گسسته‌ای داشته باشند. به عبارت دیگر، محدود کردن موج به ناحیهٔ محدودی از فضا به ***کوانتیده کردن*** حرکت و وجود حالت‌های گسستهٔ موج می‌انجامد که در هر حالت بسامد کاملاً مشخصی دارد و به این اصطلاحاً ***اصل محدودیت*** می‌گویند. در سال ۱۹۲۴ فیزیکدان فرانسوی *لویی دوبروی* بیان کرد همان‌طور که یک باریکهٔ نور موج است، ولی انرژی و تکانه را از طریق فوتون‌ها منتقل می‌کند، یک الکترون متحرک (یا هر ذره دیگر را) را هم می‌توان به‌صورت یک موج ماده درنظر گرفت که انرژی و تکانه را به ماده‌ای دیگر منتقل می‌کند. بخصوص دوبروی پیشنهاد کرد که رابطهٔ $\lambda=h/p$ را که در آن h ثابت پلانک و p تکانه است، برای طول موج آنها به‌کار برد. پیش‌بینی دوبروی در سال ۱۹۲۷ توسط داویسون و جرمر به‌طور تجربی ثابت شد. بنابراین اصل محدودیت را برای موج‌های ماده نیز می‌توان به‌کار برد. موج مادهٔ یک الکترون متحرک که تحت تأثیر هیچ نیروی خالصی نیست (اصطلاحاً ذرهٔ آزاد) می‌تواند هر مقداری از انرژی داشته باشد که این شبیه تاری با طول نامتناهی است که می‌تواند هر بسامدی داشته باشد. ولی اگر الکترونی را بررسی کنیم که تحت تأثیر نیروی جاذبهٔ کولنی بین خود و هستهٔ باردار مثبت است، انرژی الکترون فقط می‌تواند در حالت‌های خاصی باشد که هر یک انرژی گسسته‌ای مربوط به خود را دارند که این شبیه یک تار کشیده با طول محدود است. در یک تار با طول محدود، نقش‌های گسستهٔ موج ایستاده آنهایی هستند که برای آنها طول L تار مضرب صحیحی از نصف طول موج ($L= n\lambda/۲$) است که به زبان فیزیک کوانتومی، اصطلاحاً به n عدد کوانتومی گفته می‌شود.

آنگاه هر جابه‌جایی عرضی تار در هر مکان x از رابطهٔ $y_n(x) = A\sin(n\pi x/L)$ به‌دست می‌آید. در مورد یک موج ماده نیز می‌توان آن را اصطلاحاً در تله‌ای محصور کرد، طوری که در حالت یک بعدی به‌ازای $0 < x < L$، $U = 0$ و به‌ازای $x < 0$ و $x > L$، $U \to \infty$ میل کند که این همان چیزی است که به آن چاه پتانسیل نامتناهی می‌گوییم (شکل زیر).



انرژی پتانسیل الکتریکی $U(x)$ الکترون محصور در یک تلهٔ آرمانی.
می‌بینیم که به‌ازای $0 < x < L$، $U = 0$ و به‌ازای $x < 0$ و $x > L$، $U \to \infty$.

دیدیم طول موج دوبروی $\lambda = h/p$ تعریف می‌شود و چون الکترون غیرنسبیتی است، p را می‌توان به صورت $p = \sqrt{۲mK}$ نوشت که m جرم الکترون و K انرژی جنبشی آن است. در $0 < x < L$، $U = 0$ است و بنابراین $K = E$ می‌شود و داریم

$\lambda = h/\sqrt{۲mE}$ و پیش‌تر دیدیم که $L = n\lambda/۲$ است. بنابراین خواهیم داشت

$$E_n = (\frac{h^۲}{۸mL^۲})n^۲ \ , n = ۱, ۲, ۳, \ldots$$

پس، دریافتیم که چون الکترون در تله‌ای به دام افتاده است، فقط می‌تواند انرژی‌هایی داشته باشد که با این معادله داده می‌شود و نمی‌تواند هر مقداری را اختیار کند. این نتیجه را به‌راحتی می‌توان به چاه‌های دو و سه‌بُعدی نیز تعمیم داد.

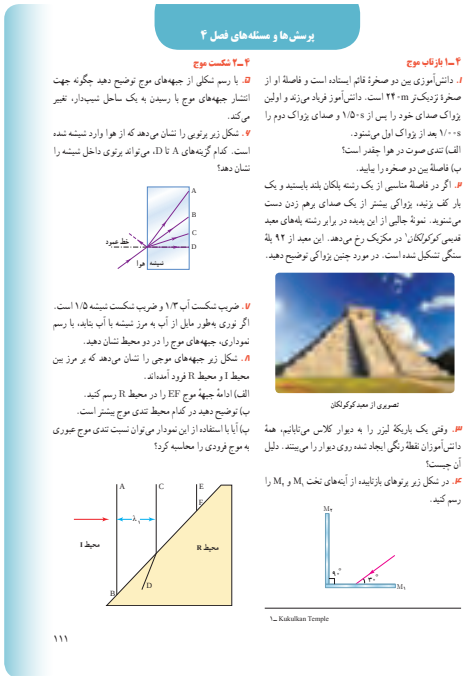
جالب است اگر اگر معادلهٔ شرودینگر را برای الکترونی که در چاه پتانسیل نامتنهای یک ــ بُعدی به پهنای L گیر افتاده است حل کنیم، برای توابع موج الکترون به رابطهٔ زیر می‌رسیم :

$$y_n = A \sin(n\pi x/L) \ , n = ۱, ۲, ۳, \ldots$$

که همان جابه‌جایی عرضی تار محدود در هر مکان x است. یعنی همان‌طور که پیش‌تر هم اشاره کردیم الکترون به دام افتاده در چاه پتانسیل یک بُعدی نامتناهی را می‌توان شبیه یک موج مادهٔ ساکن در نظر گرفت. توجه کنید که با همین شبیه‌سازی ساده می‌توانیم بسیاری دیگر از مفاهیم مکانیک کوانتومیِ ظاهراً خارج از محدودهٔ کتاب‌های درسی، مانند احتمال آشکارسازی که با چگالی احتمال $\Psi_n^۲(x)$ داده می‌شود و اصل بهنجارش را به دانش‌آموزان تفهیم کنیم. جالب است که حتی می‌توان انرژی نقطهٔ صفر را بیان کرد، و با توجه به اینکه به ازای $n = ۰$، $E_n = ۰$ و $\Psi_n^۲(x) = ۰$ می‌شود، می‌توان این بحث را مطرح کرد که این نتیجه به معنی آن است که هیچ الکترونی در چاه وجود ندارد و چون می‌دانیم که وجود دارد، بنابراین $n = ۰$ قابل قبول نیست و انرژی نقطهٔ صفر که کمترین انرژی مجاز الکترون است مربوط به $n = ۱$ است.

همین روش دلیل اصلی عدم موفقیت مدل بور را نیز توضیح می‌دهد. چراکه الکترونی که در اتم به دام افتاده است، در واقع موج ماده محصور در چاه پتانسیل است و برای یافتن مقادیر انرژی کوانتیده حاصل باید معادلهٔ شرودینگر را به کار برد.

راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴


پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴

۴ـ۱ بازتاب موج

۱. دانش‌آموزی بین دو صخرهٔ قائم ایستاده است و فاصلهٔ او از صخرهٔ نزدیک‌تر ۲۴۰m است. دانش‌آموز فریاد می‌زند و اولین پژواک صدای خود را پس از ۱/۵۰s و صدای پژواک دوم را ۱/۰۰s بعد از پژواک اول می‌شنود.
الف) تندی صوت در هوا چقدر است؟
ب) فاصلهٔ بین دو صخره را بیابید.

۲. اگر در فاصلهٔ مناسبی از یک رشته پلکان بلند بایستید و یک بار کف بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای برهم زدن دست می‌شنوید. نمونهٔ جالبی از این پدیده در برابر رشته پله‌های معبد قدیمی کوکولکان[1] در مکزیک رخ می‌دهد. این معبد از ۹۲ پلهٔ سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.

تصویری از معبد کوکولکان

۳. وقتی یک باریکهٔ لیزر را به دیوار کلاس می‌تابانیم، همهٔ دانش‌آموزان نقطهٔ رنگی ایجاد شده روی دیوار را می‌بینند. دلیل آن چیست؟

۴. در شکل زیر پرتوهای بازتابیده از آینه‌های تخت M_1 و M_2 را رسم کنید.

۱ـ Kukulkan Temple

۴ـ۲ شکست موج

۵. با رسم شکلی از جبهه‌های موج توضیح دهید چگونه جهت انتشار جبهه‌های موج با رسیدن به یک ساحل شیب‌دار، تغییر می‌کند.

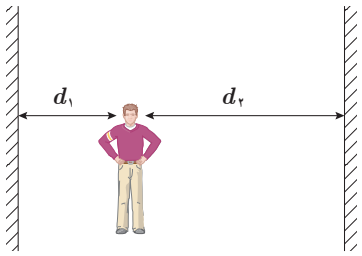
۶. شکل زیر پرتوی را نشان می‌دهد که از هوا وارد شیشه شده است. کدام گزینه‌های A تا D، می‌تواند پرتوی داخل شیشه را نشان دهد؟

۷. ضریب شکست آب ۱/۳ و ضریب شکست شیشه ۱/۵ است. اگر توری به‌طور مایل از آب به مرز شیشه با آب بتابد، با رسم نموداری، جبهه‌های موج را در دو محیط نشان دهید.

۸. شکل زیر جبهه‌های موجی را نشان می‌دهد که بر مرز بین محیط I و محیط R فرود آمده‌اند.
الف) ادامهٔ جبههٔ موج EE′ را در محیط R رسم کنید.
ب) توضیح دهید در کدام محیط تندی موج بیشتر است.
پ) آیا با استفاده از این نمودار می‌توان نسبت تندی موج عبوری به موج فرودی را محاسبه کرد؟

۱۱۱

۱ در واقع شکلی مانند شکل زیر داریم، به‌طوری که d_1 فاصلهٔ شخص از صخرهٔ نزدیک‌تر و d_2 فاصلهٔ شخص از صخرهٔ دورتر است.



بدیهی است که پژواک صدای اول مربوط به صخرهٔ نزدیک‌تر و زمان دریافت آن ۱/۵۰s پس از فریاد زدن و پژواک صدای دوم مربوط به صخرهٔ دورتر و زمان دریافت آن ۲/۵۰s =۱/۵۰s +۱/۰۰s پس از فریاد زدن است. چون مسافت پیموده شده در هر پژواک $2d$ است، به ترتیب داریم :

$$2d_1 = vt_1 \quad , \quad 2d_2 = vt_2$$

(الف) تندی صوت را از رابطهٔ اول به‌دست می‌آوریم

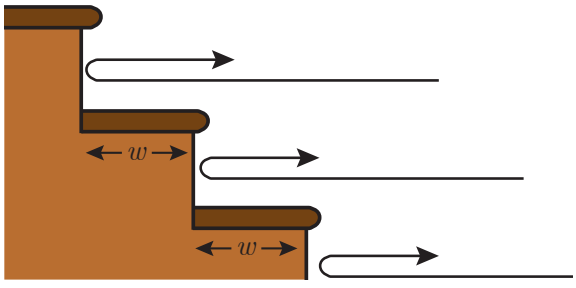
$$v = \frac{2d_1}{t_1} = \frac{480\,\text{m}}{1/50\,\text{s}} = 320\,\text{m/s}$$

(ب) اکنون با دانستن تندی v می‌توانیم با استفاده از رابطهٔ دوم، d_2 را محاسبه کنیم :

$$d_2 = \frac{vt_2}{2} = \frac{(320\,\text{m/s})(2/50\,\text{s})}{2} = 400\,\text{m}$$

پس فاصلهٔ بین دو صخره $d = d_1 + d_2 = 640\,\text{m}$ است.

۲ اگر فاصلهٔ شما از پلکان به حدّ کافی زیاد باشد، به‌طوری که بتوان مانند شکل زیر مسیر تپ‌های متوالی را تقریباً موازی در نظر گرفت، شما بسامد ثابتی برای رشته تپ‌های متوالی درک می‌کنید.



مثلاً اگر پهنای هر پله $w = 0/750\,\text{m}$ باشد، بسامد ادراکی

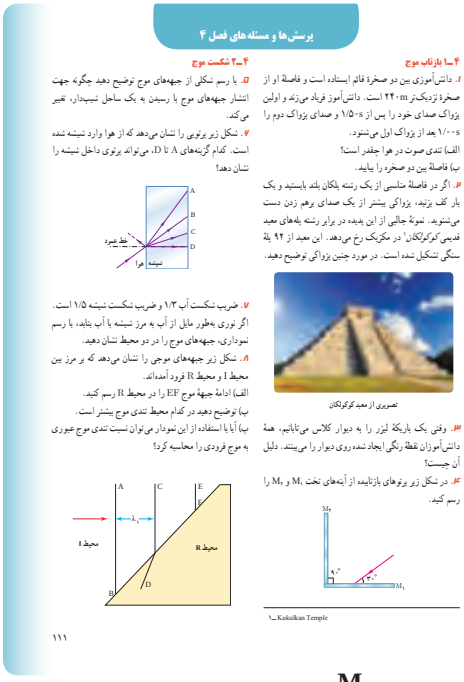
$$f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{v}{2w} = \frac{340\,\text{m/s}}{2(0/75\,\text{m})} = 2/27 \times 10^2\,\text{Hz} \approx 2/3 \times 10^2\,\text{Hz}$$

یا به عبارتی ۲۳۰Hz می‌شود. این صدا به‌صورت رشته‌ای دوره‌ای از تپ‌ها بازمی‌گردد و مانند یک نُت نواخته شده درک می‌شود. بدیهی است اگر پهنای پله‌ها کوچک‌تر باشد، با توجه به اینکه $f\alpha\frac{1}{w}$ است، بسامد ادراک‌شده بیشتر می‌شود.

البته در واقع امر، مسیر تپ‌های متوالی که هر کدام از یک پله نشأت گرفته‌اند، موازی نیست و بسامد ثابتی را برای رشته تپ‌های متوالی درک نمی‌کنید؛ بلکه گستره‌ای از بسامدها را درک می‌کنید که به تدریج کم می‌شوند. به‌طوری که بسامد دریافتی از پله‌های پایینی (که تپ‌های بازتابیده از آنها را زودتر می‌شنویم) بیشتر از بسامد دریافتی از پله‌های بالایی است (که تپ‌های بازتابیده از آنها را دیرتر می‌شنویم) و بدین ترتیب صدا را به‌صورت رشته‌ای دوره‌ای از تپ‌ها می‌شنوید.

۳ همان‌طور که در متن کتاب اشاره شد، این ناشی از بازتاب پخشنده است.

۴ شکلی مانند شکل زیر خواهیم داشت.


پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴

۴ـ۱ بازتاب موج

۱. دانش‌آموزی بین دو صخرهٔ قائم ایستاده است و فاصلهٔ او از صخرهٔ نزدیک‌تر ۲۴۰m است. دانش‌آموز فریاد می‌زند و اولین پژواک صدای خود را پس از ۱/۵۰s و صدای پژواک دوم را ۱/۰۰s بعد از پژواک اول می‌شنود.
الف) تندی صوت در هوا چقدر است؟
ب) فاصلهٔ بین دو صخره را بیابید.

۲. اگر در فاصلهٔ مناسبی از یک رشته پلکان بلند بایستید و یک بار کف بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای برهم زدن دست می‌شنوید. نمونهٔ جالبی از این پدیده در برابر رشته پله‌های معبد قدیمی کوکولکان[1] در مکزیک رخ می‌دهد. این معبد از ۹۲ پلهٔ سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.

تصویری از معبد کوکولکان

۳. وقتی یک باریکهٔ لیزر را به دیوار کلاس می‌تابانید، همهٔ دانش‌آموزان نقطهٔ رنگی ایجاد شده روی دیوار را می‌بینند. دلیل آن چیست؟

۴. در شکل زیر پرتوهای بازتابیده از آینه‌های تخت M_1 و M_2 را رسم کنید.

۱ـ Kukulkan Temple

۴ـ۲ شکست موج

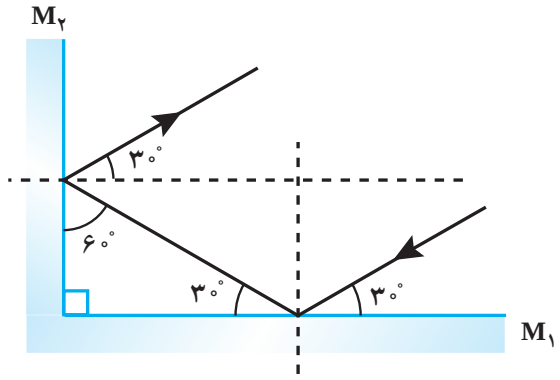
۵. با رسم شکلی از جبهه‌های موج توضیح دهید چگونه جهت انتشار جبهه‌های موج با رسیدن به یک ساحل شیبدار، تغییر می‌کند.

۶. شکل زیر پرتویی را نشان می‌دهد که از هوا وارد شیشه شده است. کدام گزینه‌های A تا D، می‌تواند پرتوی داخل شیشه را نشان دهد؟

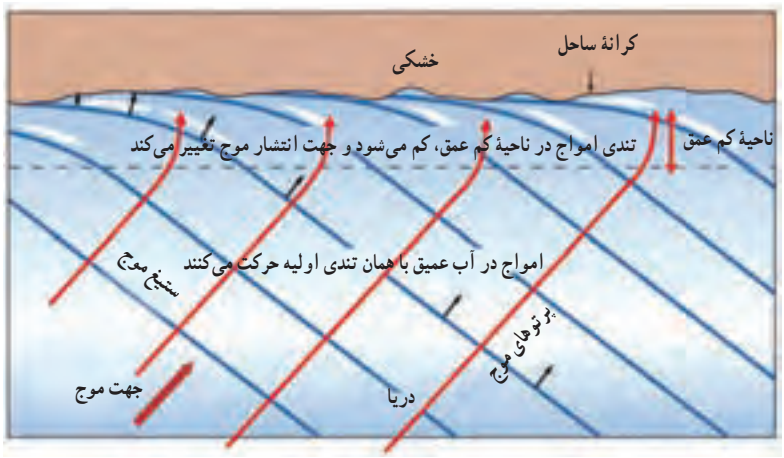
۷. ضریب شکست آب ۱/۳ و ضریب شکست شیشه ۱/۵ است. اگر توری به‌طور مایل از آب به مرز شیشه با آب بتابد، با رسم نموداری، جبهه‌های موج را در دو محیط نشان دهید.

۸. شکل زیر جبهه‌های موجی را نشان می‌دهد که بر مرز بین محیط I و محیط R فرود آمده‌اند.
الف) ادامهٔ جبههٔ موج EF را در محیط R رسم کنید.
ب) توضیح دهید در کدام محیط تندی موج بیشتر است.
پ) آیا با استفاده از این نمودار می‌توان نسبت تندی موج عبوری به موج فرودی را محاسبه کرد؟

۱۱۱

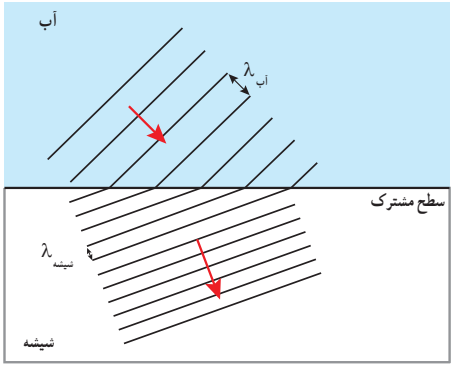


۵ شکلی مانند شکل زیر خواهیم داشت. با نزدیک شدن امواج به یک ساحل شیبدار و رسیدن جبهه‌های موج به ساحل که در آنجا عمق آب کم می‌شود، جهت انتشار موج تغییر می‌کند. به عبارتی، با ورود امواج از ناحیهٔ عمیق به ناحیهٔ کم‌عمق، تندی آنها کم می‌شود.



۶ شیشه ضریب شکست بزرگ‌تری نسبت به هوا دارد. بنابراین انتظار می‌رود که پرتوی شکسته شده در شیشه به خطّ عمود نزدیک شود. بنابراین پرتوی A نمی‌تواند درست باشد، زیرا از خطّ عمود دور شده است. اگر نور از شیشه وارد هوا می‌شد، این گزینهٔ درستی بود. پرتوی B نیز پاسخ درستی نیست، زیرا این پرتو خم نشده است و در امتداد پرتوی فرودی است. پرتوی C پاسخ درست است زیرا به سمت خطّ عمود کج شده است. ولی چرا پرتوی D نادرست است. توجه کنید که برای این پرتو، زاویهٔ شکست $\theta_r = 0^\circ$ است و بنابراین $\sin\theta_r = 0$ خواهد که این قانون اسنل را نقض می‌کند که در اینجا بیان می‌دارد $n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_r$.

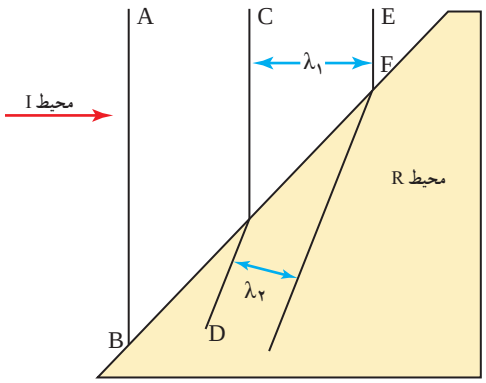
۷ شکلی مطابق شکل زیر خواهیم داشت (البته در این شکل فاصلهٔ بین جبهه‌های موج در دو محیط به مقیاس نیست، ولی در هر حال، $\lambda_{\text{آب}} > \lambda_{\text{شیشه}}$ است).



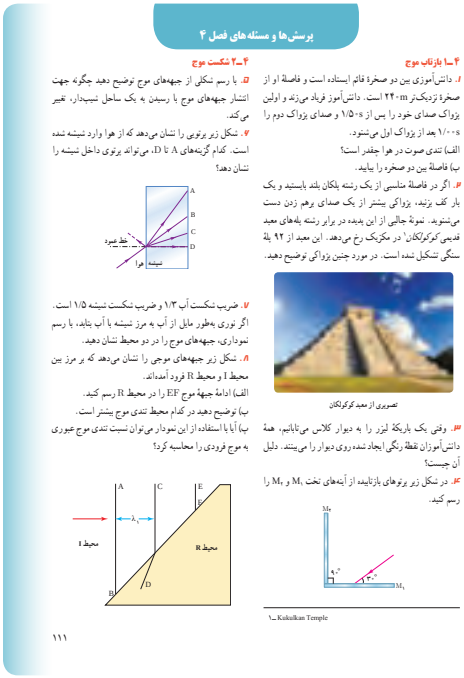
۸ الف) ادامهٔ موج EF، پرتوی شکسته شده در محیط B است که باید موازی با D باشد. به عبارتی، پرتوهای شکسته باید موازی هم باشند.

ب) با عبور موج از محیطی به محیط دیگر، بسامد موج تغییر نمی‌کند. بنابراین نسبت $\frac{v}{\lambda}$ ثابت می‌ماند و داریم

$$\frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2} \Rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$



از روی شکل درمی‌یابیم که $\lambda_2 < \lambda_1$ و بنابراین $v_2 > v_1$ است. به عبارتی با دانستن فاصلهٔ بین جبهه‌های موج در دو محیط می‌توان دربارهٔ نسبت تندی موج در دو محیط اظهار نظر کرد. مثلاً برای شکل داده شده در این مسئله نسبت λ_1 به λ_2 تقریباً ۱/۶ می‌شود که همان نسبت v_1 به v_2 نیز هست.



پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴

۴ـ۱ بازتاب موج

۱. دانش‌آموزی بین دو صخرهٔ قائم ایستاده است و فاصلهٔ او از صخرهٔ نزدیک‌تر ۲۴۰ m است. دانش‌آموز فریاد می‌زند و اولین پژواک صدای خود را پس از ۱/۵۰ s و صدای پژواک دوم را ۱/۰۰ s بعد از پژواک اول می‌شنود.
الف) تندی صوت در هوا چقدر است؟
ب) فاصلهٔ بین دو صخره را بیابید.

۲. اگر در فاصلهٔ مناسبی از یک رشته پلکان بلند بایستید و یک بار کف بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای برهم زدن دست می‌شنوید. نمونهٔ جالبی از این پدیده در برابر رشته پله‌های معبد قدیمی کوکولکان[1] در مکزیک رخ می‌دهد. این معبد از ۹۲ پلهٔ سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.

تصویری از معبد کوکولکان

۳. وقتی یک باریکهٔ لیزر را به دیوار کلاس می‌تابانیم، همهٔ دانش‌آموزان نقطهٔ رنگی ایجاد شده روی دیوار را می‌بینند. دلیل آن چیست؟

۴. در شکل زیر پرتوهای بازتابیده از آینه‌های تخت M_1 و M_2 را رسم کنید.

۴ـ۲ شکست موج

۵. با رسم شکلی از جبهه‌های موج توضیح دهید چگونه جهت انتشار جبهه‌های موج با رسیدن به یک ساحل شیب‌دار، تغییر می‌کند.

۶. شکل زیر پرتویی را نشان می‌دهد که از هوا وارد شیشه شده است. کدام گزینه‌های A تا D، می‌تواند پرتوی داخل شیشه را نشان دهد؟

۷. ضریب شکست آب ۱/۳ و ضریب شکست شیشه ۱/۵ است. اگر توری به‌طور مایل از آب به مرز شیشه با آب بتابد، با رسم نموداری، جبهه‌های موج را در دو محیط نشان دهید.

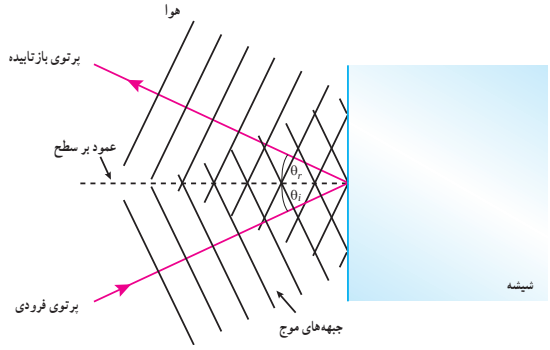
۸. شکل زیر جبهه‌های موجی را نشان می‌دهد که بر مرز بین محیط I و محیط R فرود آمده‌اند.
الف) ادامهٔ جبههٔ موج EF را در محیط R رسم کنید.
ب) توضیح دهید در کدام محیط تندی موج بیشتر است.
پ) آیا با استفاده از این نمودار می‌توان نسبت تندی موج عبوری به موج فرودی را محاسبه کرد؟

۱۱۱

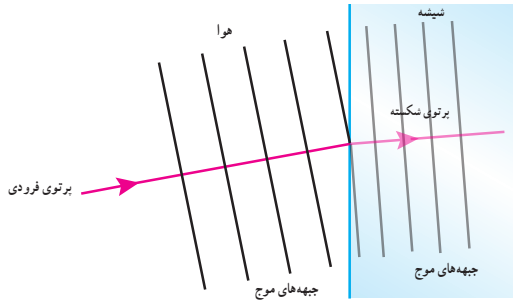
۱ـ Kukulkan Temple

۹ الف) برای موج شکسته، به جز بسامد سایر مشخصه‌ها با موج فرودی متفاوت است. چرا که تندی و طول موج (همان‌طور که در تمرین ۸ هم دیدیم) تغییر می‌کنند و این دو به ضریب شکست بستگی دارند. در حالی که برای موج بازتابیده، بسامد، طول موج و تندی با موج فرودی برابر است.

ب) امتداد پرتوها بر اثر شکست تفاوت پیدا می‌کند. شکل پرتویی این مسئله را در تمرین ۶ مشاهده کردیم و گفتیم که پرتوی شکسته شده باید به خطّ عمود نزدیک شود. در حل چنین مسائلی نخست پرتوی موج را رسم کنید و سپس جبهه‌های موج را به‌گونه‌ای رسم کنیم که این پرتو عمود بر آنها باشد. در مورد جبهه‌های موج بازتابیده، چون در خود محیط بازتابیده می‌شوند، فاصلهٔ خطوط تغییر نمی‌کند و بنابراین برای موج بازتابیده شکلی مانند زیر خواهیم داشت.



برای جبهه‌های موج شکست یافته نیز نخست یک پرتوی شکست یافته را رسم می‌کنیم و سپس جبهه‌های موج مربوط به آن را نشان می‌دهیم. توجه کنید که فاصلهٔ جبهه‌های موج در شیشه، کوتاه‌تر است.



۱۰ الف) بسامد را از رابطهٔ $f=v/\lambda$ محاسبه می‌کنیم که در آن $v=c$ تندی نور است :

$$f=\frac{v}{\lambda}=\frac{c}{\lambda_{\circ}}=\frac{۳/۰۰\times۱۰^{۸}\,m/s}{۶۳۳\times۱۰^{-۹}\,m}=۴/۷۳۹\times۱۰^{۱۴}\,Hz\approx۴/۷۴\times۱۰^{۱۴}\,Hz$$

ب)

$$n=\frac{\lambda_{\circ}}{\lambda}=\frac{۶۳۳\times۱۰^{-۹}\,m}{۴۷۴\times۱۰^{-۹}\,m}=۱/۳۳۵\approx۱/۳۴$$

فیزیک ۳

۹. در شکل زیر موج نوری فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط بازمی‌تابد و بخشی دیگر شکست می‌یابد و وارد شیشه می‌شود.
الف) مشخصه‌های موج بازتابیده و موج شکست‌یافته را با موج فرودی مقایسه کنید.
ب) جبهه‌های موج بازتابیده و شکست‌یافته را رسم کنید.

۱۰. طول موج نور قرمز لیزر هلیم ـ نئون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجهٔ چشم ۴۷۴nm است. الف) بسامد این نور چقدر است؟ ب) ضریب شکست زجاجیه برای این نور چقدر است؟ پ) تندی این نور در زجاجیه را محاسبه کنید.

۱۱. سکه‌ای را در گوشهٔ فنجانی خالی قرار دهید و طوری مقابل آن قرار گیرید که نتوانید سکه را ببینید. بدون این‌که سرتان را حرکت دهید به‌آرامی در فنجان آب بریزید، به‌طوری که آب ریختن شما موجب جابه‌جایی سکه نشود. با پرشدن فنجان، سکه را خواهید دید. با رسم پرتوها علت دیده شدن سکه را توضیح دهید.

۱۲. مطابق شکل، پرتو نوری که از ماهی به چشمان شخص می‌رسد تحت زاویهٔ ۶۰° به مرز آب ـ هوا برخورد کرده است. زاویهٔ شکست این پرتو در هوا چقدر است؟

۱۳. در شکل‌های زیر، پرتوی فرودی که شامل نورهای قرمز و آبی است از شیشه وارد هوای رقیق شده است. کدام شکل، شکستی را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟

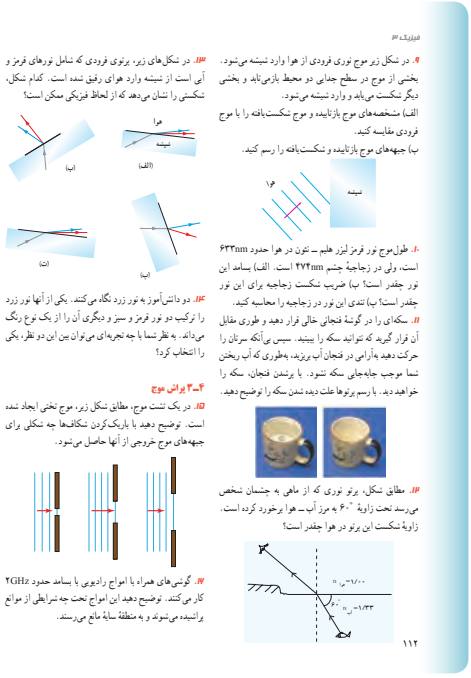
۱۴. دو دانش‌آموز به نور زرد نگاه می‌کنند. یکی از آنها نور زرد را ترکیب دو نور قرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می‌داند. به نظر شما با چه تجربه‌ای می‌توان بین این دو نظر، یکی را انتخاب کرد؟

۴ـ۳ پراش موج

۱۵. در یک تشت موج، مطابق شکل زیر، موج تختی ایجاد شده است. توضیح دهید با باریک‌کردن شکاف‌ها چه شکلی برای جبهه‌های موج خروجی از آنها حاصل می‌شود.

۱۶. گوشی‌های همراه با امواج رادیویی با بسامد حدود ۲GHz کار می‌کنند. توضیح دهید این امواج تحت چه شرایطی از موانع پراشیده می‌شوند و به منطقهٔ سایهٔ مانع می‌رسند.

۱۱۲


فیزیک ۳

۹. در شکل زیر موج نوری فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط بازمی‌تابد و بخشی دیگر شکست می‌یابد و وارد شیشه می‌شود.
الف) مشخصه‌های موج بازتابیده و موج شکست‌یافته را با موج فرودی مقایسه کنید.
ب) جبهه‌های موج بازتابیده و شکست‌یافته را رسم کنید.

هوا
شیشه

۱۰. طول‌موج نور قرمز لیزر هلیم ـ نئون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجهٔ چشم ۲۷۴nm است. الف) بسامد این نور چقدر است؟ ب) ضریب شکست زجاجیه برای این نور چقدر است؟ پ) تندی این نور در زجاجیه را محاسبه کنید.

۱۱. سکه‌ای را در گوشهٔ فنجانی خالی قرار دهید و طوری مقابل آن قرار گیرید که نتوانید سکه را ببینید. بدون این‌که سرتان را حرکت دهید به‌آرامی در فنجان آب بریزید، به‌طوری که آب ریختن شما موجب جابه‌جایی سکه نشود. با پرسش فنجان، سکه را خواهید دید. با رسم پرتوها علت دیده شدن سکه را توضیح دهید.

۱۲. مطابق شکل، پرتو نوری که از ماهی به چشمان شخص می‌رسد تحت زاویهٔ 60° به مرز آب ـ هوا برخورد کرده است. زاویهٔ شکست این پرتو در هوا چقدر است؟

۱۳. در شکل‌های زیر، پرتوی فرودی که شامل نورهای قرمز و آبی است از شیشه وارد هوای رقیق شده است. کدام شکل، شکستی را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟

۱۴. دو دانش‌آموز به نور زرد نگاه می‌کنند. یکی از آنها نور زرد را ترکیب دو نور قرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می‌داند. به نظر شما با چه تجربه‌ای می‌توان بین این دو نظر، یکی را انتخاب کرد؟

۴ـ۳ پراش موج

۱۵. در یک تشت موج، مطابق شکل زیر، موج تختی ایجاد شده است. توضیح دهید با باریک‌کردن شکاف‌ها چه شکلی برای جبهه‌های موج خروجی از آنها حاصل می‌شود.

۱۶. گوشی‌های همراه با امواج رادیویی با بسامد حدود ۲GHz کار می‌کنند. توضیح دهید این امواج تحت چه شرایطی از موانع پراکنده می‌شوند و به منطقهٔ سایهٔ مانع می‌رسند.

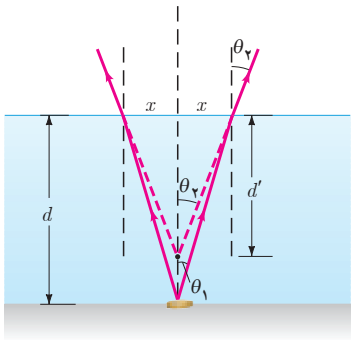
۱۱۲

$$v = \frac{c}{n} = \frac{۳/۰۰\times۱۰^۸\,\mathrm{m/s}}{۱/۳۳۵} =$$

$$= ۲/۲۴۷\times۱۰^۸\,\mathrm{m/s} \approx ۲/۲۵\times۱۰^۸\,\mathrm{m/s}$$

(پ)

۱۱ نخست شاید بهتر باشد دید از بالا را بررسی کنیم تا با رسم نموداری پرتویی به حسی از این مطلب برسید. دو پرتو از نقطه‌ای از سکه رسم می‌کنیم که در زاویهٔ کوچکی از خطّ عمود بر سطح آب قرار دارند. به دلیل شکسته شدن پرتوها و ورود آنها از محیطی با ضریب شکست بیشتر به محیطی با ضریب شکست کمتر، آنها در محل خروج از سطح آب، از خطّ عمود دور می‌شوند و این طور به نظر می‌رسد که امتداد آنها در نقطه‌ای بالاتر از کف فنجان همدیگر را قطع می‌کنند (که با رسم خط‌چین‌هایی نشان داده شده است). همین باعث می‌شود عمق فنجان را کمتر ببینیم.



به‌طور محاسبه‌ای هم می‌توانیم رابطه‌ای به‌دست آوریم. چون در این وضعیت زاویه ها کوچک اند (که البته در شکل با اغراق بزرگ کشیده شده اند) داریم $\sin\theta \approx \tan\theta$ و در نتیجه از قانون اسنل داریم

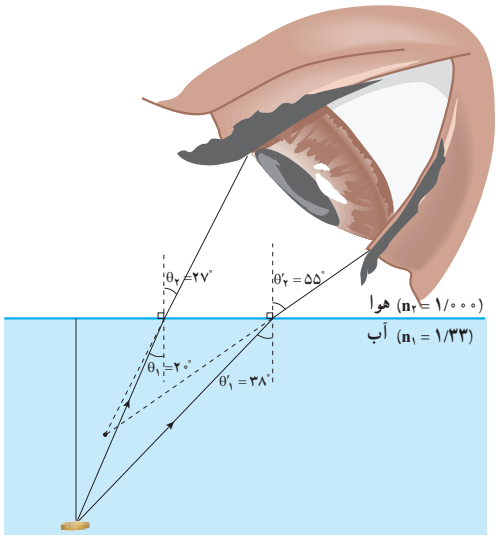
$$\tan\theta_2 \approx n_1 \tan\theta_1 \Rightarrow \frac{x}{d'} \approx n_1 \frac{x}{d}$$

و در نتیجه $\frac{}{} \approx \frac{}{'}$.

بنابراین برای شخصی که تقریباً به‌طور عمود نگاه می‌کند، عمق ظاهری $\frac{۱}{n}$ عمق واقعی می‌شود ولی توجه کنید که در این حالت جابه‌جایی افقی ناچیز است. ولی اگر کسی به‌طور مایل نگاه کند، افزون بر جابه‌جایی قائم، یک جابه‌جایی افقی نیز وجود دارد و همان‌طور که در شکل زیر برای داده‌هایی خاص نشان داده شده است، تصویر در هر دو امتداد قائم و افقی به ناظر نزدیک می‌شود. البته محل این تصویر یکتا نیست و هر چه پرتوهایی که به چشم ناظر می‌رسند افقی‌تر گردند، تصویر به ناظر نزدیک‌تر می‌گردد که بدیهی است بیشترین آن برای پرتوهایی است که نزدیک به زاویهٔ حد به سطح جدایی می‌تابند.

۱۲ از قانون اسنل استفاده می‌کنیم :

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$



که در اینجا n_1 و n_2 به ترتیب ضریب شکست آب و هوا، و θ_1 و θ_2 به ترتیب زاویهٔ پرتوی نور نسبت به *امتداد قائم* در محیط‌های آب‌وهوا است. بنابراین داریم

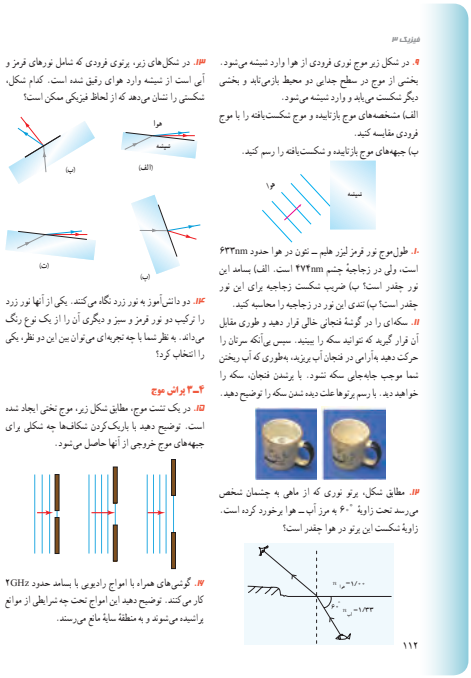
$$\sin\theta_2 = \frac{n_1 \sin\theta_1}{n_2} = \frac{(1/33)\sin 30^\circ}{1/00} = 0/665$$

و از آنجا $\theta_2 = 41/7^\circ \approx 42^\circ$ می‌شود.

۱۳ نخست توجه کنید عددهای داده شده برای ضریب شکست‌ها صرفاً برای مقایسهٔ دو محیط است و اینکه کدام محیط چگال‌تر است، و نقش دیگری در حل این تمرین ندارد. در پاسخ به این مسئله باید به چند نکته دیگر نیز توجه کرد؛ یکی اینکه با توجه به اینکه نور از محیط با ضریب شکست بیشتر وارد محیط با ضریب شکست کمتر می‌شود باید پرتوهای نور شکسته شده «در سمت درستی» از خطّ عمود دور شوند و دیگر اینکه به پاشندگی نور توجه کنیم و ترتیب و توالی شکست پرتوها درست باشد. بنابراین نخست باید خطّ عمود را رسم کنیم. از آنجا درمی‌یابیم که شکل (ب) اصلاً از لحاظ منطقی نادرست است. پرتوی قرمز تقریباً در امتداد خطّ عمود و پرتوی آبی در سمت نادرست (سمت چپ خطّ عمود) شکسته شده است. شکل (پ) این مشکل را ندارد و پرتوها در سمتی درست شکسته شده‌اند، ولی اگر توجه کنید درمی‌یابید که پرتوی آبی به خطّ عمود نزدیک شده است و بنابراین کلّیت این شکل نیز نادرست است. اما شکل‌های (الف) و (ت) این هر دو مشکل را ندارند، هم پرتوها در سویی مناسب شکسته شده‌اند و هم هر دو پرتو از خطّ عمود دور شده‌اند. منتها همان‌طور که در مبحث پاشندگی دیدیم پرتوی آبی باید بیشتر از پرتوی قرمز شکست پیدا کند و بنابراین پاسخ درست، (ت) است.

۱۴ چون این پرسش در بخش شکست نور مطرح شده است، بنابراین باید به آن با استفاده از دانش ارائه شده در این بخش و با استفاده از پاشندگی نور پاسخ دهیم. با استفاده از یک منشور به‌سادگی می‌توانیم بین این دو نظر، یکی را انتخاب کنیم. اگر نور زرد، ترکیبی باشد در منشور تجزیه می‌شود و می‌توانیم نورهای قرمز و سبز را مشاهده کنیم.

اما با توجه به اینکه در کلّ مجموعهٔ این کتاب، آزمایش یانگ نیز آموزش داده شده است، خوب است تحلیلی مبتنی بر این آزمایش نیز ارائه کنیم. پهنای هر نوار تاریک یا روشن در آزمایش یانگ با طول موج متناسب است و از این نتیجه در تحلیل خود استفاده می‌کنیم. اگر نور زرد به‌کار رفته در آزمایش یانگ تکفام باشد، ما نوارهای تداخلی یک در میان روشن (اینجا زرد) و تیره‌ای خواهیم داشت. ولی اگر نور زرد، ترکیبی از دو نور قرمز و سبز باشد، نوارهایی به چنین وضوحی نخواهیم داشت و نتیجهٔ کار از برهم نهی امواج تداخلی


فیزیک ۳

۹. در شکل زیر موج نوری فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط بازمی‌تابد و بخشی دیگر شکست می‌یابد و وارد شیشه می‌شود.
الف) مشخصه‌های موج بازتابیده و موج شکست‌یافته را با موج فرودی مقایسه کنید.
ب) جبهه‌های موج بازتابیده و شکست‌یافته را رسم کنید.

هوا
شیشه

۱۰. طول موج نور قرمز لیزر هلیم ـ نئون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجهٔ چشم ۲۷۴nm است. الف) بسامد این نور چقدر است؟ ب) ضریب شکست زجاجیه برای این نور چقدر است؟ پ) تندی این نور در زجاجیه را محاسبه کنید.

۱۱. سکه‌ای را در گوشهٔ فنجانی خالی قرار دهید و طوری مقابل آن قرار گیرید که نتوانید سکه را ببینید. بدون این‌که سرتان را حرکت دهید به‌آرامی در فنجان آب بریزید، به‌طوری که آب ریختن شما موجب جابه‌جایی سکه نشود. با برندن فنجان، سکه را خواهید دید. با رسم پرتوها علت دیده شدن سکه را توضیح دهید.

۱۲. مطابق شکل، پرتو نوری که از ماهی به چشمان شخص می‌رسد تحت زاویهٔ ۶۰° به مرز آب ـ هوا برخورد کرده است. زاویهٔ شکست این پرتو در هوا چقدر است؟

۱۳. در شکل‌های زیر، پرتوی فرودی که شامل نورهای قرمز و آبی است از شیشه وارد هوای رقیق شده است. کدام شکل، شکستی را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟

۱۴. دو دانش‌آموز به نور زرد نگاه می‌کنند. یکی از آنها نور زرد را ترکیب دو نور قرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می‌داند. به نظر شما با چه تجربه‌ای می‌توان بین این دو نظر، یکی را انتخاب کرد؟

۴ـ۳ پراش موج

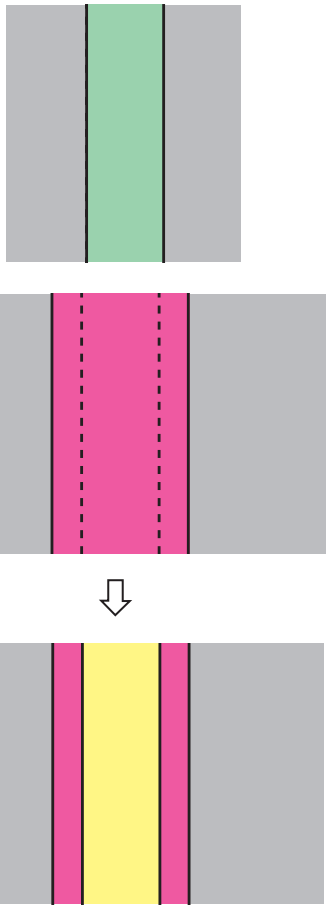
۱۵. در یک تشت موج، مطابق شکل زیر، موج تختی ایجاد شده است. توضیح دهید با باریک‌کردن شکاف‌ها چه شکلی برای جبهه‌های موج خروجی از آنها حاصل می‌شود.

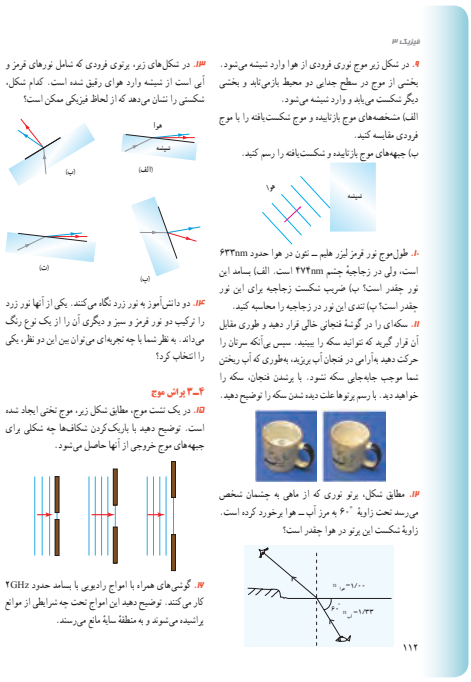
۱۶. گوشی‌های همراه با امواج رادیویی با بسامد حدود ۲GHz کار می‌کنند. توضیح دهید این امواج تحت چه شرایطی از موانع پراکنده می‌شوند و به منطقهٔ سایهٔ مانع می‌رسند.

۱۱۲

قرمز و سبز حاصل می‌شود. به عبارتی، توجه کنید که اگر نور سبز را نداشتیم، نوارهای تداخلی یک در میان از قرمز و تیره حاصل می‌شد، و اگر نور قرمز را نداشتیم، نوارهای تداخلی یک در میانی از سبز و تیره حاصل می‌شد. حال در حضور این دو نور، نوارهای داخلی آنها روی هم می‌افتد. ولی توجه کنید که این برهم افتادن به‌طوری نیست که نوارها کاملاً برهم منطبق شوند. در واقع چون طول نوارهای تداخلی به طول موج به‌کاررفته مربوط است و هر چه طول موج بزرگ‌تر باشد، آنها نیز طویل‌ترند، بنابراین در همپوشانی، نوارها کاملاً بر هم منطبق نمی‌شوند.

برای مثال، نوار روشن مرکزی را در نظر بگیرید. وقتی نوارهای تداخلی حاصل از نور سبز و حاصل از نور قرمز را بر هم بنهیم، کّل نوار سبز به نوار زرد تبدیل می‌شود، ولی اطراف آن تا سر نوارهای تاریک حاشیه‌های قرمز خواهند داشت. بنابراین نتیجه می‌گیریم که نور زرد ترکیبی باعث نوار مرکزی زرد رنگی می‌شود که کوتاه‌تر از نوار زرد مرکزی حاصل از یک نور زرد تکفام است؛ ضمن آنکه اطراف آن نیز ته رنگ قرمزی می‌گیرد.




فیزیک ۳

۹. در شکل زیر موج نوری فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط بازمی‌تابد و بخشی دیگر شکست می‌یابد و وارد شیشه می‌شود.
الف) مشخصه‌های موج بازتابیده و موج شکست‌یافته را با موج فرودی مقایسه کنید.
ب) جبهه‌های موج بازتابیده و شکست‌یافته را رسم کنید.

۱۰. طول‌موج نور قرمز لیزر هلیم ـ نئون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجهٔ جسم ۲۷۴nm است. الف) بسامد این نور چقدر است؟ ب) ضریب شکست زجاجیه برای این نور چقدر است؟ پ) تندی این نور در زجاجیه را محاسبه کنید.

۱۱. سکه‌ای را در گوشهٔ فنجانی خالی قرار دهید و طوری مقابل آن قرار گیرید که نتوانید سکه را ببینید. سپس بی‌آنکه سرتان را حرکت دهید به‌آرامی در فنجان آب بریزید، به‌طوری که آب ریختن شما موجب جابه‌جایی سکه نشود. با پرسش فنجان، سکه را خواهید دید. با رسم پرتوها علت دیده شدن سکه را توضیح دهید.

۱۲. مطابق شکل، پرتو نوری که از ماهی به چشمان شخص می‌رسد تحت زاویهٔ 6° به مرز آب ـ هوا برخورد کرده است. زاویهٔ شکست این پرتو در هوا چقدر است؟

۱۳. در شکل‌های زیر، پرتوی فرودی که شامل نورهای قرمز و آبی است از شیشه وارد هوای رقیق شده است. کدام شکل، شکستی را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟

۱۴. دو دانش‌آموز به نور زرد نگاه می‌کنند. یکی از آنها نور زرد را ترکیب دو نور قرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می‌داند. به نظر شما با چه تجربه‌ای می‌توان بین این دو نظر، یکی را انتخاب کرد؟

۴ـ۳ پراش موج

۱۵. در یک تست موج، مطابق شکل زیر، موج تختی ایجاد شده است. توضیح دهید با باریک‌کردن شکاف‌ها چه شکلی برای جبهه‌های موج خروجی از آنها حاصل می‌شود.

۱۶. گوشی‌های همراه با امواج رادیویی با بسامد حدود ۲GHz کار می‌کنند. توضیح دهید این امواج تحت چه شرایطی از موانع پراشیده می‌شوند و به منطقهٔ سایهٔ مانع می‌رسند.

(جالب است اگر آزمایش یانگ را با نوری سفید انجام دهیم، همچنان حاشیه‌های نوار مرکزی قرمز خواهد بود، زیرا پهنای این نوار از همه بیشتر است و در میانهٔ نوار مرکزی هم نواری کاملاً سفید خواهیم داشت که از همپوشانی همهٔ رنگ‌های طیف ایجاد شده است و در بین آنها رنگین کمانی از ترکیب رنگ‌های مختلف ایجاد می‌شود. شکل زیر طرحی تقریبی از چنین تصویری را نشان می‌دهد).

فیزیک ۳

۹. در شکل زیر موج نوری فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط بازمی‌تابد و بخشی دیگر شکست می‌یابد و وارد شیشه می‌شود.
الف) مشخصه‌های موج بازتابیده و موج شکست‌یافته را با موج فرودی مقایسه کنید.
ب) جبهه‌های موج بازتابیده و شکست‌یافته را رسم کنید.

۱۰. طول‌موج نور قرمز لیزر هلیم ـ نئون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجهٔ چشم ۲۷۲nm است. الف) بسامد این نور چقدر است؟ ب) ضریب شکست زجاجیه برای این نور چقدر است؟ پ) تندی این نور در زجاجیه را محاسبه کنید.

۱۱. سکه‌ای را در گوشهٔ فنجانی خالی قرار دهید و طوری مقابل آن قرار گیرید که نتوانید سکه را ببینید. سپس بی‌آنکه سرتان را حرکت دهید به‌آرامی در فنجان آب بریزید، به‌طوری که آب ریختن شما موجب جابه‌جایی سکه نشود. با پرشدن فنجان، سکه را خواهید دید. با رسم پرتوها علت دیده شدن سکه را توضیح دهید.

۱۲. مطابق شکل، پرتو نوری که از ماهی به چشمان شخص می‌رسد تحت زاویهٔ 60° به مرز آب ـ هوا برخورد کرده است. زاویهٔ شکست این پرتو در هوا چقدر است؟

۱۳. در شکل‌های زیر، پرتوی فرودی که شامل نورهای قرمز و آبی است از شیشه وارد هوای رقیق شده است. کدام شکل، شکستی را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟

۱۴. دو دانش‌آموز به نور زرد نگاه می‌کنند. یکی از آنها نور زرد را ترکیب دو نور قرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می‌داند. به نظر شما با چه تجربه‌ای می‌توان بین این دو نظر، یکی را انتخاب کرد؟

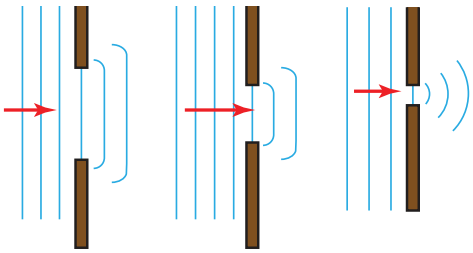
۴ـ۳ پراش موج

۱۵. در یک تشت موج، مطابق شکل زیر، موج تختی ایجاد شده است. توضیح دهید با باریک‌کردن شکاف‌ها چه شکلی برای جبهه‌های موج خروجی از آنها حاصل می‌شود.

۱۶. گوشی‌های همراه با امواج رادیویی با بسامد حدود ۲GHz کار می‌کنند. توضیح دهید این امواج تحت چه شرایطی از موانع پراشیده می‌شوند و به منطقهٔ سایهٔ مانع می‌رسند.

۱۱۲

۱۵ با باریک کردن پهنای شکاف، پدیدهٔ پراش به‌طور بارزتری خود را نشان می‌دهد و موجی که از شکاف خارج می‌شود از حالت موج تخت بیشتر خارج می‌شود و در حالتی که پهنای شکاف در حدود طول موج باشد موج‌های تخت به‌صورت امواج نیم‌دایره‌ای گسترده می‌شوند.

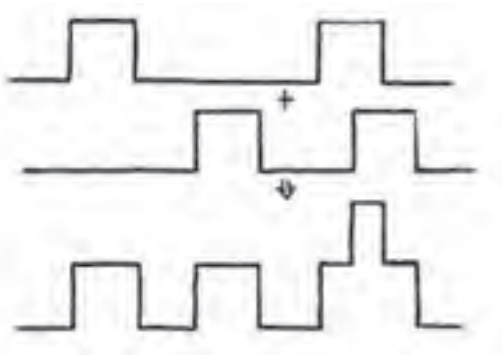


۱۶ نخست طول موج این امواج را محاسبه می‌کنیم :

$$\lambda = v / f = \frac{c}{f} = \frac{۳/۰۰\times۱۰^{۸}\,\mathrm{m/s}}{۲\times۱۰^{۹}\,\mathrm{s^{-۱}}} = ۰/۱۵\mathrm{m} \approx ۰/۱\mathrm{m}$$

این امواج از اجسامی به قطری حدود ۱۵cm یا کوچک‌تر، به خوبی پراشیده می‌شوند.

۱۷ از بر هم نهی این دو موج، شکلی مانند زیر حاصل می‌شود :



۱۸ جابه‌جایی کل، جمع‌برداری هر جابه‌جایی مجزا است. چون جابه‌جایی‌های نقطهٔ M در جهت‌های مخالف هم هستند، جمع‌برداری آنها برابر $y_۲-y_۱$ می‌شود که چون $y_۲>y_۱$ است، مقداری مثبت است.

۱۹ در نقطهٔ P قله (ستیغ) موج‌ها همدیگر را قطع کرده‌اند و برهم نهاده شده‌اند و بنابراین تداخل کاملاً سازنده و دامنهٔ موج برایند بیشینه است. اما در نقطهٔ Q قله (ستیغ) یک موج با درّه (پاستیغ) موج دیگر تلاقی کرده است (توجه کنید که Q بر یک منحنی آبی و در میان دو منحنی قرمز است) و بنابراین همدیگر را تضعیف می‌کنند و دامنه کمینه است.

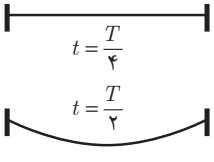
۲۰ الف) چون فاصلهٔ نقطه‌های S و L متناسب با طول موج به‌کار رفته است، بنابراین برای آنکه نقطه‌های S و L به هم نزدیک باشند باید طول موج به کار رفته کوچک باشد. با توجه به اینکه $f=v/\lambda$ است نتیجه می‌گیریم که این معادل با افزایش بسامد صوت است.

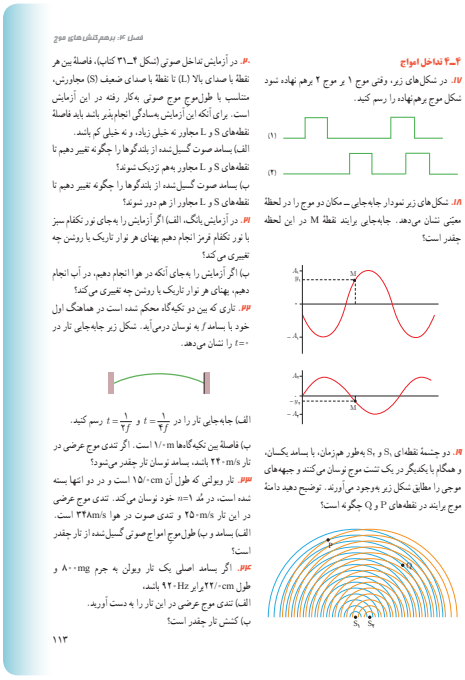
ب) برای آنکه نقطه‌های S و L از هم دور شوند باید طول موج به‌کار رفته بزرگ باشد. با توجه به اینکه $f=v/\lambda$ است نتیجه می‌گیریم که این معادل با کاهش بسامد صوت است.

۲۱ الف) پهنای نوارهای تداخلی در آزمایش یانگ متناسب با طول موج به‌کار رفته است. بنابراین با افزایش طول موج، پهنای نوارها زیاد می‌شود. پس پهنای نوارها با استفاده از نور تکفام قرمز به جای نور تکفام سبز، افزایش می‌یابد.

ب) چون پهنای نوارهای تداخلی با طول موج به‌کار رفته متناسب است، با توجه به اینکه در حضور آب طول موج به λ/n تغییر پیدا می‌کند و کم می‌شود، بنابراین طول موج به‌کار رفته کاهش می‌یابد که این به معنای کاهش پهنای نوارها است. (توجه! در متن درس فقط به رابطهٔ پهنای نوارها با طول موج پرداخته شده است. خوب است بدانید دو راه دیگر تغییر پهنای نوار، یکی تغییر دادن فاصلهٔ شکاف‌ها تا پرده، و دیگری تغییر فاصله شکاف‌ها از هم است.)

۲۲ الف) چون دورهٔ تناوب برابر با عکس بسامد است ($T=۱/f$)، بنابراین $t=\frac{۱}{۴f}$ معادل با $\frac{۱}{۴}T$ و $t=\frac{۱}{۲f}$ معادل با $\frac{۱}{۲}T$ است. به‌عبارتی در زمان $\frac{۱}{۴}$ دوره گذشته است و در زمان $t=\frac{۱}{۲f}$، نصف دوره. پس شکل‌ها (در مشابهت با شکل‌های ۴ـ۳۴ کتاب) چنین می‌شوند :




فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

۴ـ۴ تداخل امواج

۱۷. در شکل‌های زیر، وقتی موج ۱ بر موج ۲ برهم نهاده شود شکل موج برهم‌نهاده را رسم کنید.

۱۸. شکل‌های زیر نمودار جابه‌جایی ـ مکان دو موج را در لحظهٔ معیّنی نشان می‌دهد. جابه‌جایی برایند نقطهٔ M در این لحظه چقدر است؟

۱۹. دو چشمهٔ نقطه‌ای $S_۱$ و $S_۲$ به‌طور هم‌زمان، با بسامد یکسان، و همگام با یکدیگر در یک تشت موج نوسان می‌کنند و جبهه‌های موجی را مطابق شکل زیر پدید می‌آورند. توضیح دهید دامنهٔ موج برایند در نقطه‌های P و Q چگونه است؟

۲۰. در آزمایش تداخل صوتی (شکل ۴ـ۳۱ کتاب)، فاصلهٔ بین هر نقطهٔ با صدای بالا (L) تا نقطهٔ با صدای ضعیف (S) مجاورش، متناسب با طول‌موج موج صوتی به‌کار رفته در این آزمایش است. برای آنکه این آزمایش به‌سادگی انجام‌پذیر باشد باید فاصلهٔ نقطه‌های S و L مجاور نه خیلی زیاد، و نه خیلی کم باشد.
الف) بسامد صوت گسیل‌شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا نقطه‌های S و L مجاور به‌هم نزدیک شوند؟
ب) بسامد صوت گسیل‌شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا نقطه‌های S و L مجاور از هم دور شوند؟

۲۱. در آزمایش یانگ، الف) اگر آزمایش را به‌جای نور تکفام سبز با نور تکفام قرمز انجام دهیم پهنای هر نوار تاریک یا روشن چه تغییری می‌کند؟
ب) اگر آزمایش را به‌جای آنکه در هوا انجام دهیم، در آب انجام دهیم، پهنای هر نوار تاریک یا روشن چه تغییری می‌کند؟

۲۲. تاری که بین دو تکیه‌گاه محکم شده است در هماهنگ اول خود با بسامد f به نوسان درمی‌آید. شکل زیر جابه‌جایی تار در $t=۰$ را نشان می‌دهد.

الف) جابه‌جایی تار را در $t=\frac{۱}{۲f}$ و $t=\frac{۱}{۴f}$ رسم کنید.

ب) فاصلهٔ بین تکیه‌گاه‌ها ۱/۰m است. اگر تندی موج عرضی در تار ۲۴۰m/s باشد، بسامد نوسان تار چقدر می‌شود؟

۲۳. تار ویولنی که طول آن ۱۵/۰cm است و در دو انتها بسته شده است، در مُد n=۱ خود نوسان می‌کند. تندی موج عرضی در این تار ۲۵۰m/s و تندی صوت در هوا ۳۴۸m/s است.
الف) بسامد و ب) طول‌موج امواج صوتی گسیل‌شده از تار چقدر است؟

۲۴. اگر بسامد اصلی یک تار ویولن به جرم ۸۰۰mg و طول ۲۲/۰cm برابر ۹۲۰Hz باشد،
الف) تندی موج عرضی در این تار را به دست آورید.
ب) کشش تار چقدر است؟

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

۴ـ۴ تداخل امواج

۱۷. در شکل‌های زیر، وقتی موج ۱ بر موج ۲ برهم نهاده شود شکل موج برهم‌نهاده را رسم کنید.

(۱)

(۲)

۱۸. شکل‌های زیر نمودار جابه‌جایی ـ مکان دو موج را در لحظهٔ معیّنی نشان می‌دهد. جابه‌جایی برایند نقطهٔ M در این لحظه چقدر است؟

۱۹. دو چشمهٔ نقطه‌ای S_1 و S_2 به‌طور هم‌زمان، با بسامد یکسان و همگام با یکدیگر در یک تشت موج نوسان می‌کنند و جبهه‌های موجی را مطابق شکل زیر به‌وجود می‌آورند. توضیح دهید دامنهٔ موج برایند در نقطه‌های P و Q چگونه است؟

۲۰. در آزمایش تداخل صوتی (شکل ۴ـ۳۱ کتاب)، فاصلهٔ بین هر نقطهٔ با صدای بالا (L) تا نقطهٔ با صدای ضعیف (S) مجاورش، متناسب با طول‌موج موج صوتی به‌کار رفته در این آزمایش است. برای آنکه این آزمایش به‌سادگی انجام‌پذیر باشد باید فاصلهٔ نقطه‌های S و L مجاور نه خیلی زیاد، و نه خیلی کم باشد.
الف) بسامد صوت گسیل‌شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا نقطه‌های S و L مجاور به‌هم نزدیک شوند؟
ب) بسامد صوت گسیل‌شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا نقطه‌های S و L مجاور از هم دور شوند؟

۲۱. در آزمایش یانگ، الف) اگر آزمایش را به‌جای نور نکفام سبز با نور نکفام قرمز انجام دهیم پهنای هر نوار تاریک یا روشن چه تغییری می‌کند؟
ب) اگر آزمایش را به‌جای آنکه در هوا انجام دهیم، در آب انجام دهیم، پهنای هر نوار تاریک یا روشن چه تغییری می‌کند؟

۲۲. تاری که بین دو تکیه‌گاه محکم شده است در هماهنگ اول خود با بسامد f به نوسان درمی‌آید. شکل زیر جابه‌جایی تار در $t=0$ را نشان می‌دهد.

الف) جابه‌جایی تار را در $t=\frac{1}{4f}$ و $t=\frac{1}{2f}$ رسم کنید.
ب) فاصلهٔ بین تکیه‌گاه‌ها ۱/۰m است. اگر تندی موج عرضی در تار ۲۴۰m/s باشد، بسامد نوسان تار چقدر می‌شود؟

۲۳. تار ویولنی که طول آن ۱۵/۰cm است و در دو انتها بسته شده است، در مُد n=1 خود نوسان می‌کند. تندی موج عرضی در این تار ۲۵۰m/s و تندی صوت در هوا ۳۴۸m/s است.
الف) بسامد و ب) طول‌موج امواج صوتی گسیل‌شده از تار چقدر است؟

۲۴. اگر بسامد اصلی یک تار ویولن به جرم ۸۰۰mg و طول ۲۲/۰cm برابر ۹۲۰Hz باشد،
الف) تندی موج عرضی در این تار را به دست آورید.
ب) کشش تار چقدر است؟

ب) از $v=f\lambda$ استفاده می‌کنیم. با توجه به اینکه $\frac{\lambda}{2}=1/0\,m$ است، خواهیم داشت:

$$f=\frac{v}{\lambda}=\frac{240\,m/s}{2/0\,m}=1/2\times10^{2}\,s^{-1}=1/2\times10^{2}\,Hz$$

و یا به‌عبارتی $120\,Hz$ می‌شود.

۲۳ الف) باید از رابطهٔ ۴ـ۵ استفاده کنیم

که در اینجا $n=1$ است: $f_n=\frac{nv}{2L}$ ، به‌ازای $n=1,2,...$

$$f_1=\frac{v}{2L}=\frac{(1)(250\,m/s)}{2(0/150\,m)}=833/3\,Hz\approx833\,Hz$$

توجه کنید که بسامد موج روی تار همان بسامد موج صوتی است که تولید می‌شود.
ب) همان‌طور که گفتیم f_1 بسامد موج صوتی است و بنابراین برای طول موجِ موج صوتی گسیل‌شده داریم

$$\lambda=\frac{v}{f}=\frac{348\,m/s}{833/3\,s^{-1}}=0/4176\,m\approx0/418\,m$$

۲۴ الف) دو سر تار بسته است و وقتی در پایین‌ترین بسامد خود نوسان می‌کند، طول آن دقیقاً نصف طول موج است. اگر L طول سیم و λ طول موج باشد، $\lambda=2L$ است (این را به‌طور مستقیم از رابطهٔ ۴ـ۴ کتاب نیز می‌توانید ببینید). بسامد برابر $f=v/\lambda=v/2L$ است که در آن v تندی موج روی تار ویولن است. بنابراین

$$v=2Lf=2(0/220\,m)(920\,Hz)=404/8\,m/s\approx405\,m/s$$

که البته می‌توانستیم آن را به‌طور مستقیم با استفاده از رابطهٔ ۴ـ۵ نیز به ازای $n=1$ به‌دست آوریم.

ب) تندی موج با $v=\sqrt{F/\mu}$ داده می‌شود که در آن $\mu=m/L$ است. بنابراین کشش تار چنین می‌شود:

$$F=\mu v^2=\left(\frac{m}{L}\right)v^2=\left(\frac{800\times10^{-6}\,kg}{220\times10^{-2}\,m}\right)(404/8\,m/s)^2$$

$$=0/9595\,N\approx0/695\,N$$

پ) برای بسامد اصلی، طول موجِ موج عرضی در تار $\lambda=2L$ است و بنابراین

$$\lambda=2L=2(0/220\,m)=0/440\,m$$

بسامد صوت در هوا همان بسامد نوسان سیم است. ولی به خاطر تندی متفاوت صوت، طول موج *متفاوت می‌شود*. اگر هوا را با شاخص پایین a نشان دهیم، خواهیم داشت:

$$\lambda_a=\frac{v_a}{f}=\frac{340\,m/s}{920\,s^{-1}}=0/3696\,m\approx0/370\,m=37/0\,cm$$

۲۵ الف) همان‌طور که در متن درس آمده، تشدید باعث به نوسان در آمدن تار می‌شود. اگر بسامد مولّد نوسان با بسامدهای ارتعاش تار منطبق شود، تار به تشدید درمی‌آید و در غیر این صورت، موج ایستادهٔ بارزی ایجاد نمی‌شود. به عبارتی وقتی $f=v/\lambda$ برابر با یکی از بسامدهای نوسان‌ساز باشد، این پدیده رخ می‌دهد.

ب) چون تار فقط در دو بسامد ۸۸۰Hz و ۱۳۲۰Hz به نوسان در می‌آید، تفاضل آنها برابر بسامد اصلی نوسان تار است. البته این را می‌توان به‌سادگی نیز اثبات کرد :

$$f_{n+1}-f_n=\frac{(n+1)v}{2L}-\frac{nv}{2L}=\frac{v}{2L}$$

که همان بسامد اصلی نوسان است. بنابراین

$$f_{n+1}-f_n=1320\,\text{Hz}-880\,\text{Hz}=440\,\text{Hz}$$

پ) در بالا ثابت کردیم $f_{n+1}-f_n=v/2L$ ، که در آن $v=\sqrt{F/\mu}$ است. بنابراین

$$f_{n+1}-f_n=\frac{1}{2L}\sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

و از آنجا

$$F=4L^2\mu(f_{n+1}-f_n)^2=4(0/300\,\text{m})^2(0/650\times10^{-3}\,\text{kg/m})\times$$
$$(1320\,\text{Hz}-880\,\text{Hz})^2=45/3\,\text{N}$$

در اینجا خوب بود تندی صوت در تار ویولن نیز پرسیده می‌شد و آن را با تندی صوت در هوا مقایسه می‌کردیم. برای تندی صوت در تار داریم

$$v=\sqrt{\frac{F}{\mu}}=\sqrt{\frac{45/3\,\text{N}}{0/650\times10^{-3}\,\text{kg/m}}}=264\,\text{m/s}$$

۲۶ چون ریسمان B تحت کشش بیشتری نسبت به ریسمان A قرار دارد، تندی موج در این ریسمان بیشتر است، زیرا هر دو ریسمان چگالی خطی جرمی یکسانی دارند. پس طبق رابطهٔ $f_n=nv/2L$، با توجه به اینکه طول دو ریسمان یکسان است، درمی‌یابیم تنها در شکل (ت) که ریسمان B در هماهنگ اول و ریسمان A در هماهنگ دوم در نوسان است این امکان وجود دارد که ریسمان‌ها در بسامدهای تشدیدی یکسانی باشند.

۲۷ همان‌طور که در حل مسئله ۲۵ نشان دادیم، تفاضل دو بسامد نوسان متوالی تار برابر با بسامد اصلی نوسان تار است. بنابراین

$$f=390\,\text{Hz}-65\,\text{Hz}=325\,\text{Hz}$$

همان بسامد اصلی (پایه) است. پس بسامد هماهنگ بعدی پس از ۱۹۵Hz برابر با $260\,\text{Hz}+65\,\text{Hz}=195\,\text{Hz}$ است. اگر بررسی کنیم عدد هماهنگ این بسامد تشدیدی ۴ است.

فیزیک ۳

ب) برای بسامد اصلی، طول موج موج عرضی در تار و طول موج امواج صوتی گسیل شده توسط تار چقدر است؟ تندی صوت در هوا را ۳۴۰m/s بگیرید.

۶۵. تار ویولنی به طول ۳۰/۰cm و چگالی خطی جرمی ۰/۶۵۰g/m در نزدیکی بلندگویی قرار داده شده است که توسط یک نوسان‌ساز صوتی با بسامد متغیر به‌کار می‌افتد. معلوم شده است وقتی بسامد نوسان‌ساز در گسترهٔ ۱۵۰۰Hz تا ۵۰۰۰Hz تغییر می‌کند تار فقط هنگامی به نوسان در می‌آید که بسامد آن ۸۸۰Hz و ۱۳۲۰Hz باشد.

الف) چه پدیده‌ای سبب به نوسان درآمدن تار شده است؟

ب) بسامد اصلی تار چقدر است؟ پ) کشش تار چقدر است؟

۶۶. ریسمان‌های A و B، طول و چگالی خطی جرمی یکسانی دارند، ولی ریسمان B تحت کشش بیشتری نسبت به ریسمان A قرار دارد. شکل زیر چهار وضعیت (الف) تا (ت) را نشان می‌دهد که در آنها نقش‌های موج ایستاده در دو ریسمان وجود دارند. در کدام وضعیت‌ها، احتمال دارد که ریسمان‌های A و B در بسامد تشدیدی یکسانی نوسان کنند؟

۶۷. در یک تار دو سر بسته، یکی از بسامدهای تشدیدی ۳۲۵Hz، و بسامد تشدیدی بعدی ۳۹۰Hz است. بسامد تشدیدی پس از ۱۹۵Hz این تار چیست؟

۶۸. رشته‌ای از بسامدهای تشدیدی یک تار با دو انتهای بسته عبارت‌اند از : ۱۵۰Hz، ۲۲۵Hz، ۳۰۰Hz، و ۳۷۵Hz. در این رشته یک بسامد (کمتر از ۴۰۰Hz) جا افتاده است.

الف) این بسامد کدام است؟

ب) بسامد هماهنگ هفتم جفدر است؟

۶۹. در شکل نشان داده شده، نقاط A، B، C، D، E، F، و G در فاصله‌های یکسانی از هم قرار دارند. تار را در نقطهٔ C به آرامی می‌گیریم، طوری که نوسان‌های بخشی از تار که سمت چپ نقطهٔ C است، بتواند به سمت راست این نقطه منتقل شود. اکنون تار را در نقطهٔ B می‌نوازیم. بدین ترتیب موج ایستاده‌ای در طول تار تشکیل می‌شود، به‌طوری که در نقطه‌های A و C گره و در نقطهٔ B شکم آن قرار دارد. به گمان شما برای کاغذهای تاشده‌ای که در نقاط D، E، و F قرار دارند، چه رخ می‌دهد؟

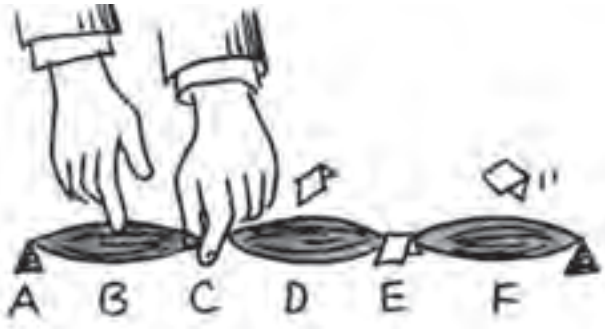
۷۰. وقتی گلان آبی را خالی می‌کنیم، با خالی شدن آب صدای گلوپ گلوپ را می‌شنویم. موقع خالی شدن گلان بسامد این صدا کمتر می‌شود (صدای بَم‌تر) یا بیشتر (صدای زیرتر)؟ چرا؟

۷۱. در گذشته برای آگاه کردن کشتی‌ها از خطر صخره‌ها، در صدف‌های حلزونی می‌دمیدند. امروزه بیشتر برای جشن‌ها و شادی‌ها در آنها می‌دمند. چگونه این صدف‌ها می‌توانند چنین صدایی ایجاد کنند؟

۲۸ الف) اگر بررسی کنید درمی‌یابید تفاوت بسامدهای تشدیدی برابر ۷۵Hz است و چون بسامد کمتر از ۴۰۰Hz خواسته شده است، پس بسامد مورد نظر همان ۷۵Hz است.

ب) بسامد پنج هماهنگ اول به ترتیب برابر با ۷۵Hz، ۱۵۰Hz، ۲۲۵Hz، ۳۰۰Hz، و ۳۷۵Hz شده است که به ترتیب هماهنگ‌های اول تا پنجم هستند. بنابراین بسامد هماهنگ هفتم برابر است با : $f_v = ۷(۷۵\ \text{Hz}) = ۵۲۵\ \text{Hz}$.

۲۹ توجه کنید آنچه در توصیف چگونگی انجام این آزمایش آمده است، صرفاً برای آن است. که مسئله از جنبهٔ انتزاعی خارج شده و عملاً انجام‌پذیر باشد. اگر تار در نقطهٔ C محکم گرفته شود، نوسان‌های تار به سمت راست منتقل نمی‌شوند. بنابراین در انجام این تجربه، چگونگی گرفتن تار در نقطهٔ C مهم است و تا آنجا که ممکن است باید به‌آرامی گرفته شود. در این صورت، موج ایستاده‌ای مانند شکل زیر بر تار ایجاد می‌شود به‌طوری که نقطه‌های A، C، Eو G گره‌ها و نقطه‌های B، D و F شکم‌ها می‌شوند. بنابراین کاغذهای تاشده در نقطه‌های D و F به هوا برمی‌خیزند، در حالی که کاغذ واقع در E، در جای خود ثابت می‌ماند.



۳۰ آنچه در این پرسش مطرح شده است در واقع وضعیتی مخالف پرسش ۴ــ۶ متن کتاب است که در آنجا با ریختن آب، بسامد صدایی که شنیده می‌شود، افزایش می‌یابد. در هنگام خالی شدن گالن، حجم فضای هوای داخل آن افزایش می‌یابد. هرچه فضای هوای خالی افزایش یابد، اندازهٔ بسامدهای تشدیدی کمتر می‌شوند (این بسامدها با طول ستون هوا نسبت معکوس دارند.)

صدای حاصل از خالی شدن ظرف، گسترهٔ وسیعی از بسامدها را دارد که در هر لحظه، یکی از آنها با بسامد تشدیدی هوای درون ظرف منطبق می‌شود، بنابراین موقع خالی شدن گالن، مدام صداهای بم‌تر و بم‌تری (با بسامد کمتری) را می‌شنویم.

۳۱ هنگام دمیدن در یک صدف حلزونی (conch) لب‌ها را روی دهانهٔ باریک آن می‌فشارند. با دمیدن صدف حلزونی، لب‌ها به نوسان درمی‌آیند و اگر این کار با دقت صورت بگیرد، لب‌ها در بسامدهای مختلفی به نوسان در می‌آیند. نوسان لب‌ها در درون صدف، امواجی صوتی را با همان بسامدهای نوسان لب به وجود می‌آورد. اگر برخی از این امواج با یکی از بسامدهای تشدید صدف منطبق شوند، در این صورت یک موج صوتی قوی را ایجاد می‌کنند. از لحاظ تجربی خوب است به یک آزمایش اشاره کنیم. در آن آزمایش، پایین‌ترین بسامد تشدید صدف ۳۳۲/۵Hz بود و بنابراین نوسان‌های لب در آن بسامد باعث تشدید در درون صدف در همان بسامد می‌شد.

فیزیک ۳

ب) برای بسامد اصلی، طول موج موج عرضی در تار و طول موج امواج صوتی گسیل شده توسط تار چقدر است؟ تندی صوت در هوا را ۳۴۰m/s بگیرید.

۲۶. تار ویولنی به طول ۳۰/۰cm و جگالی خطی جرمی ۰/۶۵۰g/m در نزدیکی بلندگویی قرار داده شده است که توسط یک نوسان‌ساز صوتی با بسامد متغیر به‌کار می‌افتد. معلوم شده است وقتی بسامد نوسان‌ساز در گسترهٔ ۱۵۰۰Hz–۵۰۰ تغییر می‌کند تار فقط هنگامی به نوسان در می‌آید که بسامد آن ۸۸۰Hz و ۱۳۲۰Hz باشد.

الف) چه پدیده‌ای سبب به نوسان درآمدن تار شده است؟

ب) بسامد اصلی تار چقدر است؟ ب) کشش تار چقدر است؟

۲۷. ریسمان‌های A و B، طول و جگالی خطی جرمی یکسانی دارند، ولی ریسمان B تحت کشش بیشتری نسبت به ریسمان A قرار دارد. شکل زیر چهار وضعیت (الف) تا (ت) را نشان می‌دهد که در آنها نقش‌های موج ایستاده در دو ریسمان وجود دارند. در کدام وضعیت‌ها، احتمال دارد که ریسمان‌های A و B در بسامد تشدیدی یکسانی نوسان کنند؟

۲۷. در یک تار دو سر بسته، یکی از بسامدهای تشدیدی ۳۲۵Hz، و بسامد تشدیدی بعدی ۳۹۰Hz است. بسامد تشدیدی پس از ۱۹۵Hz این تار چیست؟

۲۸. رشته‌ای از بسامدهای تشدیدی یک تار با دو انتهای بسته عبارت‌اند از : ۱۵۰Hz، ۲۲۵Hz، ۳۰۰Hz، و ۳۷۵Hz. در این رشته یک بسامد (کمتر از ۴۰۰Hz) جا افتاده است.

الف) این بسامد کدام است؟

ب) بسامد هماهنگ هفتم چقدر است؟

۲۹. در شکل نشان داده شده، نقاط A، B، C، D، E، F، و G در فاصله‌های یکسانی از هم قرار دارند. تار را در نقطهٔ C به آرامی می‌گیریم، طوری که نوسان‌های بخشی از تار که سمت چپ نقطهٔ C است، بتواند به سمت راست این نقطه منتقل شود. اکنون تار را در نقطهٔ B می‌نوازیم. بدین ترتیب موج ایستاده‌ای در طول تار تشکیل می‌شود، به‌طوری که در نقطه‌های A و C گره و در نقطهٔ B شکم آن قرار دارد. به گمان شما برای کاغذهای تاشده‌ای که در نقاط D، E، و F قرار دارند، چه رخ می‌دهد؟

۳۰. وقتی گالن آبی را خالی می‌کنیم، با خالی شدن آب صدای گلوپ گلوپ را می‌شنویم. موقع خالی شدن گالن بسامد این صدا کمتر می‌شود (صدای بم‌تر) یا بیشتر (صدای زیرتر)؟ چرا؟

۳۱. در گذشته برای آگاه کردن کشتی‌ها از خطر صخره‌ها، در صدف‌های حلزونی می‌دمیدند. امروزه بیشتر برای جشن‌ها و شادی‌ها در آنها می‌دمند. چگونه این صدف‌ها می‌توانند چنین صدایی ایجاد کنند؟

فصل پنجم

آشنایی با فیزیک اتمی

۵ـ۱ـ اثر فوتوالکتریک و فوتون
۵ـ۲ـ طیف خطی
۵ـ۳ـ مدل اتمی رادرفورد ـ بور
۵ـ۴ـ لیزر
پرسش‌ها و تمرین‌های پیشنهادی فصل ۵
راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۵

پیامدها

دانش‌آموزان با درک مفاهیم اساسی در برخی از مباحث فیزیک جدید به این شناخت می‌رسند که :

- فیزیک کلاسیک قادر به تبیین درست و کامل برخی از پدیده‌های فیزیکی نیست.
- نظریه‌ها و قانون‌های فیزیک کلاسیک در محدودهٔ معینی کاربرد دارند.
- برای تبیین برخی از پدیده‌های فیزیکی لازم است به دنبال نظریه‌ها و فرضیه‌های جدیدی باشیم که بتوانند محدودیت‌های فیزیک کلاسیک را پشت سر بگذارند.
- تکامل یک نظریه در فیزیک جدید، حاصل تلاش دانشمندان زیادی در یک بازهٔ زمانی بوده است.
- اثر فوتوالکتریک براساس دو فرضی که اینشتین کرد به درستی تبیین شد.

ـ تابش الکترومغناطیسی (نور) به‌صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی است که انرژی هر بسته با بسامد موج متناسب است.

ـ هر بستهٔ انرژی صرفاً با یکی از الکترون‌های سطح فلز برهم‌کنش می‌کند.

- تمامی اجسام در هر دما از خود امواج الکترومغناطیسی گسیل می‌کنند. اجسام جامد دارای طیف گسیلی پیوسته و گازها دارای طیف گسیلی خطی هستند.
- مدل اتمی تامسون، هر چند پایداری اتم و تابش اتم را می‌توانست توضیح دهد ولی بسامدهای تابش شده از اتم که این مدل پیش‌بینی می‌کرد با تجربه سازگار نبود.
- مهم‌ترین دستاورد مدل اتمی رادرفورد، تبیین مدل اتم هسته‌ای بود به طوری که در مرکز اتم، هسته‌ای با بار مثبت قرار دارد که حجم بسیار اندکی از اتم را اشغال می‌کند.
- بور با فرض‌های جدیدی توانست مشکلات مدل رادرفورد را رفع کند و رفتار اتم هیدروژن (جذب و گسیل تابش) را براساس مدلی که ساخته بود به خوبی تبیین کند.
- لیزر یکی از پرکاربردترین اختراع‌های قرن بیستم است که براساس گسیل القایی تابش کار می‌کند.

چه شناختی مطلوب است؟

- نظریه‌ها و فرضیه‌های فیزیک جدید قادر به تبیین پدیده‌هایی شدند که فیزیک‌دانان کلاسیک در اواخر قرن هیجدهم و اوایل قرن نوزدهم برای بررسی آنها مشکل جدی داشتند.

چه پرسش‌هایی اساسی است و باید درنظر گرفته شود؟

- آیا نظریه‌ها و قانون‌های فیزیک کلاسیک قادر به تبیین همهٔ پدیده‌های فیزیکی هستند؟
- دانشمندان فیزیک جدید چگونه توانستند پدیده‌های فیزیکی را که چالش بزرگی برای فیزیک‌دانان کلاسیک در اواخر قرن هیجدهم و اوایل قرن نوزدهم شده بود به خوبی تبیین کنند.
- تفاوت طیف گسیل شده از اجسام جامد و گازها در چیست؟
- هر یک از مدل‌های اتمی تامسون و رادرفورد چه مشکلاتی داشتند؟
- بور با چه فرض‌هایی توانست مدل اتمی خود را ارائه دهد؟
- فوتون‌های گسیل شده براساس گسیل القایی، چه ویژگی‌هایی دارند؟
- نقش ترازهای شبه پایدار در تشکیل باریکهٔ لیزر چیست؟

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

دانش‌آموزان خواهند دانست که :

- نظریه‌های فیزیکی در طول زمان به گونه‌ای تغییر می‌کنند تا قادر به تبیین درست پدیده‌های فیزیکی باشند.
- اثر فوتوالکتریک بنابر فرض اینشتین، توضیح داده می‌شود.
- طیف گسیلی یا جذبی اتم‌ها با یکدیگر متفاوت است و به عنوان شناسهٔ اصل هر اتم می‌توان از آن استفاده کرد.

دانش‌آموزان قادر خواهند بود :

- ناکامی‌های فیزیک کلاسیک را در تبیین برخی از پدیده‌های فیزیکی شرح دهند.
- چگونگی تشکیل طیف اجسام مختلف (جامدها و گازها) را بیان کنند.
- سیر تکامل مدل‌های اتمی را در قرن بیستم (دو دههٔ ابتدایی قرن) توضیح دهند.
- نحوهٔ کار لیزر را به کمک مفاهیمی که آموخته است شرح دهد.

بودجه‌بندی پیشنهادی

- **جلسهٔ اول و دوم :** نگاهی به تصویر شروع فصل و مقدمهٔ فصل + بخش ۵ــ۱
- **جلسهٔ سوم و چهارم :** بخش ۵ــ۲
- **جلسهٔ پنجم و ششم :** بخش ۵ــ۳
- **جلسهٔ هفتم :** بخش ۵ــ۴ و تمرین‌های مربوطه
- **جلسهٔ هشتم :** آزمون تشریحی فصل ۵

بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های پایان فصل را در جلسه‌های مختلف توزیع کنید.

راهنمای تدریس

پس از توجه دادن دانش‌آموزان به تصویر شروع فصل و مقدمهٔ فصل، و همچنین پرسش زیر تصویر ورودی فصل، که پاسخ آن مربوط به بخش طیف خطی است، شرحی در خصوص ناکامی‌های فیزیک کلاسیک در تبیین برخی از پدیده‌های فیزیکی (ترجیحاً به‌صورت یک بحث تاریخی) را با دانش‌آموزان در میان بگذارید.

ادامهٔ راهنمای تدریس

۵ــ۱ اثر فوتوالکتریک و فوتون

اثر فوتوالکتریک ابتدا از منظر پدیده‌شناسی مورد بررسی قرار گرفته است. چنانچه لامپ فرابنفش در اختیار داشته باشید، به کمک یک چشمهٔ لامپ رشته‌ای معمولی و لامپ فرابنفش می‌توانید این پدیده را به کمک یک الکتروسکوپ دارای بار منفی به دانش‌آموزان نشان دهید. به عبارت دیگر دیدن این پدیده می‌تواند مبنای مناسبی برای درگیر کردن دانش‌آموزان به موضوع باشد.

توجه

ممکن است دانش‌آموزان سؤال کنند که چرا از برق‌نمای با بار منفی برای انجام این آزمایش استفاده شده است، پاسخ این است که گسترهٔ طول موج فرابنفش بین ۱۰nm تا ۴۰۰nm است، بنابراین در حالتی که برق‌نما دارای بار منفی است، با لامپ‌های فرابنفش معمولی که به‌سادگی در دسترس‌اند و طول موج بالایی دارند نیز می‌توان این پدیده را مشاهده کرد، در حالی که برق‌نما دارای بار مثبت باشد، لازم است از لامپ فرابنفش با طول موج کم استفاده کرد که معمولاً در دسترس نیستند. ضمن اینکه در این حالت نیز ممکن است افزایش فاصلهٔ صفحه‌های برق‌نما از یکدیگر چندان مشهود نباشد. همچنین اگر برق‌نما از ابتدا خنثی باشد، جدا کردن الکترون از کلاهک آن نیاز به لامپ‌های فرابنفش (UV) با طول موج کم دارد.

در شکل ۵ــ۳ اثر فوتوالکتریک بر مبنای مشاهدهٔ انحراف عقربهٔ گالوانومتر ارائه شده است که معمولاً در آزمایشگاه‌ها از چنین اسبابی (البته با مداری کامل‌تر) استفاده می‌شود. لازم است توجه شود که پنجرهٔ کوارتزی امکان عبور درصد بیشتری از باریکهٔ نور فرابنفش را می‌دهد.

در ادامه به ناکامی فرض‌های فیزیک کلاسیک برای تبیین اثر فوتوالکتریک اشاره شده است که لازم است این قسمت به خوبی با دانش‌آموزان بحث شود. سپس دو فرض اینشتین برای حل معضل ۲۰ سالهٔ فوتوالکتریک مورد بررسی قرار گیرد.

■ **فرض اول :** نور فرودی به سطح فلز ماهیت موجی ندارد بلکه دارای ماهیت ذره‌ای است و از بسته‌های انرژی ($E = hf$) تشکیل شده است.

■ **فرض دوم :** هر بستهٔ انرژی صرفاً با یک الکترون از سطح فلز برهم‌کنش می‌کند.

توجه

لازم است توجه شود که نظریهٔ کوانتومی که در سال ۱۹۰۰ میلادی با کارهای پلانک در خصوص تبیین تابش جسم سیاه آغاز شد، معطوف به این فرض بود که اتم‌های جسم سیاه، مانند ذره‌های نوسانگری هستند که صرفاً مجازند انرژی‌هایی به‌صورت $E = nhf$ را جذب یا گسیل کنند (که در آن n عدد درست مثبتی است). به عبارت دیگر، پلانک تابش وارد شده به جسم سیاه یا گسیل شده از آن را همچنان به‌صورت موج الکترومغناطیسی در نظر می‌گرفت. کوانتیده گرفتن تابش و ارائه نظریهٔ ذره‌ای نور به‌صورت بسته‌های انرژی بنابه فرضی بود که اینشتین نخستین بار در سال ۱۹۰۵ میلادی برای تبیین اثر فوتوالکتریک به کار برد.

ماکس پلانک (۱۹۴۷ــ۱۸۵۵ م.)
در سال ۱۸۸۵ دانشیار فیزیک نظری در دانشگاه کیل شد و علاوه بر تدریس، مقاله‌های مهمی دربارهٔ ترمودینامیک منتشر کرد. از کارهای او در زمینهٔ توزیع طیف تابشی، که به نظریهٔ کوانتومی انجامید، با اهدای جایزهٔ نوبل سال ۱۹۱۸ تقدیر شد. در سال‌های بعد، نوشته‌های پلانک بیشتر در زمینهٔ موضوع‌های مذهبی و فلسفی بود. درست در آستانهٔ دورانی که پلانک از نظر حرفه‌ای مورد تحسین همگان قرار گرفته بود، ناگهان زندگی شخصی وی با ترازدی آمیخته شد. به طوری که طی سال‌های ۱۹۰۹ تا ۱۹۱۹ همسر، پسر بزرگ و دخترهای دوقلویش به دلال متفاوتی از دنیا رفتند. پلانک در سال ۱۹۲۷، پس از حدود چهل سال سابقهٔ دانشگاهی، از دانشگاه برلین بازنشسته شد.

شکل ۵ــ۳ در اثر فوتوالکتریک، نوری تکفام با بسامدی به قدر کافی بالا، الکترون‌ها را از سطح صفحهٔ فلزی ۲ بیرون می‌آورد. این فوتوالکترون‌ها، به طرف جمع‌کنندهٔ C می‌روند و جریانی را در مدار به‌وجود می‌آورند.

C می‌رسند و در نتیجه گالوانومتر که در مدار قرار دارد جریانی را آشکار می‌کند. با افزایش شدت این نور، گالوانومتر عدد بزرگ‌تری را نشان می‌دهد، حال آنکه آزمایش نشان می‌دهد که اگر بسامد نور فرودی از مقدار معیّنی کمتر باشد، هر چقدر هم که شدت نور فرودی افزایش یابد این پدیده رخ نمی‌دهد و گالوانومتر عبور جریانی را نشان نمی‌دهد.

همان‌طور که در فصل ۳ دیدیم نور، موجی الکترومغناطیسی است. بنابراین می‌توان انتظار داشت هنگام برهم‌کنش موج الکترومغناطیسی (نور فرودی) با سطح فلز، میدان الکتریکی این موج، نیروی $\vec{F} = -e\vec{E}$ به الکترون‌های فلز وارد کند و آنها را به نوسان وادارد. به این ترتیب، وقتی دامنهٔ نوسان برخی از الکترون‌ها به قدر کافی بزرگ شود انرژی جنبشی لازم را برای جدا شدن از سطح فلز پیدا می‌کنند. بنا به این دیدگاه کلاسیکی، این پدیده باید با هر بسامدی رخ دهد در حالی که این نتیجه با تجربه سازگار نیست.

یکی دیگر از پیامدهای نظریهٔ الکترومغناطیسی ماکسول این است که شدت نور یا مربع دامنهٔ میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی متناسب است ($I \propto E^2$). به این ترتیب انتظار می‌رود به‌ازای یک بسامد معین، اگر شدت نور فرودی بر سطح فلز را افزایش دهیم باید الکترون‌ها با انرژی جنبشی بیشتری از فلز خارج شوند، نتیجه‌ای که تجربه آن را تأیید نمی‌کند.

پس از تردید به ۲۰ سال که تلاش بسیاری از دانشمندان برای توجیه اثر فوتوالکتریک به کمک مفاهیم و قانون‌های فیزیک کلاسیک به نتیجه نرسیده بود در سال ۱۹۰۵ اینشتین توضیحی قانع‌کننده در مورد این اثر ارائه داد و جایزهٔ نوبل فیزیک سال ۱۹۲۱ میلادی را به خاطر تبیین آن دریافت کرد.

اینشتین در نظریهٔ فوتوالکتریک خود با توجه به کارهای قبلی پلانک در زمینهٔ تابش گرمایی اجسام، فرض کرد که نور یا بسامد را می‌توان به‌صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی در نظر گرفت. هر بستهٔ انرژی، که بعدها فوتون[1] نامیده شد، دارای انرژی‌ای است که از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$E = hf \qquad \text{(انرژی فوتون)} \qquad (۵ــ۱)$$

در این رابطه h ثابت پلانک نامیده می‌شود و به‌طور تجربی معلوم شده است که مقدار آن $h = ۶/۶۳ \times ۱۰^{-۳۴}\ \text{J.s}$ است.

بنا بر نظر اینشتین، وقتی نوری تکفام بر سطح فلزی می‌تابد، هر فوتون صرفاً با یکی از الکترون‌های فلز برهم‌کنش می‌کند. اگر فوتون انرژی کافی داشته باشد تا فرایند خارج کردن الکترون از فلز را انجام دهد، الکترون به طور آنی از آن گسیل می‌شود. در این صورت بخشی از انرژی فوتون صرف جدا کردن الکترون از فلز می‌شود و مابقی آن به انرژی جنبشی الکترون خارج‌شده تبدیل می‌شود.

۱ــ این نام را نیمی‌دان آمریکایی، گیلبرت لوئیس، در سال ۱۹۲۶ میلادی برای نخستین بار پیشنهاد کرد.

این نظر اینشتین را می‌توان به کمک قانون پایستگی انرژی به‌صورت زیر نوشت :

$$hf = W + K \qquad \text{(قانون پایستگی انرژی در اثر فوتوالکتریک)} \qquad (۵ــ۲)$$

که در آن W کار (انرژی) لازم برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح یک فلز و K انرژی جنبشی آنها پس از جدا شدن از سطح آن فلز است. از آنجا که برخی از الکترون‌ها در فلز کمتر مقیده‌اند، برای خارج کردن آنها از فلز کار کمتری لازم است. بنابراین اگر حداقل کار لازم برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح یک فلز خاص W باشد، انرژی جنبشی سریع‌ترین فوتوالکترون‌های گسیل‌شده از آن برابر خواهد بود با :

$$K_{max} = hf - W \qquad \text{(معادلهٔ فوتوالکتریک)} \qquad (۵ــ۳)$$

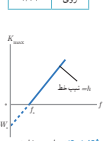
W را تابع کار فلز می‌نامند که به جنس فلز بستگی دارد و همان‌گونه که گفتیم، کمینه کار لازم برای خارج کردن یک الکترون از یک فلز معیّن است. در جدول ۵ــ۱ تابع کار چند فلز داده شده است.

جدول ۵ــ۱ تابع کار چند فلز

فلز	W_0(eV)
طلا	۵/۲۰
کبالت	۵/۰۱
نیکل	۴/۹۰
مس	۴/۷۰
نقره	۴/۶۴
تنگستن	۴/۵۲
آهن	۴/۵۰
روی	۴/۳۱

اگر نمودار K_{max} برحسب f را با توجه به معادلهٔ ۵ــ۳ رسم کنیم، به‌صورت خط راستی خواهد بود که محور افقی را در $f = f_c$ قطع می‌کند (شکل ۵ــ۴). در این بسامد، که معمولاً بسامد آستانه نامیده می‌شود، الکترون بدون هیچ انرژی جنبشی‌ای در آستانهٔ ترک فلز است. در این صورت با توجه به معادلهٔ ۵ــ۳، انرژی فوتون فرودی مساوی تابع کار فلز است و بسامد آستانه از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$f_c = \frac{W_0}{h} \qquad \text{(بسامد آستانهٔ فوتوالکترون‌ها)} \qquad (۵ــ۴)$$



شکل ۵ــ۴ نمودار بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها برحسب بسامد نور فرودی. وقتی بسامد نور فرودی بزرگ‌تر از f_c یا مساوی با آن باشد فوتون‌ها می‌توانند الکترون‌ها را از فلز خارج کنند.

پرسش ۵ــ۱
تابشی با بسامد معین باعث می‌شود تا فوتوالکترون‌هایی سطح فلز ۱ را ترک کنند، ولی از سطح فلز ۲ خارج نشوند. انرژی فوتون‌های فرودی را با تابع کار فلزها مقایسه کنید.

توجه : در فیزیک اتمی و فیزیک هسته‌ای، یکای ژول برای بیان انرژی فوتون‌ها و ذرات، یکای بسیار بزرگی است. به همین دلیل از یکایی به نام الکترون ولت (eV) استفاده می‌کنیم. برای آشنایی با این یکای غیر SI، فرض کنید الکترونی با بار $q = -e = -۱/۶۰ \times ۱۰^{-۱۹}\ \text{C}$، بین دو نقطه با اختلاف پتانسیل ۱V حرکت کند. در این صورت بنا به رابطهٔ $\Delta U = q\Delta V$ که در فیزیک ۲ با آن آشنا شدید، اندازهٔ تغییر در انرژی پتانسیل الکتریکی الکترون برابر است با :

$$|\Delta U| = |q\Delta V| = |(-۱/۶۰ \times ۱۰^{-۱۹}\text{C})\,(۱\text{V})| = ۱/۶۰ \times ۱۰^{-۱۹}\text{J}$$

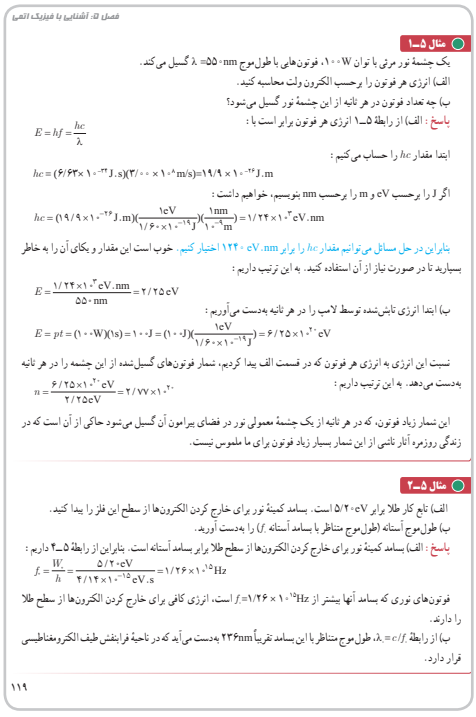
این مقدار انرژی را بنا به تعریف، یک الکترون ولت (1eV = $۱/۶۰ \times ۱۰^{-۱۹}$ J) می‌نامند. مضرب‌های دیگری از این یکا به‌صورت keV (کیلو الکترون ولت) و MeV (مگا الکترون ولت) اغلب به کار می‌روند.

به این ترتیب یکای ثابت پلانک را به جای J.s می‌توان برحسب یکای eV.s نیز بیان کرد :

$$h = (۶/۶۳ \times ۱۰^{-۳۴}\ \text{J.s})\left(\frac{۱\text{eV}}{۱/۶۰ \times ۱۰^{-۱۹}\text{J}}\right) = ۴/۱۴ \times ۱۰^{-۱۵}\ \text{eV.s}$$

پرسش ۵ـ۱

پاسخ مورد انتظار : انرژی فوتون‌هایی که به سطح فلز ۲ برخورد می‌کنند از تابع کار فلز ۲ کمتر است. به همین دلیل فوتوالکترونی از سطح فلز ۲ خارج نمی‌شود.



فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی

مثال ۵ـ۱

یک چشمهٔ نور مرئی با توان ۱۰۰W، فوتون‌هایی با طول‌موج $\lambda = 550\,nm$ گسیل می‌کند.

الف) انرژی هر فوتون را برحسب الکترون‌ولت محاسبه کنید.

ب) چه تعداد فوتون در هر ثانیه از این چشمهٔ نور گسیل می‌شود؟

پاسخ : الف) از رابطهٔ ۵ـ۱ انرژی هر فوتون برابر است با :

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

ابتدا مقدار hc را حساب می‌کنیم :

$$hc = (6/63\times10^{-34}\,J.s)(3/00\times10^{8}\,m/s) = 19/9\times10^{-26}\,J.m$$

اگر J را برحسب eV و m را برحسب nm بنویسیم، خواهیم داشت :

$$hc = (19/9\times10^{-26}\,J.m)\left(\frac{1eV}{1/6\times10^{-19}\,J}\right)\left(\frac{1nm}{10^{-9}\,m}\right) = 1/24\times10^{3}\,eV.nm$$

بنابراین در حل مسائل می‌توانیم مقدار hc را برابر $1240\,eV.nm$ اختیار کنیم. خوب است این مقدار و یکای آن را به خاطر بسپارید تا در صورت نیاز از آن استفاده کنید. به این ترتیب داریم :

$$E = \frac{1/24\times10^{3}\,eV.nm}{550\,nm} = 2/25\,eV$$

ب) ابتدا انرژی تابش‌شده توسط لامپ را در هر ثانیه به‌دست می‌آوریم :

$$E = pt = (100W)(1s) = 100J = (100J)\left(\frac{1eV}{1/6\times10^{-19}\,J}\right) = 6/25\times10^{20}\,eV$$

نسبت این انرژی به انرژی هر فوتون که در قسمت الف پیدا کردیم، شمار فوتون‌های گسیل‌شده از این چشمه را در هر ثانیه به‌دست می‌دهد. به این ترتیب داریم :

$$n = \frac{6/25\times10^{20}\,eV}{2/25\,eV} = 2/77\times10^{20}$$

این شمار زیاد فوتون، که در هر ثانیه از یک چشمهٔ معمولی نور در فضای پیرامون آن گسیل می‌شود حاکی از آن است که در زندگی روزمره آثار ناشی از این شمار بسیار زیاد فوتون برای ما ملموس نیست.

مثال ۵ـ۲

الف) تابع کار طلا برابر ۵/۲۰eV است. بسامد کمینهٔ نور برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح این فلز را پیدا کنید.

ب) طول‌موج آستانه (طول‌موج متناظر با بسامد آستانه f_0) را به‌دست آورید.

پاسخ : الف) بسامد کمینهٔ نور برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح طلا برابر بسامد آستانه است. بنابراین از رابطهٔ ۵ـ۴ داریم :

$$f_0 = \frac{W_0}{h} = \frac{5/20\,eV}{4/14\times10^{-15}\,eV.s} = 1/26\times10^{15}\,Hz$$

فوتون‌های نوری که بسامد آنها بیشتر از $f_0 = 1/26\times10^{15}\,Hz$ است، انرژی کافی برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح طلا را دارند.

ب) از رابطهٔ $\lambda_0 = c/f_0$، طول‌موج متناظر با این بسامد تقریباً ۲۳۶nm به‌دست می‌آید که در ناحیهٔ فرابنفش طیف الکترومغناطیسی قرار دارد.

۱۱۹

فیزیک ۳

جدول ۵ـ۱ تابع کار چند فلز

فلز	W_0(eV)
طلا	۵/۲۰
کبالت	۵/۰۱
نیکل	۴/۹۰
مس	۴/۷۰
نقره	۴/۶۴
تنگستن	۴/۵۲
آهن	۴/۵۰
روی	۴/۳۱

شکل ۵ـ۴ نمودار بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها برحسب بسامد نور فرودی. وقتی بسامد نور فرودی برابر f_0 یا بسامدی با آن باشد فوتون‌ها می‌توانند الکترون‌ها را از فلز خارج کنند.

این نظر اینشتین را می‌توان به کمک قانون بایستگی انرژی به‌صورت زیر نوشت :

$$hf = W + K \qquad \text{(قانون بایستگی انرژی در اثر فوتوالکتریک)} \qquad (۵ـ۲)$$

که در آن W کار (انرژی) لازم برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح یک فلز و K انرژی جنبشی آنها پس از جدا شدن از سطح آن فلز است. از آنجا که برخی از الکترون‌ها در فلز کمتر مقیدند، برای خارج کردن آنها از فلز کار کمتری لازم است. بنابراین اگر حداقل کار لازم برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح یک فلز خاص W_0 باشد، انرژی جنبشی سریع‌ترین فوتوالکترون‌های گسیل‌شده از آن برابر خواهد بود با :

$$K_{max} = hf - W_0 \qquad \text{(معادلهٔ فوتوالکتریک)} \qquad (۵ـ۳)$$

W_0 را تابع کار فلز می‌نامند که به جنس فلز بستگی دارد و همان‌گونه که گفتیم، کمینه کار لازم برای خارج کردن یک الکترون از یک فلز معین است. در جدول ۵ـ۱ تابع کار چند فلز داده شده است.

اگر نمودار K_{max} برحسب f را با توجه به معادلهٔ ۵ـ۳ رسم کنیم، به‌صورت خط راستی خواهد بود که محور افقی را در $f = f_0$ قطع می‌کند (شکل ۵ـ۴). در این بسامد، که معمولاً بسامد آستانه نامیده می‌شود، الکترون بدون هیچ انرژی جنبشی‌ای در آستانهٔ ترک فلز است. در این صورت با توجه به معادلهٔ ۵ـ۳، انرژی فوتون فرودی مساوی تابع کار فلز است و بسامد آستانه از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$f_0 = \frac{W_0}{h} \qquad \text{(بسامد آستانهٔ فوتوالکترون‌ها)} \qquad (۵ـ۴)$$

پرسش ۵ـ۱

تابشی با بسامد معین باعث می‌شود تا فوتوالکترون‌هایی سطح فلز ۱ را ترک کنند، ولی از سطح فلز ۲ خارج نشوند. انرژی فوتون‌های فرودی را با تابع کار فلزها مقایسه کنید.

توجه : در فیزیک اتمی و فیزیک هسته‌ای، یکای زول برای بیان انرژی فوتون‌ها و ذرات، یکای بسیار بزرگی است. به همین دلیل از یکایی به نام الکترون ولت (eV) استفاده می‌کنیم. برای آشنایی با این یکای غیر SI، فرض کنید الکترونی با بار $q = -e = -1/60\times10^{-19}\,C$، بین دو نقطه با اختلاف پتانسیل ۱V حرکت کند. در این صورت بنا به رابطهٔ $\Delta U = q\Delta V$ که در فیزیک ۲ با آن آشنا شدید، اندازهٔ تغییر در انرژی پتانسیل الکتریکی الکترون برابر است با :

$$|\Delta U| = |q\Delta V| = |(-1/60\times10^{-19}\,C)(1V)| = 1/60\times10^{-19}\,J$$

این مقدار انرژی را بنا به تعریف، یک الکترون ولت ($1eV = 1/60\times10^{-19}\,J$) می‌نامند. مضرب‌های دیگری از این یکا به‌صورت keV (کیلو الکترون ولت) و MeV (مگا الکترون ولت) اغلب به کار می‌روند.

به این ترتیب یکای ثابت پلانک را به جای J.s می‌توان برحسب یکای eV.s نیز بیان کرد :

$$h = (6/63\times10^{-34}\,J.s)\left(\frac{1eV}{1/60\times10^{-19}\,J}\right) = 4/14\times10^{-15}\,eV.s$$

۱۱۸

تمرین ۵ـ۱

حل مورد انتظار

الف) $\lambda_0 = 254\,nm$, $W_0 = ?$

$$f_0 = \frac{W_0}{h} \Rightarrow W_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = \frac{1240\,eV.nm}{254\,nm} \simeq 4/88\,eV$$

ب) به ازای طول موج‌های مساوی با طول موج آستانه اثر فوتوالکتریک رخ می‌دهد و فوتون الکترون در آستانه ترک کردن سطح فلز است. به ازای طول موج‌های بزرگ‌تر از طول موج آستانه اثر فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. چنانچه طول موج نور فرودی کمتر از طول موج آستانه باشد، اثر فوتوالکتریک رخ می‌دهد و فوتو الکترون‌ها سطح فلز را ترک می‌کنند.

تمرین ۵ـ۲

حل مورد انتظار :

الف) با توجه به جدول ۵ـ۱، تابع کار روی ۴/۳۱eV است. به این ترتیب بلندترین طول موج (که در واقع همان طول موج آستانه است) برای گسیل فوتو الکترون‌ها برابر است با

$$f_{\circ}=\frac{W_{\circ}}{h}\Rightarrow \lambda_{\circ}=\frac{hc}{W_{\circ}}=\frac{۱۲۴۰\text{eV.nm}}{۴/۳۱\text{eV}}\simeq ۲۸۷\text{nm}$$

ب) از رابطهٔ ۵ـ۳ داریم :

$$k_{\max}=hf-W_{\circ}=\frac{hc}{\lambda}-W_{\circ}=\frac{۱۲۴۰\text{eV.nm}}{۲۸۷\text{nm}}-۴/۳۱\text{eV}=۰/۰۱\text{eV}=(۰/۰۱\text{eV})(\frac{۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}\text{J}}{۱\text{eV}})=۱/۶\times ۱۰^{-۲۱}\text{J}$$

به این ترتیب داریم :

$$\frac{۱}{۲}mv_{\max}^{۲}=۱/۶\times ۱۰^{-۲۱}\text{J}$$

$$\frac{۱}{۲}(۹/۱۱\times ۱۰^{-۳۱}\text{kg})\,v_{\max}^{۲}=۱/۶\times ۱۰^{-۲۱}\text{J}\Rightarrow$$

$$v_{\max}=\sqrt{۳/۵۱\times ۱۰^{۹}(\text{J/kg})}=۵/۹۲\times ۱۰^{۴}\,\text{m/s}$$

راهنمای تدریس

۵ـ۲ طیف خطی

یکی دیگر از چالش‌های فیزیک دانان کلاسیک در اواخر قرن نوزدهم، تبیین درست دلیل تفاوت طیف گسیلی پیوسته از جسم جامد و طیف گسیلی خطی از گازها بود. به‌عبارت دیگر فیزیک‌دانان آن زمان، با توجه به نظریات فیزیک کلاسیک قادر نبودند که توضیح دهند که چرا طیف گسیل شده از گازها به‌صورت طیف خطی است در حالی که طیف گسیل شده از اجسام جامد به‌صورت طیف پیوسته است که شامل تمامی طول موج‌ها است.

به این ترتیب باید در ابتدا این موضوع به‌عنوان یکی دیگر از چالش‌های فیزیک‌دانان کلاسیک برای دانش‌آموزان به‌خوبی شرح داده شود و سپس مطابق آنچه در کتاب درسی آمده است فرایند آموزش را دنبال کنید.

توجه

در شکل ۵ـ۶، طیف گسیلی از رشتهٔ تنگستن یک لامپ روشن نشان داده شده است. از آنجا که رشتهٔ تنگستن جسمی جامد است، طیف آن پیوسته است. در این شکل تنها ناحیهٔ مرئی طیف گسیل شده نشان داده شده است. در شکل ۵ـ۷ طیف گسیلی خطی برای گازهای نئون و جیوه نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، طیف این گاز تنها شامل تعدادی خط‌های رنگی است (در این

شکل‌ها فقط خط‌های ناحیهٔ مرئی نشان داده شده است). تعداد این خط‌ها و مکان آنها برای هر گاز، منحصر به‌فرد است و از گازی به گاز دیگر متفاوت است. به‌عبارت دیگر، طیف خطی هر گاز، به مثابهٔ اثر انگشت آن گاز محسوب می‌شود.

ادامهٔ راهنمای تدریس

یکی از دانشمندانی که در نیمهٔ دوم قرن نوزدهم به اندازه‌گیری طول موج طیف گسیلی گازهای اتمی در ناحیهٔ مرئی پرداخت، اندرس انگستروم (۱۸۷۴ ــ ۱۸۱۴ م.) دانشمند سوئدی بود. اندازه‌گیری طول موج‌های مرئی طیف گسیلی توسط انگستروم برای گاز اتمی هیدروژن مبنای معادله‌ای شد که بالمر (۱۸۹۸ ــ ۱۸۲۵ م) دانشمند سوئیسی آن را به‌طور تجربی به‌دست آورد. این معادله که حاصل بازی ریاضیاتی با داده‌های انگستروم در خصوص طیف گسیلی گاز اتمی هیدروژن بود، در معادلهٔ ۵ــ۵ کتاب درسی بیان شده است.

فیزیک ۳

برای تشکیل طیف گسیلی خطی اتم‌های هر گاز نظیر هیدروژن، هلیم، جیوه، سدیم و نئون معمولاً از یک لامپ باریک و بلند شیشه‌ای که حاوی مقداری گاز رقیق و کم‌فشار است استفاده می‌شود. دو الکترود به نام‌های آند و کاتد در دو طرف این لامپ قرار دارد که به‌ترتیب به پایانه‌های مثبت و منفی یک منبع تغذیه با ولتاژ بالا وصل‌اند. این ولتاژ بالا، سبب تخلیهٔ الکتریکی در گاز می‌شود و اتم‌های گاز درون لامپ شروع به گسیل نور می‌کنند. آزمایش نشان می‌دهد که طیف خطی ایجادشده و همچنین رنگ نور گسیل‌شده، به نوع گاز درون لامپ بستگی دارد. در میان طیف گسیلی گازهای مختلف، طیف خطی هیدروژن اتمی هم از جنبهٔ تاریخی و هم از جنبهٔ نظری اهمیت خاصی دارد. طیف خطی این گاز در ناحیهٔ مرئی، شامل یک رشتهٔ منظم از خط‌هایی است که محل آنها در شکل ۵ــ۸ نشان داده شده است. در سال ۱۸۸۵ میلادی، بالمر، ریاضی‌دان سوئیسی، رابطه‌ای ساده پیشنهاد کرد که طول موج هر یک از خط‌های شناخته‌شده مربوط به طیف گسیلی خطی هیدروژن اتمی را به‌دست می‌داد. این رابطه عبارت است از :

$$\lambda = (۳۶۴/۵۶\text{nm})\frac{n^۲}{n^۲-۲^۲} \qquad \text{(معادلهٔ بالمر)} \qquad (۵ــ۵)$$

که در آن $n \geq ۳$ و همواره عددی صحیح است. با قرار دادن $n = ۳,۴,۵,۶$ در معادلهٔ بالمر، طول موج خط‌های طیف گسیلی اتم هیدروژن در ناحیهٔ مرئی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید :

$n = ۳ \rightarrow \lambda_۱ = ۶۵۶/۲\text{nm}$ (خط قرمز)

$n = ۴ \rightarrow \lambda_۲ = ۴۸۶/۰۸\text{nm}$ (خط آبی)

$n = ۵ \rightarrow \lambda_۳ = ۴۳۴/۰۰\text{nm}$ (خط نیلی)

$n = ۶ \rightarrow \lambda_۴ = ۴۱۰/۱۳\text{nm}$ (خط بنفش)

شکل ۵ــ۸ الف) به کمک منشور، طول‌موج‌های گسیلی از گاز، از یکدیگر جدا و طیف خطی آن تشکیل شده است. ب) اسباب آزمایش تشکیل و مشاهدهٔ طیف گسیلی گازها

۱۲۲

توجه

از آنجا که در برخی از مدارس لامپ‌های حاوی گازهای کم‌فشار برخی از عناصر و از جمله گاز هیدروژن موجود است، لذا توصیه می‌شود مطابق شکل ۵ــ۸ ب کتاب درسی این آزمایش را انجام دهید تا دانش‌آموزان طیف گسیلی خطی گاز اتمی هیدروژن را به‌طور مستقیم مشاهده کنند.

ادامهٔ راهنمای تدریس

یکی از پیش‌بینی‌های بالمر پس از به‌دست آوردن رابطهٔ ۵ــ۵ این بود که گاز هیدروژن هنگام تابش ممکن است خط‌های دیگری در ناحیه‌های دیگر طیف امواج الکترومغناطیسی (شامل فرابنفش و فروسرخ) داشته باشد. هرچند بالمر آن قدر زنده نماند تا نتیجهٔ پیش‌بینی علمی خود را ببیند (به تاریخ‌های مندرج در جدول ۵ــ۲ توجه شود)، ولی براساس همین پیش‌بینی، ریدبرگ دانشمند سوئدی به بازنویسی معادلهٔ بالمر پرداخت و رابطه‌ای کلی‌تر برای به‌دست آوردن طول موج‌های طیف گسیلی گاز اتمی هیدروژن به‌دست آورد. این رابطه به‌صورت معادلهٔ ۵ــ۶ در کتاب درسی آمده است که به‌ازای $n' = ۲$ به معادله ۵ــ۵ بالمر می‌رسیم که مربوط به طول موج‌های طیف هیدروژن اتمی در ناحیهٔ مرئی است.

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی

یوهانس رابرت ریدبرگ (۱۹۱۹-۱۸۵۴ م.)
فیزیک‌دان و متخصص طیف‌سنجی، در سوئد بدنیا آمد. هنگامی که ۴ ساله بود پدرش از دنیا رفت و خانوادهٔ وی مجبور شدند با درآمد اندکی زندگی خود را سپری کنند. در سال ۱۸۷۳ دورهٔ دبیرستان را با نمرات ممتاز در فیزیک و ریاضی به پایان رسانید و در همان سال در دانشگاه لاند ثبت نام کرد. وی در سال ۱۸۷۹ دورهٔ دکترای خود را به پایان رسانید. پس از آن به تدریس ریاضیات و فیزیک مشغول شد و در همین دوران بود که به مطالعهٔ وزن استاندارد اتمی عناصر در جدول تناوبی متمایل پرداخت.
کار بعدی وی پژوهش دربارهٔ طیف اتمی گازها بود که به ارائهٔ رابطه‌ای برای اصلاح معادلهٔ تجربی بالمر در خصوص طیف گسیلی خطی هیدروژن اتمی منجر شد. این رابطه امروزه به نام وی شناخته می‌شود. ریدبرگ در سال ۱۹۱۳ تمام‌اً بیمار شد و پس از یک دورهٔ طولانی بیماری، در سال ۱۹۱۹ درگذشت.

بالمر با تأمل بیشتر روی رابطهٔ ۵ــ۵، پیشنهاد کرد که ممکن است رشته‌های دیگری از خط‌های که تا آن زمان در طیف هیدروژن دیده نشده‌اند وجود داشته باشند. ریدبرگ، فیزیک‌دان سوئدی، در راستای همین موضوع تلاش فراوانی برای کامل‌تر کردن طیف گسیلی خطی هیدروژن انجام داد و در سال ۱۸۸۸ میلادی معادلهٔ بالمر را به‌صورت زیر اصلاح و بازنویسی کرد:

$$\frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{n'^۲} - \frac{۱}{n^۲}\right) \qquad n > n' \qquad \text{(معادلهٔ ریدبرگ)} \qquad (۵ــ۶)$$

که در آن R ثابت ریدبرگ و مقدار آن برابر $۰/۰۱۰۹۷۳۷۳\ (\text{nm})^{-۱}$ است و برای سادگی در محاسبه‌ها، مقدار آن را می‌توان $۰/۰۱۱\ (\text{nm})^{-۱}$ در نظر گرفت. همچنین n' عدد صحیح مثبتی است که به‌ازای $n' = ۲$ رابطهٔ ۵ــ۵ مربوط به رشتهٔ بالمر به‌دست می‌آید که در ناحیهٔ مرئی طیف قرار دارد.
چندین سال پس از درگذشت بالمر و با اصلاح ابزارها و روش‌های طیف‌سنجی، امکان کشف گسترهٔ طول‌موج‌های دیگری در طیف گسیلی گاز هیدروژن به‌وجود آمد و مشخص شد که به‌جز رشتهٔ بالمر رشته‌های دیگری در طیف گاز هیدروژن اتمی وجود دارد[۱]. در جدول ۵ــ۲ نام این رشته‌ها، که به‌ازای مقادیر متفاوت n' آمده‌اند درج شده است.

جدول ۵ــ۲ رشتهٔ خط‌های طیف گسیلی هیدروژن اتمی

نام طیف	تاریخ کشف	مقدار n'	رابطهٔ ریدبرگ مربوط به رشته	مقدارهای n	ناحیهٔ طیف
لیمان	۱۹۰۶ــ۱۹۱۴	۱	$\frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{۱^۲} - \frac{۱}{n^۲}\right)$	۲،۳،۴،...	فرابنفش
بالمر	۱۸۸۵	۲	$\frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{۲^۲} - \frac{۱}{n^۲}\right)$	۳،۴،۵،...	فرابنفش و مرئی
پاشن	۱۹۰۸	۳	$\frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{۳^۲} - \frac{۱}{n^۲}\right)$	۴،۵،۶،...	فروسرخ
براکت	۱۹۲۲	۴	$\frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{۴^۲} - \frac{۱}{n^۲}\right)$	۵،۶،۷،...	فروسرخ
پفوند	۱۹۲۴	۵	$\frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{۵^۲} - \frac{۱}{n^۲}\right)$	۶،۷،۸،...	فروسرخ

۱ــ زمانی که مدل اتمی بور در سال ۱۹۱۳ میلادی مطرح شد، خط‌های گسیلی برای گاز هیدروژن اتمی فقط در رشتهٔ بالمر، رشتهٔ پاشن و تعدادی از خط‌های رشتهٔ لیمان به‌طور قطعی معلوم شده بودند. این مدل که با پیش‌بینی بالمر توافق خوبی داشت منجر به پژوهش‌های برای یافتن این رشته‌ها شد، به طوری که سرانجام خط‌های رشته‌های براکت و پفوند و همچنین خط‌های باقی‌مانده رشتهٔ لیمان به‌تدریج کشف شدند.

۱۲۳

توجه

همان‌طور که در جدول ۵ــ۲ دیده می‌شود، حدود ۴۰ سال طول کشید تا پس از پیش‌بینی بالمر در سال ۱۸۸۵ میلادی خط‌های باقیمانده در طیف گسیلی خطی هیدروژن اتمی در ناحیهٔ فروسرخ به سبب ساخت وسایل اندازه‌گیری دقیق‌تر، کشف شوند. نکته جالب توجه دیگر این جدول این است که خط‌های دیگر طیف هیدروژن اتمی که پس از ارائه مدل اتمی بور در سال ۱۹۱۳ میلادی کشف شدند، به‌نوعی طول موج آنها توسط مدل اتمی بور نیز پیدا شده بود. انطباق نتایج تجربی و نتایج به‌دست آمده از مدل بور یکی از موفقیت‌های مدل برای اتم هیدروژن به حساب می‌آید.

تمرین ۵ـ۳

حل مورد انتظار :

همان‌طور که در متن تمرین نیز اشاره شده است رشتهٔ پاشن متناظر با $n' = ۳$ در رابطهٔ ۵ـ۶ خواهد بود. به این ترتیب داریم :

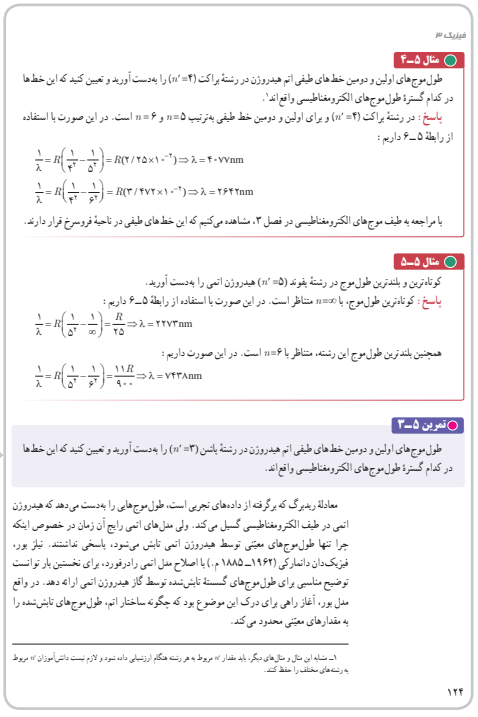
$$\frac{۱}{\lambda} = R(\frac{۱}{۳^۲} - \frac{۱}{n^۲})$$

طول موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی به‌ترتیب به‌ازای $n = ۴$ و $n = ۵$ به‌دست می‌آید. در این‌صورت داریم :

$$\frac{۱}{\lambda_۱} = R(\frac{۱}{۳^۲} - \frac{۱}{۴^۲}) = \frac{۷R}{۱۴۴} \Rightarrow \lambda_۱ = ۱۸۷۰\,\text{nm}$$

$$\frac{۱}{\lambda_۲} = R(\frac{۱}{۳^۲} - \frac{۱}{۵^۲}) = \frac{۱۶R}{۲۲۵} \Rightarrow \lambda_۲ = ۱۲۷۸\,\text{nm}$$

با توجه به شکل ۳ـ۲۲ یا مراجعه به جدول ۵ـ۲، این طول موج‌ها در ناحیهٔ فروسرخ طیف امواج الکترومغناطیسی قرار دارند.



فیزیک ۳

مثال ۵ـ۴

طول‌موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی اتم هیدروژن در رشتهٔ براکت ($n' = ۴$) را به‌دست آورید و تعیین کنید که این خط‌ها در کدام گسترهٔ طول‌موج‌های الکترومغناطیسی واقع‌اند[۱].

پاسخ : در رشتهٔ براکت ($n' = ۴$) و برای اولین و دومین خط طیفی به‌ترتیب $n = ۵$ و $n = ۶$ است. در این صورت با استفاده از رابطهٔ ۵ـ۶ داریم :

$$\frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{۴^۲} - \frac{۱}{۵^۲}\right) = R(۲/۲۵ \times ۱۰^{-۲}) \Rightarrow \lambda = ۴۰۵۷\,\text{nm}$$

$$\frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{۴^۲} - \frac{۱}{۶^۲}\right) = R(۳/۴۷۲ \times ۱۰^{-۲}) \Rightarrow \lambda = ۲۶۲۱\,\text{nm}$$

با مراجعه به طیف موج‌های الکترومغناطیسی در فصل ۳، مشاهده می‌کنیم که این خط‌های طیفی در ناحیهٔ فروسرخ قرار دارند.

مثال ۵ـ۵

کوتاه‌ترین و بلندترین طول‌موج در رشتهٔ پفوند ($n' = ۵$) هیدروژن اتمی را به‌دست آورید.

پاسخ : کوتاه‌ترین طول‌موج، یا $n = \infty$ متناظر است. در این صورت با استفاده از رابطهٔ ۵ـ۶ داریم :

$$\frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{۵^۲} - \frac{۱}{\infty}\right) = \frac{R}{۲۵} \Rightarrow \lambda = ۲۲۷۳\,\text{nm}$$

همچنین بلندترین طول‌موج این رشته، متناظر با $n = ۶$ است. در این صورت داریم :

$$\frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{۵^۲} - \frac{۱}{۶^۲}\right) = \frac{۱۱R}{۹۰۰} \Rightarrow \lambda = ۷۴۳۸\,\text{nm}$$

تمرین ۵ـ۳

طول‌موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی اتم هیدروژن در رشتهٔ بالمر ($n' = ۳$) را به‌دست آورید و تعیین کنید که این خط‌ها در کدام گسترهٔ طول‌موج‌های الکترومغناطیسی واقع‌اند.

معادلهٔ ریدبرگ که برگرفته از داده‌های تجربی است، طول‌موج‌هایی را به‌دست می‌دهد که هیدروژن اتمی در طیف الکترومغناطیسی گسیل می‌کند. ولی مدل‌های اتمی رایج آن زمان در خصوص اینکه چرا تنها طول‌موج‌های معیّنی توسط هیدروژن اتمی تابش می‌شود، پاسخی نداشتند. نیلز بور، فیزیک‌دان دانمارکی (۱۹۶۲ـ۱۸۸۵ م.) با اصلاح مدل اتمی رادرفورد، برای نخستین بار توانست توضیح مناسبی برای طول‌موج‌های گسستهٔ تابش‌شده توسط گاز هیدروژن اتمی ارائه دهد. در واقع مدل بور، آغاز راهی برای درک این موضوع بود که چگونه ساختار اتم، طول‌موج‌های تابش‌شده را به مقدارهای معیّنی محدود می‌کند.

۱ـ مسئله این مثال و مثال‌های دیگر، باید مقدار n' مربوط به هر رشته هنگام ارزشیابی داده شود و لازم نیست دانش‌آموزان n' مربوط به رشته‌های مختلف را حفظ کنند.

۱۲۴

راهنمای تدریس

۵ـ۳ مدل اتم رادرفورد ــ بور

تا پیش از ارائهٔ مدل اتمی تامسون در سال ۱۹۰۴ میلادی، مدل اتمی رایج مدل دالتون بوده است که اتم‌ها را به‌صورت ذرات بسیار ریز کروی‌شکل بدون بار الکتریکی درنظر می‌گرفت که اندازهٔ این ذرات بسیار ریز و اندازه و جرم آنها برای عناصر مختلف با هم تفاوت دارد. این مدل به مدل توپ بیلیارد نیز موسوم بود. پس از کشف الکترون توسط تامسون، نیاز به تغییر مدل اتمی دالتون احساس شد به طوری که تامسون دریافت که منشأ الکترون‌های خارج شده از جسم باید اتم باشد. به‌همین دلیل تامسون علاقه‌مند شد که روی ارائه مدل اتمی جدیدی کار کند. تامسون مدل اتمی خود را در سال ۱۹۰۴ ارائه کرد. تامسون پیشنهاد کرد که اتم به‌صورت ذرهٔ کروی شکل بسیار ریزی است که به‌طور همگن دارای بار مثبت است و الکترون‌ها که ذره‌های بسیار ریزتری هستند در جاهای مختلف این ذرهٔ باردار مثبت پخش شده‌اند (معروف به مدل کیک کشمشی).

مدل تامسون شامل بسیاری از خواص شناخته شده اتم‌ها تا آن زمان

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی

۵ـ۳ مدل اتم رادرفورد ــ بور

جوزف تامسون فیزیک‌دان انگلیسی، در سال ۱۸۹۶ میلادی موفق به کشف الکترون و اندازه‌گیری نسبت بار به جرم e/m آن شد. کشف الکترون، تامسون را ترغیب کرد تا مدلی برای اتم ارائه دهد. این مدل سرانجام در سال ۱۹۰۴ میلادی ارائه شد. بنا بر مدل تامسون، اتم همچون کره‌ای است که بار مثبت به‌طور همگن در سرتاسر آن گسترده شده است و الکترون‌ها که سهم ناچیزی در جرم اتم دارند در جاهای مختلف آن پراکنده شده‌اند. این مدل را گاهی مدل کیک کشمشی هم می‌گویند، زیرا الکترون‌ها مانند دانه‌های کشمش در آن پخش شده‌اند (شکل ۵ـ۹).

در مدل اتمی تامسون، وقتی الکترون‌ها با بسامدهای معیّنی حول وضع تعادلشان نوسان می‌کنند این نوسان سبب تابش امواج الکترومغناطیسی از اتم می‌شود. یکی از ناکامی‌های مدل تامسون این بود که بسامدهای تابش گسیل‌شده از اتم، که این مدل پیش‌بینی می‌کرد، با نتایج تجربی سازگار نبود.

وقتی ارنست رادرفورد در سال ۱۹۱۱ میلادی نتایج آزمایش‌هایی را انتشار داد که مدل تامسون نمی‌توانست آنها را توضیح دهد، این مدل کنار گذاشته شد. رادرفورد و همکارانش باریکه‌ای از ذره‌های دارای بار مثبت را (از جنس هستهٔ اتم هلیم که به آن ذرهٔ آلفا گفته می‌شود) بر سطح ورقه‌ای نازک از جنس طلا فرو تاباندند (شکل ۵ـ۱۰). رادرفورد پیش از مدل تامسون انتظار داشت که تمامی ذره‌های آلفا، با انحراف بسیار اندکی از ورقهٔ طلا بگذرند. در عمل نیز بیشتر این ذره‌ها بدون انحراف یا با انحراف اندکی از ورقهٔ طلا می‌گذشتند و در برخورد با صفحهٔ فلوئورسان، در پشت آن، جرقه‌های نورانی تولید می‌کردند. با وجود این، برخی از ذره‌های آلفا در هنگام خروج از ورقهٔ نازک طلا، در زاویه‌های بزرگ منحرف و پراکنده می‌شدند و حتی تعدادی از آنها نیز به عقب برمی‌گشتند! رادرفورد پس از انجام این آزمایش و بر اساس مدل تامسون و شناختی که از باریکهٔ ذرات آلفا داشت، گفت : «مثل آن بود که گلولهٔ توپی را به ورقهٔ نازکی از کاغذ شلیک کنید و با شگفتی مشاهده کنید که پس از برخورد گلولهٔ توپ با سطح کاغذ، گلوله بازگردد.» این ذره‌ها باید با جیز برچربی برخورد کرده باشند! اما با چه چیزی؟ رادرفورد استدلال کرد که ذره‌های بدون انحراف باید از قسمت‌هایی از ورقه گذشته باشند که تهی بوده باشند، در حالی که ذره‌های با انحراف شدید از مرکزهایی بسیار جگال و دارای بار مثبت منحرف شده‌اند. وی سرانجام نتیجه گرفت باید هسته‌ای جگال و دارای بار مثبت در مرکز هر اتم باشد که با مدل اتمی تامسون به‌طور آشکار مغایرت داشت.

شکل ۵ـ۱۰ آزمایش پراکندگی رادرفورد که در آن ذرات α از یک ورقهٔ نازک طلا پراکنده شده‌اند. تمام وسیله‌ها در یک اتاقک خلأ قرار دارد که در این شکل نشان داده نشده است.

شکل ۵ـ۹ در مدل تامسون، بار الکتریکی مثبت به‌طور همگن در کره‌ای توزیع شده است و الکترون‌ها مانند کشمش‌های کیک در نقاط مختلف آن قرار دارند.

جوزف تامسون (۱۹۴۰ـ۱۸۵۶ م.)

۱۲۵

بود؛ که از جملهٔ آنها می‌توان به اندازه، جرم، تعداد الکترون‌ها و خنثایی الکتریکی اتم اشاره کرد. تامسون برای دلیل تابش اتم‌ها نیز، دلیل ظاهراً قانع‌کننده‌ای ارائه داد. تامسون اشاره می‌کرد که وقتی الکترون‌ها حول وضع تعادلشان نوسان کنند، اتم تابش می‌کند. ولی مشکل مدل تامسون در خصوص تابش اتم، مربوط به عدم انطباق بین بسامدهای به‌دست آمده از طریق تجربه و بسامدهایی بود که تامسون از طریق محاسبه به‌دست می‌آورد. با وجود این عدم موفقیت مدل تامسون، این مدل برای چندین سال تقریباً مورد پذیرش دیگر دانشمندان قرار گرفته بود.

دانستنی برای معلم

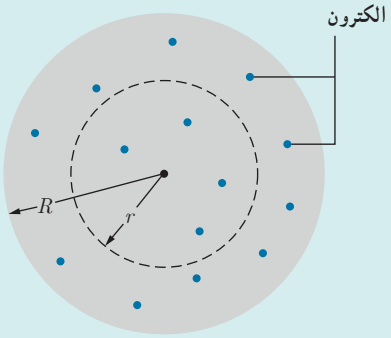
نگاهی دقیق‌تر به مدل تامسون

مطابق مدل تامسون، اتم حاوی تعداد Z الکترون است که در کره‌ای همگن با بار مثبت توزیع شده‌اند (شکل زیر). کل بار مثبت این کره Ze، جرم آن اساساً همان جرم اتم است (الکترون‌ها سهم چندانی در جرم کل اتم نداشتند) و شعاع این کره R، برابر شعاع اتم است. نیروی وارد بر یک الکترون در فاصلهٔ r از مرکز یک کره توزیع بار یکنواخت و شعاع R را می‌توان با بهره‌گیری از قانون گاؤس محاسبه کرد :

$$F = \frac{Ze^{۲}}{۴\pi\varepsilon_{۰}R^{۳}}.r = kr$$

این نیروی بازگردانندهٔ خطی باعث می‌شود که الکترون‌ها حول وضع تبادلشان نوسان کنند، درست مانند جرم متصل به فنری که نیروی بازگردانندهٔ $F = kx$ بر آن وارد می‌شود. بنابراین انتظار داریم که در اتم تامسون الکترون‌ها حول وضع تعادلشان با بسامد $f = \frac{۱}{۲\pi}\sqrt{k/m}$ نوسان کنند، که k ثابتی است که در معادلهٔ بالا تعریف شده است. چون بار الکتریکی نوسان‌کننده امواج الکترومغناطیسی تابش می‌کند که بسامد آن با بسامد این نوسان یکسان است، براساس مدل تامسون انتظار داریم که تابش گسیل شده از اتم‌ها دارای این بسامد مشخصه باشد چیزی که با تجربه سازگار نیست.

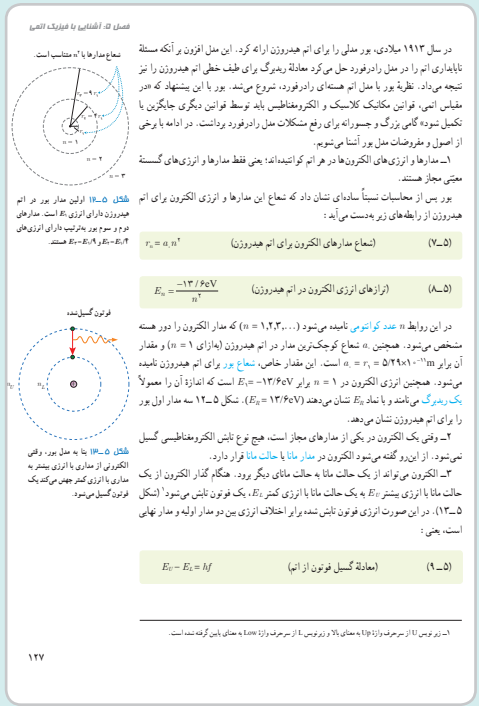
یکی دیگر از جدی‌ترین نارسایی‌های مدل تامسون در پراکندگی ذرات باردار از اتم‌ها نمایان می‌شود که بعدها منشأ مدل اتمی رادرفورد شد.



ادامهٔ راهنمای تدریس

پس از مدل تامسون و اشاره به ناکامی‌های آن (که به برخی از آنها در زندگی تامسون اشاره شده است)، به بررسی مدل رادفورد بپردازید. هرچند رادرفورد از سال‌های پایانی قرن نوزدهم، فعالیت‌های علمی خود را با تمرکز روی پرتوزایی طبیعی عناصر پرتوزا شروع کرد و به نوعی فیزیک هسته‌ای را بنیان نهاد، ولی به تدریج با آزمایش‌هایی که روی پراکندگی ذرات آلفا توسط ایشان و گروهی که در دانشگاه منچستر با ایشان همکاری می‌کردند، درگیر بررسی ساختار اتم و ارائه مدلی برای آن شد. آزمایش پراکندگی ذرات آلفا روی ورقه‌ای نازک از طلا در شکل ۵ــ۱۰ بررسی شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود بیشتر ذره‌های آلفا بدون انحراف از ورقهٔ طلا می‌گذرند (خط ضخیم آبی رنگ).

در ادامه به موفقیت‌ها و ناکامی‌های مدل اتم هسته‌ای رادرفورد اشاره کنید. تقریباً دو سال بعد از ارائه مدل اتم ــ هسته‌ای رادرفورد، بور که در آزمایشگاه رادرفورد مشغول به‌کار بود، توانست با ارائه پیش‌فرض‌هایی (اصول موضوعه) مدل اتمی خود را برای هیدروژن اتمی و اتم‌های هیدروژن گونه ارائه دهد. این مدل موفقیت‌های فراوانی به همراه داشت و ضمن اینکه با معرفی مدارهای مانا، پایداری اتم را می‌توانست توضیح دهد جذب و گسیل تابش را نیز می‌توانست با تغییر موقعیت الکترون از یک مدار مانا به مدار مانای دیگر توضیح دهد؛ به طوری که با نتایج تجربی نیز سازگار باشد.

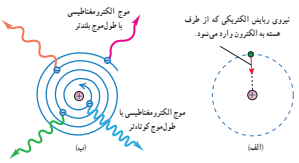


فیزیک ۳

ارنست رادرفورد (۱۹۳۷ــ۱۸۷۱ م.)
در نیوزلند متولد شد و بیشتر تحصیلات خود را در همان‌جا به انجام رساند. در ۲۴ سالگی به کمبریج رفت و کار خود را در آزمایشگاه کاوندیش زیر نظر تامسون آغاز کرد. سپس به دانشگاهی در کانادا رفت و پس از بازگشت وارد دانشگاه منچستر شد. رادرفورد در آزمایش‌هایی که به کمک برتوهای آلفا انجام داد ضمن کشف هسته در مرکز اتم، آزمایش گایگر ـ مارسدن را در اتم مشخص کرد ولی نتوانست چرخش حرکت آنها را تبیین کند. رادرفورد همچنین با تبدیل عناصر بر اثر واپاشی پرتوزا، فیزیک هسته‌ای را بنیانگذاری و اولین واکنش هسته‌ای مصنوعی را ایجاد کرد. وی در سال ۱۹۰۸ موفق به دریافت جایزهٔ نوبل شیمی شد. رادرفورد در سال ۱۹۱۱ در آزمایش‌هایی که در آنها نیتروژن با ذرات آلفا بمباران می‌شد با ذرات باردار مثبتی روبه‌رو شد و آن را به‌عنوان هسته هیدروژن شناسایی کرد. تا سال ۱۹۲۰، او به این نتیجه رسیده بود که این ذره، باید ذره‌ای بنیادی باشد و با توجه به این که واژهٔ proton در زبان یونانی به معنای نخستین است، آن را پروتون نامید. با موفقیت اولیهٔ درطرد اهمیت آن را در بیان هسته‌های اتمی عناصر نشان دهد.

بنا بر مدل رادرفورد، اتم دارای یک هستهٔ بسیار چگال و کوچک ($\sim 10^{-15}$m=شعاع) و با بار مثبت است که با تعدادی الکترون در فاصله‌هایی به‌نسبت دور احاطه شده است. در حالت طبیعی، اتم از نظر الکتریکی خنثاست؛ زیرا بار مثبت هسته، درست مساوی مجموع بار منفی الکترون‌هایی است که هسته را دربرگرفته‌اند. مدل اتمی رادرفورد که آن را مدل اتم هسته‌ای یا مدل هسته‌ای اتم می‌نامند، در مواردی با موفقیت همراه بود، ولی با چالش‌های تازه‌ای نیز مواجه شد. این چالش‌ها برای خود رادرفورد نیز مطرح شده بود، ولی به‌طور صریح می‌گفت که: «نباید از مدلی که بر اساس بعضی نتایج تجربی ساخته شده است انتظار داشته باشیم که به تمامی چالش‌ها پاسخ دهد.»

اگر الکترون‌ها را نسبت به هسته ساکن فرض کنیم، مطابق شکل ۵ــ۱۱ الف، باید تحت تأثیر نیروی ربایشی الکتریکی بین هسته و الکترون، روی هسته سقوط کنند و در نتیجه اتم باید ناپایدار باشد؛ چیزی که با واقعیت جور درنمی‌آید. همچنین اگر الکترون‌ها، مانند سیاره‌های منظومهٔ خورشیدی که دور خورشید می‌چرخند، به دور هسته در گردش باشند، باز هم این حرکت پایدار نمی‌ماند. زیرا حرکت مداری الکترون به دور هسته، شتابدار است. بنا بر فیزیک کلاسیک، این حرکت شتابدار الکترون سبب تابش امواج الکترومغناطیسی می‌شود که بسامد آن، با بسامد حرکت مداری الکترون برابر است. با تابش موج الکترومغناطیسی توسط الکترون، از انرژی آن کاسته می‌شود. این کاهش انرژی باعث می‌شود که شعاع مدار الکترون به دور هسته به‌تدریج کوچک‌تر و بسامد حرکت آن به‌تدریج بیشتر شود. این افزایش تدریجی بسامد حرکت مداری الکترون‌ها، سبب می‌شود تا بسامد موج الکترومغناطیسی گسیل شده نیز به‌تدریج زیاد شود. به این ترتیب باید طیف امواج الکترومغناطیسی گسیل‌شده از اتم، پیوسته باشد و الکترون پس از گسیل بی‌دریی امواج الکترومغناطیسی روی هسته فرو افتد (شکل ۵ــ۱۱ ب). این نتیجه افزون بر اینکه با واقعیت ناسازگار است با طیف خطی گسیل‌شده توسط اتم‌ها نیز جور درنمی‌آید.



شکل ۵ــ۱۱ ناتوانی مدل اتم هسته‌ای رادرفورد در تبیین پایداری اتم. الف) اگر الکترون نسبت به هسته ساکن فرض شود بر اثر نیروی ربایش الکتریکی، روی هسته سقوط می‌کند. ب) اگر الکترون دور هسته بچرخد، طبق بیوسته گسیل می‌کند و سرانجام روی هسته فرو می‌افتد.

در سال ۱۹۱۳ میلادی، بور مدلی را برای اتم هیدروژن ارائه کرد. این مدل افزون بر آنکه مسئلهٔ ناپایداری اتم را در مدل رادرفورد حل می‌کرد معادلهٔ ریدبرگ برای طیف خطی اتم هیدروژن را نیز نتیجه می‌داد. نظریهٔ بور با مدل اتم هسته‌ای رادرفورد، شروع می‌شد. بور با این پیشنهاد که «در مقیاس اتمی، قوانین مکانیک کلاسیک و الکترومغناطیس باید توسط قوانین دیگری جایگزین یا تکمیل شود» گامی بزرگ و جسورانه برای رفع مشکلات مدل رادرفورد برداشت. در ادامه با برخی از اصول و مفروضات مدل بور آشنا می‌شویم.

۱ــ مدارها و انرژی‌های الکترون‌ها در هر اتم کوانیده‌اند؛ یعنی فقط مدارها و انرژی‌های گسستهٔ معینی مجاز هستند.

بور پس از محاسبات نسبتاً ساده‌ای نشان داد که شعاع این مدارها و انرژی الکترون برای اتم هیدروژن از رابطه‌های زیر به‌دست می‌آید:

$$r_n = a_0 n^2 \qquad \text{(شعاع مدارهای الکترون برای اتم هیدروژن)} \qquad (۵ــ۷)$$

$$E_n = \frac{-۱۳/۶\text{eV}}{n^2} \qquad \text{(ترازهای انرژی الکترون در اتم هیدروژن)} \qquad (۵ــ۸)$$

در این روابط n عدد کوانتومی نامیده می‌شود ($n = ۱,۲,۳,\ldots$) که مدار الکترون را دور هسته مشخص می‌شود. همچنین a_0 شعاع کوچک‌ترین مدار در اتم هیدروژن (به‌ازای $n = ۱$) و مقدار آن برابر $a_0 = r_1 = ۵/۲۹\times۱۰^{-۱۱}\text{m}$ است. این مقدار خاص، شعاع بور برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود. همچنین انرژی الکترون در $n = ۱$ برابر $E_1 = -۱۳/۶\text{eV}$ است که اندازهٔ آن را معمولاً یک ریدبرگ می‌نامند و با نماد E_R نشان می‌دهند ($E_R = ۱۳/۶\text{eV}$). شکل ۵ــ۱۲ سه مدار اول بور را برای اتم هیدروژن نشان می‌دهد.

۲ــ وقتی یک الکترون در یکی از مدارهای مجاز است، هیچ نوع تابش الکترومغناطیسی گسیل نمی‌شود. از این‌رو گفته می‌شود الکترون در مدار مانا یا حالت مانا قرار دارد.

۳ــ الکترون می‌تواند از یک حالت مانا به حالت مانای دیگر برود. هنگام گذار الکترون از یک حالت مانا با انرژی بیشتر E_U به یک حالت مانا با انرژی کمتر E_L، یک فوتون تابش می‌شود[۱] (شکل ۵ــ۱۳). در این صورت انرژی فوتون تابش شده برابر اختلاف انرژی بین دو مدار اولیه و مدار نهایی است، یعنی:

$$E_U - E_L = hf \qquad \text{(معادلهٔ گسیل فوتون از اتم)} \qquad (۵ــ۹)$$

شکل ۵ــ۱۲ اولین مدار بور در اتم هیدروژن دارای انرژی E_1 است. مدارهای دوم و سوم بور به‌ترتیب دارای انرژی‌های $E_2 = E_1/۴$ و $E_3 = E_1/۹$ هستند.

شکل ۵ــ۱۳ تا به مدل بور، وقتی الکترونی از مداری با انرژی بیشتر به مداری با انرژی کمتر جهش می‌کند یک فوتون گسیل می‌شود.

۱ــ زیر نویس U از سرحرف واژهٔ Up به معنای بالا و زیر نویس L از سرحرف واژهٔ Low به معنای پایین گرفته شده است.

توجه

به نمادگذاری n_L و n_U برای مدارهای مانای پایین و بالا در شکل ۵ــ۱۳ توجه کنید. این نمادگذاری سبب می‌شود که معادلهٔ تشکیل فوتون از اتم (معادلهٔ ۵ــ۹) برای جذب فوتون از اتم که در پرسش ۵ــ۲ به آن اشاره شده است به همین صورت برقرار باشد.

فیزیک ۳

نمودار ترازهای انرژی الکترون برای اتم هیدروژن: مقید است که مقدارهای انرژی داده‌شده در معادلهٔ ۵ــ۸ را مانند شکل ۵ــ۱۴ روی نمودار تراز انرژی نمایش دهیم. در این نمودار، که برای اتم هیدروژن رسم شده است بالاترین تراز انرژی به $n = \infty$ در معادلهٔ ۵ــ۸ مربوط است و دارای انرژی ۰eV است. برعکس، پایین‌ترین تراز انرژی مربوط به $n = ۱$ است و دارای مقدار ۱۳/۶eV− است. پایین‌ترین تراز انرژی، حالت پایه نامیده می‌شود تا از ترازهای بالاتر که حالت‌های برانگیخته نامیده می‌شوند متمایز باشد. توجه کنید که با افزایش n چگونه انرژی‌های حالت‌های برانگیخته به هم نزدیک و نزدیک‌تر می‌شوند.

در اتم هیدروژن و در دمای اتاق، الکترون اغلب در حالت پایه قرار دارد. برای بالا بردن الکترون از حالت پایه ($n = ۱$) به بالاترین حالت برانگیختهٔ ممکن ($n = \infty$) مقدار ۱۳/۶eV انرژی باید صرف شود. صرف این مقدار انرژی، الکترون را از اتم خارج می‌کند و یون مثبت هیدروژن H^+ ایجاد می‌شود. این کمترین انرژی لازم برای خارج کردن الکترون از حالت پایه، انرژی یونش الکترون نامیده می‌شود. مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل بور برای انرژی یونش اتم هیدروژن، توافق بسیار خوبی با مقدار تجربی دارد.

شکل ۵ــ۱۴ نمودار ترازهای انرژی برای الکترون اتم هیدروژن

مثال ۵ــ۶

الکترونی در دومین حالت برانگیختهٔ اتم هیدروژن قرار دارد. الف) انرژی الکترون را در این حالت پیدا کنید. ب) وقتی الکترون از این حالت برانگیخته به حالت پایه جهش می‌کند نمودار تراز انرژی آن را رسم کنید. پ) طول موج فوتون گسیل‌شده را حساب کنید.

پاسخ: الف) در دومین حالت برانگیخته، عدد کوانتومی $n = ۳$ است. به این ترتیب از رابطهٔ ۵ــ۸ داریم:

$$E_۳ = \frac{-۱۳/۶\text{eV}}{۳^۲} = -۱/۵۱\text{eV}$$

ب) شکل مقابل نمودار ترازهای انرژی را برای الکترون اتم هیدروژن نشان می‌دهد که با گسیل فوتون، از دومین حالت برانگیخته به حالت پایه جهش کرده است.

دومین حالت برانگیخته — اولین حالت برانگیخته — حالت پایه — hf

پ) انرژی الکترون در حالت پایه $E_۱ = -۱۳/۶\text{eV}$ است. به این ترتیب انرژی فوتون گسیل‌شده برابر $E_۳ - E_۱$ است. از رابطهٔ ۵ــ۹ داریم:

$$E_۳ - E_۱ = hf = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{E_۳ - E_۱} = \frac{۱۲۴۰\text{eV.nm}}{-۱/۵\text{eV} - (-۱۳/۶\text{eV})} = ۱۰۲\text{nm}$$

تمرین ۵ــ۴

شکل مقابل تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می‌دهد.

الف) کمترین طول‌موج فوتونی را پیدا کنید که با گذار بین این ترازها به‌دست می‌آید.

ب) اگر الکترون از تراز انرژی ۱/۵۱eV− به تراز پایه جهش کند طول‌موج فوتون گسیلی را پیدا کنید.

پ) کدام گذار بین دو تراز می‌تواند به گسیل فوتونی با طول‌موج ۶۶۰nm منجر شود؟ توجه کنید که این طول‌موج‌ها در گستره مرئی است.

۰eV
−۱/۵۱eV
−۳/۴۰eV
−۱۳/۶eV

۱۲۸

تمرین ۵ــ۴

حل مورد انتظار

الف) کوتاه‌ترین طول موج متناظر با شرایطی است که الکترون از حالت پایه ($n = ۱$) به حالتی که الکترون در آستانهٔ خروج از اتم است ($n = \infty$) گذار کند. به این ترتیب:

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{E_\infty - E_۱} = \frac{۱۲۴۰\text{eV.nm}}{۰-(-۱۳/۶\text{eV})} \approx ۹۱\text{nm}$$

ب) انرژی تراز پایه متناظر با ۱۳/۶eV− است. بنابراین:

$$\lambda = \frac{۱۲۴۰\ \text{eV.nm}}{(-۱/۵۱\ \text{eV}) - (۱۳/۶\ \text{eV})} = ۱۰۲\text{nm}$$

پ) اختلاف انرژی بین دو تراز که متناظر با این طول باشد برابر است:

$$E - E' = \frac{hc}{\lambda} = \frac{۱۲۴۰\ \text{eV.nm}}{۶۶۰\ \text{nm}} \simeq ۱/۸۸\text{eV}$$

اگر الکترون از تراز $E = -۱/۵۱\text{eV}$ (دومین حالت برانگیخته) به تراز $E' = -۳/۴۰\text{eV}$ (اولین حالت برانگیخته) برود در این صورت داریم:

$$E - E' = -۱/۵۱\text{eV} - (-۳/۴۰\text{eV}) = ۱/۸۹\text{eV}$$

بنابراین الکترون از دومین حالت برانگیخته به اولین حالت برانگیخته گذاری کند. طول موج فوتون گسیل شده تقریباً متناظر با ۶۶۰nm است.

ادامهٔ راهنمای تدریس

در ادامه به استخراج معادلهٔ ریدبرگ برای اتم هیدروژن پرداخته می‌شود که یکی دیگر از موفقیت‌های مدل بور محسوب می‌شود. لازم است توجه دانش‌آموزان را به این نکته مهم جلب کنید که معادلهٔ ریدبرگ صرفاً مبتنی بر نتایج اندازه‌گیری طول موج‌های گسیل شده از گاز هیدروژن اتمی در ناحیهٔ مرئی طیف به دست آمده است که پیش از ریدبرگ توسط بالمر به‌دست آمده بود. در حالی‌که مدل بود، براساس پیش‌فرض‌هایی (اصول موضوعه) به‌دست آمده است که مبنای نظری داشتند. به همین دلیل توافق بین نتایج تجربی و مدل‌سازی بور برای اتم هیدروژن یکی از موفقیت‌های بزرگ آن به حساب می‌آید.

استخراج معادلهٔ ریدبرگ برای اتم هیدروژن از مدل بور : همان‌طور که در ابتدای این بخش نیز اشاره کردیم یکی از موفقیت‌های مدل بور نتیجه‌گیری معادلهٔ ریدبرگ برای طیف خطی گاز هیدروژن اتمی است. برای بررسی بیشتر این موضوع فرض کنید الکترون اتم هیدروژن در یکی از حالت‌های برانگیخته باشد و بخواهد به حالتی با انرژی کمتر جهش کند. به عبارت دیگر الکترون از مدار مانای n_U به مدار مانای n_L می‌رود و فوتونی را گسیل می‌کند. با توجه به روابط ۵ــ۸ و ۵ــ۹، بسامد فوتون گسیل‌شده برابر است با :

$$f=\frac{1}{h}(E_U-E_L)=\frac{E_R}{h}(\frac{1}{n_L^2}-\frac{1}{n_U^2})$$

با استفاده از رابطهٔ $f=c/\lambda$ طول‌موج فوتون گسیل‌شده را پیدا می‌کنیم.

$$\frac{c}{\lambda}=\frac{E_R}{h}(\frac{1}{n_L^2}-\frac{1}{n_U^2})\Rightarrow\frac{1}{\lambda}=\frac{E_R}{hc}(\frac{1}{n_L^2}-\frac{1}{n_U^2})$$

از سوی دیگر داریم :

$$\frac{E_R}{hc}=\frac{۱۳/۶\text{eV}}{۱۲۴۰\text{eV.nm}}=۰/۰۱۰۹(\text{nm})^{-1}$$

که این مقدار، با تقریب بسیار خوبی همان ثابت ریدبرگ R است که پیش از این با آن آشنا شدیم. به این ترتیب داریم :

$$\frac{1}{\lambda}=R(\frac{1}{n_L^2}-\frac{1}{n_U^2})$$

این رابطه همان معادلهٔ ۵ــ۶ است که با اصلاح و بازنویسی معادلهٔ بالمر برای طیف گسیلی خطی هیدروژن توسط ریدبرگ به‌دست آمد. در نتیجه به کمک مدل بور می‌توانیم رابطهٔ تجربی ریدبرگ را به‌دست آوریم و طیف خطی هیدروژن اتمی را توجیه کنیم. وقتی الکترون برای مثال از مدار $n_U=۳$ به مدار $n_L=۲$ می‌رود، طول‌موج فوتون گسیل‌شده برابر است با :

$$\frac{1}{\lambda}=R(\frac{1}{n_L^2}-\frac{1}{n_U^2})=۰/۰۱۰۹(\text{nm})^{-1}(\frac{1}{۲^2}-\frac{1}{۳^2})\Rightarrow\lambda=۶۶\text{nm}$$

مقدار به‌دست آمده به نحو چشمگیری به طول‌موج خط قرمز در رشتهٔ بالمر که از تجربه حاصل شده، نزدیک است.

طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی و مدل بور : در سال ۱۸۱۴ میلادی فرانهوفر، با مشاهدهٔ دقیق طیف خورشید، خط‌های تاریک نازکی را در آن کشف کرد[1] (شکل ۵ــ۱۵). این تجربه نشان می‌داد در تابشی که از خورشید گسیل می‌شود و به زمین می‌رسد بعضی از طول‌موج‌ها وجود ندارند. امروزه می‌دانیم بسیاری از خط‌های تاریکی که فرانهوفر در طیف خورشید کشف کرد، ناشی از جذب طول‌موج‌های مربوط به این خط‌ها توسط گازهای جو خورشید است. خط‌های دیگر به سبب جذب نور در گازهای جو زمین پدید می‌آیند.

شکل ۵ــ۱۵ خط‌های تاریکی که در طیف خورشید دیده می‌شود، به افتخار کشف‌کنندهٔ آن، خط‌های فرانهوفر نامیده می‌شوند.

۱ــ از ویلیام ولاستون به‌عنوان نخستین کاشف این خط‌های تاریک نام می‌برند، ولی جوزف فرانهوفر بود که این خط‌ها را به تفصیل مورد مطالعه قرار داد.

جوزف فرانهوفر (۱۸۲۶ــ۱۷۸۷ م.) در فیزیک‌دان و سازندهٔ ابزارهای نوری، در آلمان به دنیا آمد. وی به‌خاطر کیفیت ابزارهای نوری‌ای که می‌ساخت و همچنین نظریه‌هایش دربارهٔ پراش معروف بود. فرانهوفر پس از آنکه در ۱۱سالگی پدر شد در یک کارگاه عینک‌سازی مشغول به کار شد. در سال ۱۸۰۶ میلادی سقف کارگاهی که در آن کار می‌کرد فرو ریخت و با خود آقای بسیار، جان سالم بدر برد. فرانهوفر دستگاه طیف نمایی را اختراع کرد و نوری‌های پراش را توسعه داد. او به کمک دستگاه طیف‌نمایی که اختراع کرده بود نخستین بار خط‌های تیره‌ای را در طیف خورشید مشاهده کرد که امروزه به نام خودش به خط‌های فرانهوفر مشهورند.

نیلز بور (۱۹۶۲ــ۱۸۸۵ م.) در کپنهاگ دانمارک به دنیا آمد و در همان‌جا به تحصیلات خود ادامه داد. بور در سال ۱۹۱۱ دکترای فیزیک خود را از دانشگاه کپنهاگ دریافت کرد. وی در سال ۱۹۱۲ ملاقاتی پس از مدتی کار با ناسون، از کشریج به منچستر رفت و در آزمایشگاه رادرفورد که مرکزی پژوهشی دربارهٔ مواد پرتوزا و ساختار اتم بود مشغول به کار شد. در آنجا بود که مدل اتمی خود را در خصوص اتم هیدروژن تدوین و ارائه کرد. پس از آن در توسعهٔ نظریه مکانیک کوانتومی نقش عمده‌ای داشت. وی در سال ۱۹۲۲ جایزهٔ نوبل فیزیک را برای درک ساختار اتمی و نظریهٔ کوانتومی دریافت کرد. مؤسسهٔ فیزیک نظری که وی در سال ۱۹۲۱ میلادی در کپنهاگ بنیان نهاد، تریدیک به یک سده است که دانشمندان را از سراسر جهان به سوی خود جذب می‌کند.

شکل ۵ــ۱۶ اسباب آزمایشی را به‌صورت طرح‌وار نشان می‌دهد که در آن باریکهٔ نور سفید قبل از عبور از منشور، از گاز کم‌فشار هیدروژن می‌گذرد. با انجام این آزمایش بی می‌بریم یک طیف پیوسته (مشابه طیف رنگین‌کمان) با خط‌هایی تاریک درون آن مشاهده می‌شود که در آن بعضی از طول‌موج‌ها از نور سفید جذب شده‌اند.

شکل ۵ــ۱۶ روشی برای مشاهدهٔ طیف‌های جذبی. یک جسمهٔ نور سفید که گستره‌ای پیوسته از طول‌موج‌ها را تولید می‌کند، از طرفی حاوی گاز کم‌فشار هیدروژن اتمی می‌گذرد و توسط منشور پاشیده می‌شود و طیف آن روی پرده تشکیل می‌شود. خط‌های تاریک روی طیف، به طول‌موج‌هایی از نور سفید مربوط است که توسط اتم‌های گاز جذب شده‌اند.

دراواسط قرن نوزدهم، آزمایش‌هایی مشابه آنچه بیان کردیم برای گازهای عناصر مختلف انجام شد. این آزمایش‌ها نشان می‌داد که اگر نور سفید از داخل گاز عنصری عبور کند و سپس طیف آن تشکیل شود، در طیف آن، خط‌های تاریکی ظاهر می‌شود. این خط‌ها (طول‌موج‌ها) توسط اتم‌های گاز عنصر جذب شده‌اند. شکل ۵ــ۱۷، طیف گسیلی و طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را در کنار یکدیگر نشان می‌دهد. مطالعه و مقایسهٔ این دو طیف و همچنین طیف‌های گسیلی و جذبی عنصرهای مختلف نشان می‌دهد که :

- هم در طیف گسیلی و هم در طیف جذبی اتم‌های گاز هر عنصر، طول‌موج‌های معینی وجود دارد که از مشخصه‌های آن عنصر است. یعنی طیف گسیلی و طیف جذبی هیچ دو گازی همانند یکدیگر نیست.
- اتم‌های هر گاز دقیقاً همان طول‌موج‌هایی را از نور سفید جذب می‌کنند که اگر دمای آنها به اندازهٔ کافی بالا رود و یا به هر صورت دیگر برانگیخته شوند، آنها را تابش می‌کنند.

شکل ۵ــ۱۷ طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی. الف) خط‌های روشن در طیف گسیلی معرف طول‌موج‌های گسیل‌شده و ب) خط‌های تاریک در زمینهٔ طیف معرف طول‌موج‌های جذب‌شده توسط اتم‌های گاز هستند.

از آنجا که دانش‌آموزان تا اینجا با طیف گسیلی از گازهای اتمی و مدل بور آشنا شده‌اند، در این قسمت درک بهتری از طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی و توافق خوبی که بین طیف گسیلی و جذبی آن وجود دارد (شکل ۵ــ۱۷)، پیدا می‌کنند.

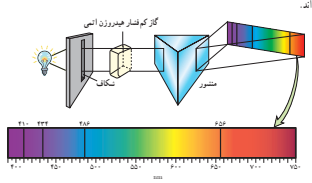
فیزیک ۳

عم

جزف فرانهوفر (۱۸۲۶ـ۱۷۸۷ م.)

فیزیک‌دان و سازندهٔ ابزارهای نوری در آلمان به دنیا آمد. وی به‌خاطر کیفیت ابزارهای نوری‌ای که می‌ساخت و همچنین نظریه‌هایی دربارهٔ پراش معروف بود. فرانهوفر پس از آنکه در ۱۱سالگی یتیم شد در یک کارگاه عینک‌سازی مشغول به کار شد. در سال ۱۸۰۱ میلادی سقف کارگاهی که در آن کار می‌کرد فرو ریخت و با خودش اقبالی بسیار، جان سالم بدر برد. فرانهوفر دستگاه طیف نمایی را اختراع کرد و نوری‌های پراش را توسعه داد. او به کمک دستگاه طیف‌نمایی که اختراع کرده بود نخستین بار خط‌های تیره‌ای را در طیف خورشید مشاهده کرد که امروزه به نام خودش به خط‌های فرانهوفر مشهورند.

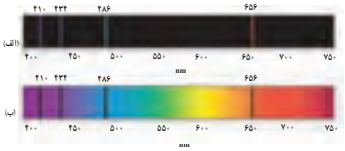
شکل ۵ــ۱۶ اسباب آزمایشی را به‌صورت طرح‌وار نشان می‌دهد که در آن باریکهٔ نور سفید قبل از عبور از منشور، از گاز کم‌فشار هیدروژن می‌گذرد. با انجام این آزمایش بی می‌بریم یک طیف پیوسته (مشابه طیف رنگین‌کمان) با خط‌هایی تاریک درون آن مشاهده می‌شود که در آن بعضی از طول‌موج‌ها از نور سفید جذب شده‌اند.



شکل ۵ــ۱۷ روشنی برای مشاهدهٔ طیف‌های جذبی یک جسمهٔ نور سفید که گستره‌ای پیوسته از طول‌موج‌ها را تولید می‌کند، از طرفی حاوی گاز کم‌فشار هیدروژن اتمی می‌گذرد و توسط منشور پاشیده می‌شود و طیف آن روی پرده تشکیل می‌شود. خط‌های تاریک روی طیف، به طول‌موج‌هایی از نور سفید مربوط است که توسط اتم‌های گاز جذب شده‌اند.

دراواسط قرن نوزدهم، آزمایش‌هایی مشابه آنچه بیان کردیم برای گازهای عناصر مختلف انجام شد. این آزمایش‌ها نشان می‌داد که اگر نور سفید از داخل گاز عنصری عبور کند و سپس طیف آن تشکیل شود، در طیف آن، خط‌های تاریکی ظاهر می‌شود. این خط‌ها (طول‌موج‌ها) توسط اتم‌های گاز عنصر جذب شده‌اند. شکل ۵ــ۱۷، طیف گسیلی و طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را در کنار یکدیگر نشان می‌دهد. مطالعه و مقایسهٔ این دو طیف و همچنین طیف‌های گسیلی و جذبی عنصرهای مختلف نشان می‌دهد که :

- هم در طیف گسیلی و هم در طیف جذبی اتم‌های گاز هر عنصر، طول‌موج‌های معینی وجود دارد که از مشخصه‌های آن عنصر است. یعنی طیف گسیلی و طیف جذبی هیچ دو گازی همانند یکدیگر نیست.
- اتم‌های هر گاز دقیقاً همان طول‌موج‌هایی را از نور سفید جذب می‌کنند که اگر دمای آنها به اندازهٔ کافی بالا رود و یا به هر صورت دیگر برانگیخته شوند، آنها را تابش می‌کنند.



شکل ۵ــ۱۷ طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی. الف) خط‌های روشن در طیف گسیلی معرف طول‌موج‌های گسیل‌شده و با خط‌های تاریک در زمینهٔ طیف، معرف طول‌موج‌های جذب‌شده، توسط اتم‌های گاز هستند.

اینکه چرا هر عنصر تنها طول‌موج‌های خاصی را که مشخصهٔ آن عنصر است جذب یا گسیل می‌کند چالشی بود که برای چندین دهه فیزیک‌دانان را به خود مشغول کرده بود و تا پیش از ارائهٔ مدل بور، نظریهٔ قابل قبولی برای توضیح آن وجود نداشت. اکنون براساس مدل بور می‌دانیم که خط‌های گوناگون در طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی وقتی به‌وجود می‌آیند که الکترون‌های اتم‌های هیدروژن، که به هر دلیلی برانگیخته شده‌اند، از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین‌تر جهش کنند و فوتون‌هایی را گسیل کنند (شکل ۵ــ۱۸ الف). همچنین الکترون‌ها می‌توانند در جهت عکس گذار کنند، یعنی در فرایندی که جذب فوتون خوانده می‌شود از ترازهای انرژی پایین‌تر به ترازهای انرژی بالاتر بروند (شکل ۵ــ۱۸ ب). در این حالت، اتم، فوتونی را که دقیقاً انرژی لازم برای گذار را دارد جذب می‌کند. به این ترتیب اگر فوتون‌هایی با گسترهٔ پیوسته‌ای از طول‌موج‌ها مطابق آزمایش شکل ۵ــ۱۶ از گاز بگذرند و سپس طیف آنها تشکیل شود، یک دسته خط‌های جذبی تاریک در طیف پیوسته مشاهده خواهند شد. خط‌های تاریک، طول‌موج‌هایی را مشخص می‌کنند که با فرایند جذب فوتون برداشته شده‌اند.

پرسش ۵ــ۲

آیا معادلهٔ ۵ــ۹ برای فرایند جذب فوتون نیز برقرار است؟

موفقیت‌ها و نارسایی‌های مدل بور : مدل بور تصویری از چگونگی حرکت الکترون‌ها به دور هسته ارائه می‌کند. این مدل در تبیین پایداری اتم، طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی و محاسبهٔ انرژی یونش اتم هیدروژن با موفقیت همراه است. افزون بر این، مدل بور را برای اتم‌های هیدروژن‌گونه نیز می‌توان به کار برد. اتم هیدروژن‌گونه به اتم‌هایی گفته می‌شود که تنها یک الکترون دارند. برای مثال، اتم لیتیم که در حالت خنثی سه الکترون دارد اگر دو الکترون خود را از دست داده باشد، یک اتم هیدروژن‌گونه است. مدل بور می‌تواند انرژی یونش و همچنین طول‌موج‌های طیف خطی اتم‌های هیدروژن‌گونه مانند لیتیم دو بار یونیده (Li^{++}) را پیش‌بینی کند که با تجربه سازگاری خوبی دارد.

مدل بور به‌رغم موفقیت‌هایی که اشاره شد، نارسایی‌هایی نیز دارد که تنها به دو مورد از آنها اشاره می‌کنیم. این مدل برای وقتی که بیش از یک الکترون به دور هسته می‌گردد به کار نمی‌رود، زیرا در مدل بور، نیروی الکتریکی که یک الکترون بر الکترون دیگر وارد می‌کند به حساب نیامده است. همچنین این مدل نمی‌تواند متفاوت بودن شدت خط‌های طیف گسیلی را توضیح دهد. برای مثال مدل بور نمی‌تواند توضیح دهد که چرا شدت خط قرمز با شدت خط آبی در طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی با یکدیگر متفاوت است.

شکل ۵ــ۱۸ الف) فرایند گسیل فوتون و ب) فرایند جذب فوتون توسط اتم

علی جوان (۱۹۱۷ـ۱۹۶۱ م.) از پدر و مادری تبریزی، در تهران به دنیا آمد. از دبیرستان البرز دیپلم گرفت و پس از آن به مدت یک سال در دانشکدهٔ علوم دانشگاه تهران به تحصیل پرداخت. در سال ۱۹۴۸ میلادی به نیویورک رفت و چندین دورهٔ درسی را در دانشگاه کلمبیا گذراند. علی جوان بدون داشتن مدرک لیسانس با نوق لیسانس، موفق شد در سال ۱۹۵۴ دکترای خود را زیر نظر چارلز تاونز، فیزیک‌دان و مخترع بزرگ آمریکایی و برندهٔ جایزهٔ نوبل فیزیک ۱۹۶۴، دریافت کند. در سال ۱۹۵۵ دورهٔ پسادکترا را در آزمایشگاه بلتن[۲] و با تحقیق روی ساخت لیزر شروع کرد. در سال ۱۹۵۸ به آزمایشگاه‌های بلتن پیوست و مدتی بعد در همان‌ها ایدهٔ اولیهٔ لیزرهای گازی را ارائه کرد. وی پس از یک سال تلاش و با همکاری دو فیزیک‌دان دیگر به نام‌های ویلیام بنت و دونالد هریوت، موفق به ساخت اولین نمونهٔ لیزر گازی هلیم نئون در سال ۱۹۶۰ شد.

۱ــ Radiation Laboratory
۲ــ Bell Telephone Laboratories

پرسش ۵ــ۲

پاسخ مورد انتظار : همان‌طور که پیش از این اشاره شد، نمادگذاری n_L و n_U برای مدارهای پایین و بالا منجر به نتایج یکسانی برای معادلهٔ گسیل و ضرب فوتون می‌شود. با توجه به شکل ۵ــ۱۸ ب که فرایند جذب را نشان می‌دهد می‌توان نوشت :

$$E_L + hf = E_U \implies E_U - E_L = hf$$

که همان معادلهٔ ۵ــ۹ برای فرایند گسیل است.

راهنمای تدریس

۵ــ۴ لیزر

ابتدا نگاهی داشته باشید به تاریخچهٔ لیزر، کاربردها و زندگی‌نامهٔ دانشمندانی که در ساخت نخستین لیزرها تأثیر داشتند. افزون بر کاربردهای که در کتاب درسی اشاره شده است می‌توانید از دانش‌آموزان علاقه‌مند بخواهید تا در خصوص کاربردهای دیگر لیزر با جزئیات بیشتری تحقیق کنند و نتیجه را در جلسه‌های بعدی به کلاس ارائه دهند.

در ادامه دانش‌آموزان را با ویژگی‌های گسیل القایی آشنا کنید در شکل ۵ــ۲۰ گسیل القایی با گسیل خود به خود فوتون‌ها مقایسه شده است. در کتاب‌های تخصصی به فوتون‌های هم‌بسامد، هم جهت و هم‌فاز، فوتون‌های همدوس نیز گفته می‌شود. در واقع واژهٔ همدوسی، دربرگیرندهٔ هر سه ویژگی یاد شده است.

مفهوم وارونی جمعیت و ترازهای شبه‌پایدار که شرط لازم ایجاد وارونی جمعیت است در ادامه مورد توجه قرار گرفته است. توجه دانش‌آموزان را به اهمیت وجود ترازهای شبه‌پایدار برای ایجاد وارونی جمعیت جلب کنید. به این منظور به تفاوت زمانی باقی‌ماندن الکترون‌ها در ترازهای شبه‌پایدار (10^{-3}s) نسبت به باقی ماندن الکترون‌ها در ترازهای برانگیختهٔ معمولی (10^{-8}s) اشاره کنید. این تفاوت زمانی قابل توجه، سبب ایجاد وارونی جمعیت می‌شود که در فرایندتشکیل باریکهٔ لیزر اهمیت کلیدی دارد.

فیزیک ۳

۵ــ۴ لیزر

لیزر یکی از مفیدترین اختراع‌های قرن بیستم است که کاربرد زیادی در زندگی، فناوری و صنعت دارد. لیزر امروزه در جایگاه‌ها، در نگاشتن اطلاعات روی CD و DVDها و خواندن آنها، شبکه‌های کابل نوری، اندازه‌گیری دقیق طول، دستگاه‌های جونکاری و برش فلزات، پژوهش‌های علمی، سرگرمی و ... به‌کار می‌رود. همچنین در حرفهٔ پزشکی برای جراحی، برداشتن لکه‌های پوستی، اصلاح دید چشم و دندانپزشکی و ... از لیزر استفاده می‌شود (شکل ۵ــ۱۹).

شکل ۵ــ۱۹ برخی از کاربردهای لیزر : الف) در پزشکی، ب) در جونکاری، پ) در آزمایش‌های فیزیک و پژوهش‌های علمی، ت) در چشم پزشکی، ث) در نجوم، ج) در دندانپزشکی

نخستین لیزر، موسوم به لیزر یاقوتی، را تئودور مایمن (۲۰۰۷ــ۱۹۲۷ م.) در سال ۱۹۶۰ میلادی ساخت. مدتی پس از آن و در همان سال، علی جوان و همکارانش موفق به ساخت نخستین لیزر گازی هلیم نئون شدند.

مطابق مدل اتمی بور وقتی یک الکترون از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین‌تر جهش می‌کند یک فوتون گسیل می‌شود. فرایند گسیل می‌تواند به‌صورت گسیل خودبه‌خود و یا گسیل القایی باشد. در گسیل خودبه‌خود (شکل ۵ــ۲۰ الف) فوتون در جهتی کاتوره‌ای گسیل می‌شود. در حالی که در گسیل القایی (شکل ۵ــ۲۰ ب) که برای نخستین بار در سال ۱۹۱۷ میلادی توسط اینشتین مطرح شد، یک فوتون ورودی، الکترون برانگیخته را تحریک (یا القا) می‌کند تا تراز انرژی خود را تغییر دهد و به تراز پایین‌تر برود. برای گسیل القایی، انرژی فوتون ورودی باید دقیقاً با اختلاف انرژی‌های دو تراز یعنی $E_U - E_L$ یکسان باشد.

گسیل القایی سه ویژگی عمده دارد. اول اینکه یک فوتون وارد و دو فوتون خارج می‌شود (شکل ۵ــ۲۰ ب). به این ترتیب این فرایند تعداد فوتون‌ها را افزایش می‌دهد و نور را تقویت می‌کند[۱]. دوم اینکه فوتون گسیل‌شده، در همان جهت فوتون ورودی حرکت می‌کند. سوم اینکه فوتون گسیل‌شده

شکل ۵ــ۲۰ الف) گسیل خودبه‌خود ب) گسیل القایی

۱ــ واژه laser برگرفته از سرواژه‌های عبارت (light amplification by the stimulated emission of radiation) به معنای تقویت نور توسط گسیل القایی تابش است.

۱۳۲

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی

با فوتون ورودی همگام یا دارای همان فاز است. به این ترتیب فوتون‌هایی که باریکهٔ لیزری را ایجاد می‌کنند هم‌بسامد، هم‌جهت و هم‌فاز هستند.

در گسیل القایی یک جمعهٔ انرژی خارجی مناسب باید وجود داشته باشد تا الکترون‌ها را به ترازهای انرژی بالاتر برانگیخته کند. این انرژی می‌تواند به روش‌های متعددی از جمله درخش‌های شدید نور معمولی و یا تخلیه‌های ولتاژ بالا فراهم شود. اگر انرژی کافی به اتم‌ها داده شود، الکترون‌های بیشتری به تراز انرژی بالاتر برانگیخته خواهند شد، شرطی که به وارونی جمعیت معروف است (شکل ۵ــ۲۱).

وارونی جمعیت الکترون‌ها در یک محیط لیزری، مربوط به وضعیتی است که تعداد الکترون‌ها در ترازهایی موسوم به ترازهای شبه‌پایدار[۱] نسبت به تراز پایین‌تر بسیار بیشتر باشند. در این ترازها، الکترون‌ها مدت زمان بسیار طولانی‌تری (10^{-3}s) نسبت به حالت برانگیختهٔ معمولی (10^{-8}s) باقی می‌مانند. این زمان طولانی‌تر، فرصت بیشتری برای افزایش وارونی جمعیت و در نتیجه تقویت نور لیزر فراهم می‌کند.

شکل ۵ــ۲۱ الف) به طور معمول و در دمای اتاق، بیشتر الکترون‌ها در تراز انرژی پایین‌تر قرار دارند. ب) در وضعیتی که وارونی جمعیت به وجود آید بیشتر الکترون‌ها در تراز بالاتری (در مقایسه با تراز پایین‌تر) قرار دارند.

لیزر گازی هلیم نئون (He ــ Ne)

شکل الف، یک لیزر هلیم نئون و شکل ب، طرحی ساده از سازوکار ایجاد باریکهٔ لیزر را درون این لیزرها نشان می‌دهد. گاز کم‌فشاری شامل ۱۵٪ هلیم و ۸۵٪ نئون درون لولهٔ شیشه‌ای قرار دارد. برای ایجاد وارونی جمعیت، از تخلیهٔ الکتریکی با ولتاژ بالا درون محلوط گازی استفاده می‌شود. وقتی یک اتم با گسیل خودبه‌خود، فوتونی موازی با محور لوله گسیل کند، فرایند ایجاد باریکهٔ لیزر شروع می‌شود. این فوتون با گسیل القایی باعث می‌شود تا اتم دیگری دو فوتون موازی با محور لوله گسیل کند. این دو فوتون با گسیل القایی، چهار فوتون ایجاد می‌کنند. از چهار فوتون، هشت فوتون حاصل می‌شود و به همین ترتیب نوعی بهمن فوتونی به‌وجود می‌آید. برای اینکه فوتون‌های بیشتر و بیشتری با گسیل القایی به‌وجود آیند دو انتهای لوله آینه‌هایی قرار می‌دهند تا فوتون‌ها را در داخل مخلوطی از گازهای هلیم و نئون به جلو و عقب بازتاب دهند. از آنجا که یکی از آینه‌ها بازتاب‌دهندهٔ کامل نیست بخشی از فوتون‌ها از لوله خارج می‌شوند و باریکهٔ لیزر را تشکیل می‌دهند. بازده لیزرهای هلیم نئون بسیار کم و در حدود ۰/۰۱ تا ۰/۱ درصد است، ولی به دلیل کیفیت خوب باریکهٔ لیزر ایجادشده، کاربرد زیادی در صنعت و فعالیت‌های علمی و آزمایشگاهی دارند.

(ب) شکلی طرح‌وار از ساختار لیزر گازی هلیم نئون

(الف) تصویری از لیزر گازی هلیم نئون

دانستنی‌ها برای دانستن

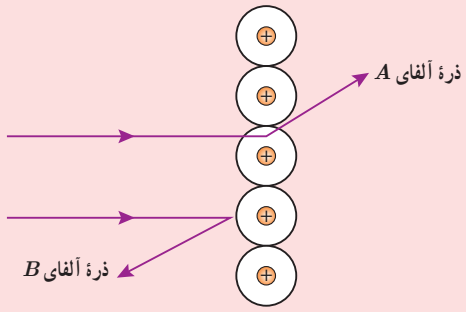
۱ــ Metastable

۱۳۳

پرسش‌ها و تمرین‌های پیشنهادی فصل ۵

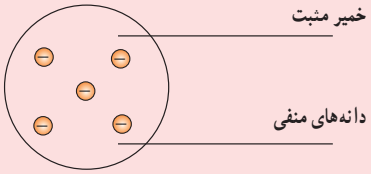
۱ الف) پدیدهٔ فتوالکتریک را تعریف کنید.
ب) شکلی برای نشان دادن این پدیده رسم کنید.
پ) توضیح دهید نظریهٔ فوتون چگونه به توجیه پدیدهٔ فوتوالکتریک کمک می‌کند.

۲ در نمودار شکل ۱ مسیر ذره آلفا در برخورد با ورقهٔ نازک فلزی نشان داده شده است. مسیر ذره‌ها به نیرویی بستگی دارد که در فلز بر آنها وارد می‌شود.



شکل ۱

الف) یک مدل اتمی را شرح دهید که مسیر ذره‌های آلفا در برخورد با صفحهٔ نازک فلزی را توضیح می‌دهد.
ب) تامسون معتقد بود که اتم از بارهای منفی مستقر در نوعی «خمیر» مثبت تشکیل می‌شود. این مدل را مدل کیک کشمشی می‌خواند. نمودار شکل ۲ مدلی از این نوع اتم را نشان می‌دهد.



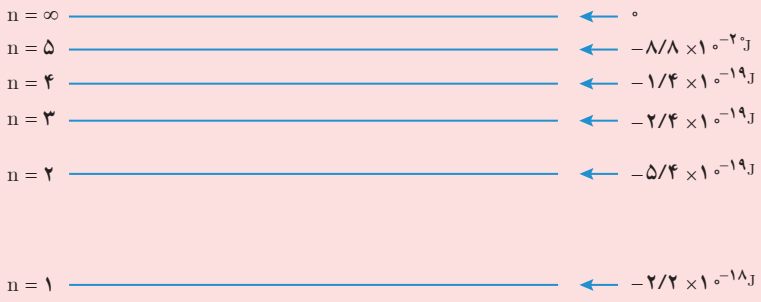
شکل ۲

a توضیح دهید چگونه مدل کیک کشمشی می‌تواند توضیح دهد چرا ذرهٔ آلفا A با زاویهٔ کوچک منحرف شده است.
b چرا این مدل نمی‌تواند انحراف شدید پرتو B را توضیح دهد؟

۳ باریکه‌ای از الکترون با اختلاف پتانسیل ۱۲kV شتاب می‌گیرد و به سوی هدفی در لولهٔ پرتو x شلیک می‌شود.
الف) انرژی جنبشی هر الکترون چند ژول است؟
ب) کمترین طول موج پرتو x گسیل شده از هدف چقدر است؟

۴ الف) شکل ظاهری طیف‌های زیر چگونه است؟
a طیف گسیلی خطی
b طیف جذبی خطی
c طیف پیوسته
ب) با شعلهٔ اجاق یا شمع مقداری نمک طعام را گرما می‌دهیم و طیف سدیم را با طیف‌نما می‌بینیم. دستگاه دوخط روشن زردرنگ به طول موج‌های ۵۸۹/۰nm و ۵۸۹/۶nm را در کنار هم نشان می‌دهد که مربوط به گذار الکترون از دو تراز انرژی مختلف نزدیک به هم به یک تراز انرژی پایین‌تر همسان هستند. اختلاف انرژی میان دو تراز بالایی چند ژول است؟

۵ با توجه به رابطهٔ $E_n = -۱۳/۶\text{eV}/n^۲$، ترازهای انرژی مربوط به طول موج‌های ۶۵۶nm و ۱۰۲۶nm در طیف هیدورژن را مشخص کنید.
الف) شکل زیر ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می‌دهد،



a معنای حالت پایه چیست؟

b چگونه تخلیهٔ الکتریکی در هیدروژن باعث ایجاد خط‌های مرئی در طیف می‌شود؟

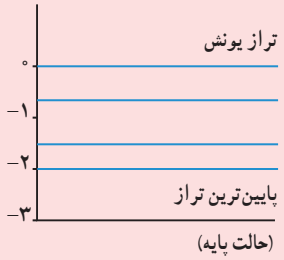
c نشان دهید که کمترین طول موج تابش الکترومغناطیسی گسیل شده از هیدروژن تقریباً ۹۰ nm است.

ب) پرتو الکترومغناطیسی به طول موج ۹۰ nm بر سطح یک ورقهٔ آلومینیومی می‌تابد و الکترونی با بیشینهٔ انرژی $۱/۵ \times ۱۰^{-۱۸}$ J از سطح ورقه گسیل می‌شود.

d نام پدیدهٔ گسیل الکترون از سطح فلز بر اثر تابش الکترومغناطیسی چیست؟

e تابع کار آلومینیوم را به‌دست آورید.

۷ با توجه به نمودار ترازهای انرژی یک اتم در شکل زیر معین کنید :



الف)به الکترونی که در حال سکون است باید با چه اختلاف پتانسیلی شتاب دهیم تا اتم یونیده شود؟

ب) کمترین طول موج گسیل‌شده از این الکترون چند nm است؟

پ) با توجه به نمودار ترازهای انرژی شکل بالا توضیح دهید چرا اتم‌ها در دماهای بالا، نوری با طول موج معین گسیل می‌کنند.

۸ الف) اندازهٔ تقریبی گسترهٔ طول موج بخش مرئی طیف موج‌های الکترومغناطیسی را به‌دست آورید.

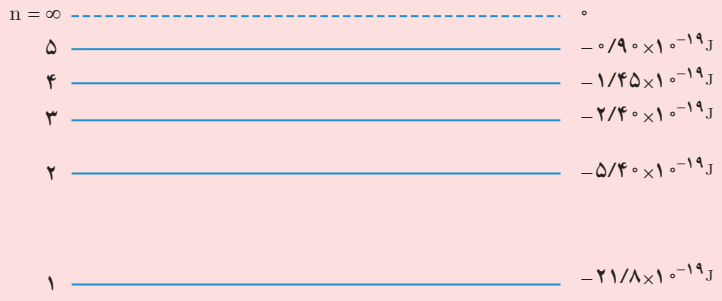
ب) لامپ بخار جیوه با فشار کم چه نوع طیفی گسیل می‌کند؟

پ) طیف نور خورشید را تشریح کنید.

ت) در نمودار ترازهای انرژی‌های اتم هیدروژن شکل زیر،

۱ هنگامی که الکترون از تراز $n = ۴$ به تراز $n = ۲$ می‌رود بسامد نور تابش شده چقدر است؟

۲ پیامدهای جذب یک فوتون انرژی به‌وسیلهٔ اتم نابرانگیخته را توضیح دهید.



۹ به مجموعه‌ای از اتم‌های هیدروژن در حالت پایه، نور فرابنفش به طول موج ۵۹/۵nm می‌تابانیم. انرژی جنبشی الکترون‌های گسیل شده را حساب کنید.

۱۰ بیشینهٔ تندی فوتوالکترون‌های گسیل‌شده از سطح فلزی با تابع کار ۳/۲eV را بر اثر تابش باریکهٔ نوری با طول موج ۳۱۰nm به‌دست آورید (جرم الکترون را $۹/۱۰\times۱۰^{-۳۱}$kg بگیرید).

راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۵

۵ــ۱ــ اثر فوتوالکتریک و فوتون

۱ الف) $\lambda=۵۸۹\text{nm}\ ,\ f\ ,\ E=?$

$$E=hf=\frac{hc}{\lambda}=\frac{۱۲۴۰\text{eV.nm}}{۵۸۹\ \text{nm}}=۲/۱۰\text{eV}$$

$$E=(۲/۱۰\text{eV})(\frac{۱/۶\times۱۰^{-۱۹}\ \text{J}}{۱\text{eV}})=۳/۳۶\times۱۰^{-۱۹}\ \text{J}$$

$$f=\frac{c}{\lambda}=\frac{۳\times۱۰^{۸}\ \text{m/s}}{۵۸۹\times۱۰^{-۹}\ \text{m}}=۵/۰۹\times۱۰^{۱۴}\text{Hz}$$

ب) انرژی گسیل شده توسط لامپ در هر دقیقه برابر است با :

$$E_t=Pt=(۵/۰\frac{\text{J}}{\text{s}})(۶۰\text{s})=۳۰۰\ \text{J}$$

تعداد فوتون گسیل شده در هر دقیقه برابر است با :

$$n=\frac{E_t}{E}=\frac{۳۰۰\ \text{J}}{۳/۳۶\times۱۰^{-۱۹}\ \text{J}}=۸/۹\times۱۰^{۲۰}$$

۲ الف) بازده $R_a=\frac{\text{توان خروجی}}{\text{توان ورودی}}=\frac{۵/۰\times۱۰^{-۳}\ \text{W}}{۵۰/۰\ \text{W}}=۱۰^{-۴}$

که برابر ۰/۰۱ درصد است.

ب) ابتدا انرژی هر فوتون خروجی را پیدا می‌کنیم.

$$E=\frac{hc}{\lambda}=\frac{۱۲۴۰\text{eV.nm}}{۶۳۳\ \text{nm}}=۱/۹۶\text{eV}$$

$$=(۱/۹۶\text{eV})(\frac{۱/۶\times۱۰^{-۱۹}\ \text{J}}{۱\text{eV}})=۳/۱۳\times۱۰^{-۱۹}\ \text{J}$$

انرژی کل فوتون‌های خروجی در هر ثانیه برابر است با :

$$E_t=Pt=(۵/۰\times۱۰^{-۳}\frac{\text{J}}{\text{s}})(۱\text{s})=۵\times۱۰^{-۳}\ \text{J}$$

تعداد فوتون‌های خروجی در هر ثانیه برابر است با :

$$n=\frac{E_t}{E}=\frac{۵\times۱۰^{-۳}\ \text{J}}{۳/۱۳\times۱۰^{-۱۹}\ \text{J}}=۱/۵۹\times۱۰^{۱۶}$$

۳ چشمهٔ نور را در مرکز کره‌ای به شعاع ۱km در نظر می‌گیریم.

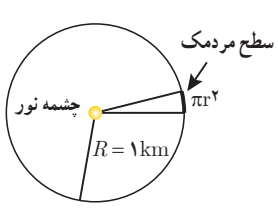
ابتدا تعداد فوتون‌هایی را که با طول موج ۵۵۰nm از لامپ در هر ثانیه گسیل می‌شود مشابه قسمت (ب) مسئله قبل به‌دست می‌آوریم.

انرژی کل فوتون‌های خروجی با طول موج ۵۵۰nm در هر ثانیه برابر است با :

$$E_t=\frac{۱}{۱۰۰}(۵/۰\frac{\text{J}}{\text{s}})(۱\text{s})=\frac{۵}{۱۰۰}\ \text{J}$$

انرژی هر فوتون با طول موج ۵۵۰nm برابر است با :

$$E=\frac{hc}{\lambda}=\frac{۱۲۴۰\text{eV.nm}}{۵۵۰\ \text{nm}}=۲/۲۵\text{eV}$$



پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۵

فیزیک ۳

۵ــ۱ اثر فوتوالکتریک و فوتون

۱. یک لامپ حاوی گاز کم‌فشار سدیم، فوتون‌هایی با طول‌موج ۵۸۹nm گسیل می‌کند.
الف) بسامد و انرژی فوتون‌های گسیلی را حساب کنید. انرژی را برحسب ژول و همچنین الکترون‌ولت بیان کنید.
ب) فرض کنید توان تابشی مفید لامپ ۵/۰W است. در هر دقیقه چند فوتون از این لامپ گسیل می‌شود؟

۲. توان باریکهٔ نور خروجی یک لیزر گازی هلیم نئون ۵/۰mW است. اگر توان ورودی این لیزر ۵۰/۰W باشد،
الف) بازده لیزر را حساب کنید.
ب) اگر طول‌موج باریکهٔ نور خروجی ۶۳۳nm باشد، شمار فوتون‌های را پیدا کنید که در هر ثانیه از این لیزر گسیل می‌شود.

۳. یک لامپ رشته‌ای با توان ۱۰۰W از فاصلهٔ یک کیلومتری دیده می‌شود. فرض کنید نور لامپ به‌طور یکنواخت در فضای اطراف آن منتشر می‌شود و بازدهٔ لامپ ۵ درصد است (یعنی ۵W تابش مرئی گسیل می‌کند) و فقط ۱ درصد این تابش دارای طول‌موجی در حدود ۵۵۰nm است. در هر ثانیه چه تعداد فوتون با این طول‌موج وارد مردمک‌های چشم ناظری می‌شود که در این فاصله قرار دارد؟ (قطر مردمک را ۲/۰mm در نظر بگیرید.)

۴. شدت تابشی خورشید در خارج جو زمین حدود ۱۳۶۰W/m² است؛ یعنی در هر ثانیه به سطحی برابر ۱m²، مقدار انرژی ۱۳۶۰J می‌رسد. وقتی این تابش به سطح زمین می‌رسد مقداری زیادی از شدت آن، به علت جذب در جو و ابرها از دست می‌رود. اگر شدت تابشی متوسط خورشید در سطح زمین به‌ازای هر متر مربع حدود ۳۰۰W/m² باشد، در هر ثانیه چند فوتون به هر متر مربع از سطح زمین می‌رسد؟ طول‌موج متوسط فوتون‌ها را ۵۷۰nm فرض کنید.

۵. الف) منظور از اثر فوتوالکتریک چیست؟
ب) توضیح دهید نظریهٔ کوانتومی تابش که توسط اینشتین مطرح شد و در آن نور به‌صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی در نظر گرفته شد چگونه به تبیین اثر فوتوالکتریک کمک کرد؟
پ) معادلهٔ مربوط به اثر فوتوالکتریک به‌صورت $K_{max}=hf-W_0$ بیان می‌شود. سه بخش این معادله را به طور جداگانه توضیح دهید.

۶. توضیح دهید برای یک فلز معین، تغییر هر یک از کمیت‌های زیر چه تأثیری در نتیجهٔ اثر فوتوالکتریک دارد.
الف) افزایش یا کاهش بسامد نور فرودی نسبت به بسامد آستانه
ب) افزایش شدت نور فرودی در بسامدهای کوچک‌تر از بسامد آستانه
پ) کاهش شدت نور فرودی در بسامدهای بزرگ‌تر از بسامد آستانه

۷. حداقل انرژی لازم برای جدا کردن یک الکترون از سطح فلز سدیم برابر ۲/۲۸eV است.
الف) طول‌موج آستانه برای گسیل فوتوالکترون از سطح فلز سدیم چقدر است و با مراجعه به شکل ۵ــ۶ معلوم کنید این طول‌موج مربوط به چه رنگی است؟
ب) آیا فوتون‌هایی با طول‌موج ۶۸۰nm قادر به جدا کردن الکترون از سطح این فلز هستند؟

۸. تابش فرابنفشی با طول‌موج ۲۰۰nm بر سطح تیغه‌ای از جنس نیکل با تابع کار ۴/۹۰eV تابیده می‌شود. بیشینهٔ تندی فوتوالکترون‌های جدا شده از سطح نیکل را حساب کنید.

۹. هر گاه بر سطح فلزی نوری با طول‌موج ۴۲۰nm بتابد بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌های گسیل‌شده حدود ۰/۵۰eV است. بسامد آستانه برای گسیل فوتوالکترون‌ها از سطح این فلز چقدر است؟

۵ــ۲ و ۵ــ۳ طیف خطی و مدل اتم راترفورد ــ بور

۱. الف) طیف گسیلی یک جسم در چه مواردی پیوسته و در چه مواردی گسسته یا خطی است؟ منشأ فیزیکی این تفاوت را توضیح دهید.
ب) توضیح دهید چگونه می‌توان طیف‌های گسیلی پیوسته و خطی را ایجاد کرد.

۱۱. شکل صفحهٔ چد سه رشتهٔ طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی را روی نمودار تراز انرژی نشان می‌دهد که بر اساس مدل اتمی بور رسم شده است.

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۵
فیزیک ۳
۵ــ۱ اثر فوتوالکتریک و فوتون
۱. یک لامپ حاوی گاز کم‌فشار سدیم، فوتون‌هایی با طول‌موج ۵۸۹nm گسیل می‌کند.
الف) بسامد و انرژی فوتون‌های گسیلی را حساب کنید. انرژی را برحسب ژول و همچنین الکترون ولت بیان کنید.
ب) فرض کنید توان تابشی مفید لامپ ۵/۰W است. در هر دقیقه چند فوتون از این لامپ گسیل می‌شود؟
۲. توان باریکهٔ نور خروجی یک لیزر گازی هلیم نئون ۵/۰mW است. اگر توان ورودی این لیزر ۵۰/۰W باشد،
الف) بازده لیزر را حساب کنید.
ب) اگر طول‌موج باریکهٔ نور خروجی ۶۳۲nm باشد، شمار فوتون‌هایی را پیدا کنید که در هر ثانیه از این لیزر گسیل می‌شود.
۳. یک لامپ رشته‌ای با توان ۱۰۰W از فاصلهٔ یک کیلومتری دیده می‌شود. فرض کنید نور لامپ به‌طور یکنواخت در فضای اطراف آن منتشر می‌شود و بازدهٔ لامپ ۵ درصد است (یعنی ۵W تابش مرئی گسیل می‌کند) و فقط ۱ درصد این تابش دارای طول‌موجی در حدود ۵۵۰nm است. در هر ثانیه چه تعداد فوتون با این طول‌موج وارد مردمک‌های چشم ناظری می‌شود که در این فاصله قرار دارد؟ (قطر مردمک را ۲/۰mm در نظر بگیرید.)
۴. شدت تابشی خورشید در خارج جو زمین حدود ۱۳۶۰W/m² است؛ یعنی در هر ثانیه به سطحی برابر ۱m²، مقدار انرژی ۱۳۶۰J می‌رسد. وقتی این تابش به سطح زمین می‌رسد مقداری زیادی از شدت آن، به علت جذب در جو و آبرها از دست می‌رود. اگر شدت تابشی متوسط خورشید در سطح زمین به‌ازای هر متر مربع حدود ۳۰۰W/m² باشد، در هر ثانیه چند فوتون به هر متر مربع از سطح زمین می‌رسد؟ طول‌موج متوسط فوتون‌ها را ۵۷۰nm فرض کنید.
۵. الف) منظور از اثر فوتوالکتریک چیست؟
ب) توضیح دهید نظریهٔ کوانتومی تابش که توسط اینشتین مطرح شد و در آن نور به‌صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی در نظر گرفته شد چگونه به تبیین اثر فوتوالکتریک کمک کرد؟
ب) معادلهٔ مربوط به اثر فوتوالکتریک به‌صورت $K_{max} = hf - W$ بیان می‌شود. سه بخش این معادله را به طور جداگانه توضیح دهید.
۱۳۴
۶. توضیح دهید برای یک فلز معین، تغییر هر یک از کمیت‌های زیر چه تأثیری در نتیجهٔ اثر فوتوالکتریک دارد.
الف) افزایش یا کاهش بسامد نور فرودی نسبت به بسامد آستانه
ب) افزایش شدت نور فرودی در بسامدهای کوچک‌تر از بسامد آستانه
ب) کاهش شدت نور فرودی در بسامدهای بزرگ‌تر از بسامد آستانه
۷. حداقل انرژی لازم برای جدا کردن یک الکترون از سطح فلز سدیم برابر ۲/۲۸eV است.
الف) طول‌موج آستانه برای گسیل فوتوالکترون از سطح فلز سدیم چقدر است و با مراجعه به شکل ۵ــ۶ معلوم کنید این طول‌موج مربوط به چه رنگی است؟
ب) آیا فوتون‌هایی با طول‌موج ۶۸۰nm قادر به جدا کردن الکترون از سطح این فلز هستند؟
۸. تابش فرابنفشی با طول‌موج ۲۰۰nm بر سطح نمونه‌ای از جنس تنگل با تابع کار ۴/۹۰eV تابیده می‌شود. بیشینهٔ تندی فوتوالکترون‌های جدا شده از سطح تنگل را حساب کنید.
۹. هر گاه بر سطح فلزی نوری با طول‌موج ۴۲۰nm بتابد بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌های گسیل‌شده حدود ۰/۵۰eV است. بسامد آستانه برای گسیل فوتوالکترون‌ها از سطح این فلز چقدر است؟
۵ــ۲ و ۵ــ۳ طیف خطی و مدل اتم راه‌رفورد ــ بور
۱۰. الف) طیف گسیلی یک جسم در چه مواردی پیوسته و در چه مواردی گسسته یا خطی است؟ منشأ فیزیکی این تفاوت را توضیح دهید.
ب) توضیح دهید چگونه می‌توان طیف‌های گسیلی پیوسته و خطی را ایجاد کرد.
۱۱. شکل صفحهٔ چد سه رشتهٔ طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی را روی نمودار تراز انرژی نشان می‌دهد که بر اساس مدل اتمی بور رسم شده است.

$$= (۲/۲۵\,\text{eV})\left(\frac{۱/۶\times۱۰^{-۱۹}\,\text{J}}{۱\,\text{eV}}\right) = ۳/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\,\text{J}$$

تعداد فوتون‌هایی که در هر ثانیه با طول موج ۵۵۰nm از این لامپ گسیل می‌شود برابر است با :

$$n = \frac{E_t}{E} = \frac{۰/۰۵\,\text{J}}{۳/۶\times۱۰^{-۱۹}\,\text{J}} = ۱/۳۸\times۱۰^{۱۷}$$

به این ترتیب تعداد فوتون‌هایی که با این طول موج وارد چشم ناظر می‌شوند برابر است با :

$$n' = \left(\frac{\pi r^{۲}}{۴\pi R^{۲}}\right)n = \left(\frac{۱۰^{-۶}\,\text{m}^{۲}}{۴\times۱۰^{۶}\,\text{m}^{۲}}\right)(۱/۳۸\times۱۰^{۱۷})$$

$$\Rightarrow n' = \left(\frac{۱/۳۸}{۴}\right)\times۱۰^{۵} = ۳/۴۵\times۱۰^{۴}$$

۴ ابتدا انرژی متوسط هر فوتون را پیدا می‌کنیم.

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{۱۲۴۰\,\text{eV.nm}}{۵۷۰\,\text{nm}} = ۲/۱۷\,\text{eV}$$

$$= (۲/۱۷\,\text{eV})\left(\frac{۱/۶\times۱۰^{-۱۹}\,\text{J}}{۱\,\text{eV}}\right) = ۳/۴۸\times۱۰^{-۱۹}\,\text{J}$$

انرژی کل فوتون‌های رسیده به سطحی برابر ۱m² در هر ثانیه برابر است با :

$$E_t = (۳۰۰\,\frac{\text{J}}{\text{sm}^{۲}})(۱\,\text{m}^{۲})(۱\,\text{s}) = ۳۰۰\,\text{J}$$

به این ترتیب تعداد فوتون‌هایی که در هر ثانیه به هر متر مربع از سطح زمین می‌رسد برابر است با :

$$n = \frac{E_t}{E} = \frac{۳۰۰\,\text{J}}{۳/۴۸\times۱۰^{-۱۹}\,\text{J}} = ۸/۶۲\times۱۰^{۲۰}$$

خوب است توجه دانش‌آموزان را به این نکته مهم جلب کنید که ایران از نظر جغرافیایی در وضعیت مطلوبی نسبت به تابش خورشید قرار گرفته است، میانگین انرژی‌ای که از تابش خورشید به هر متر مربع آن می‌رسد حدود ۱۰۰۰J است. به همین دلیل است که سرمایه‌گذاری در انرژی خورشیدی در ایران (به‌جز نوار شمالی) به مراتب از بسیاری از کشورهای دیگر جهان بازدهی بالاتری دارد.

۵ الف) لازم است دانش‌آموزان فهم درستی از پاراگراف اول بخش ۵ــ۱ ارائه دهند.

ب) اینشتین افزون بر اینکه نور را به‌صورت بسته‌های انرژی در نظر گرفت، فرض کرد که هریک از این بسته‌های انرژی صرفاً با یکی از الکترون‌های سطح فلز برهم‌کنش می‌کند. اگر در حین برهم‌کنش، فوتون انرژی کافی داشته باشد تا الکترون را از سطح فلز خارج کند، اثر فوتوالکتریک رخ می‌دهد.

ب) کافی است دانش‌آموزان فهم درست خود را از هریک از کمیت‌های مندرج در این رابطه را بیان کنند.

۶ الف) با کاهش بسامد نور فرودی نسبت به بسامد آستانه، اثر فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد درحالی‌که با افزایش بسامد نور فرودی نسبت به بسامد آستانه، انرژی فوتون‌های تابش شده به سطح فلز افزایش می‌یابد و در نتیجه فوتوالکترون‌ها با انرژی جنبشی بزرگ‌تری سطح فلز را ترک می‌کنند.

ب) افزایش شدت نور فرودی برای حالتی که بسامد فوتون‌ها از بسامد آستانه کمتر است، بدون آنکه اثر فوتوالکتریک رخ دهد تنها

تعداد فوتون‌هایی را که با سطح فلز برهم‌کنش می‌کنند افزایش می‌دهد و این برهم‌کنش سبب افزایش انرژی درونی فلز و در نتیجه افزایش دمای آن می‌شود.

پ) سبب کاهش فوتون‌ها و در نتیجه کاهش تعداد فوتوالکترون‌هایی می‌شود که از سطح فلز خارج می‌شوند.

۷ الف)

$$W_\circ = ۲/۲۸\,\text{eV}$$

$$f_\circ = \frac{W_\circ}{h} \Rightarrow \lambda_\circ = \frac{hc}{W_\circ} = \frac{۱۲۴۰\,\text{eV.nm}}{۲/۲۸\,\text{eV}} \approx ۵۴۴\,\text{nm}$$

این طول موج متناظر با رنگ سبز است.

ب) خیر، زیرا بسامد آنها کمتر از بسامد آستانه است.

۸

$$K_{\max} = hf - W_\circ = \frac{hc}{\lambda} - W_\circ$$

$$= \frac{۱۲۴۰\,\text{eV.nm}}{۲۰۰\,\text{nm}} - ۴/۹۰\,\text{eV} = ۱/۳\,\text{eV}$$

۹

$$K_{\max} = \frac{hc}{\lambda} - W_\circ \Rightarrow ۰/۵\,\text{eV} = \frac{۱۲۴۰\,\text{eV.nm}}{۴۲۰\,\text{nm}} - W_\circ$$

$$\Rightarrow W_\circ = ۲/۴۵\,\text{eV}$$

$$f_\circ = \frac{W_\circ}{h} = \frac{۲/۴۵\,\text{eV}}{۴/۱۴\times۱۰^{-۱۵}\,\text{eV.s}} = ۵/۹۲\times۱۰^{۱۴}\,\text{Hz}$$

۵ــ۲ و ۵ــ۳ طیف خطی و مدل اتم رادرفورد ــ بور :

۱۰ در پاراگراف اول بخش ۵ــ۲ درخصوص تفاوت طیف گسیلی اجسام جامد (که پیوسته است) و طیف گسیلی گازهای اتمی (که خطی است) توضیح داده شده است.

ب) شکل‌های ۵ــ۶ و ۵ــ۸ روش تشکیل طیف گسیلی جسم جامد (مانند رشته تنگستن یک لامپ) و گاز اتمی (مانند گاز هیدروژن اتمی) نشان داده شده است.

۱۱ الف) $n=۱$ متناظر با حالت پایه اتم است و برای اتم هیدروژن، انرژی الکترون در حالت پایه $-۱۳/۶\,\text{eV}$ است.

ب) از یک طرف برهم‌کنش بین اتم‌های گاز بسیار ناچیز است و از طرف دیگر بنابر مدل بور، الکترون در مدارهایی با شعاع $(r_n = a_\circ n^۲)$ و انرژی معین $(E_n = \frac{-۱۳/۶\,\text{eV}}{n^۲})$ در فضای پیرامون هسته توزیع شده‌اند. لذا هنگام گذار الکترون‌ها بین دو مدار، تنها فوتون‌هایی با انرژی معین می‌توانند گسیل یا جذب شوند. به همین دلیل طیف گسیلی یا جذبی گازهای اتمی، خطی است.

پ) بلندترین طول موج به ازای $n=۲$ و کوتاه‌ترین طول موج به ازای $n=\infty$ به‌دست می‌آید. به این ترتیب داریم :

$$\lambda_{\max} = \frac{۴}{۳R} \Rightarrow \Delta\lambda = \frac{۴}{۳R} - \frac{۱}{R} = \frac{۱}{۳R} \simeq ۳۰\,\text{nm}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{۱}{R}$$

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۵

فیزیک ۳

۵ــ۱ اثر فوتوالکتریک و فوتون

۱. یک لامپ حاوی گاز کم‌فشار سدیم، فوتون‌هایی با طول‌موج ۵۸۹nm گسیل می‌کند.
الف) بسامد و انرژی فوتون‌های گسیلی را حساب کنید. انرژی را برحسب ژول و همچنین الکترون ولت بیان کنید.
ب) فرض کنید توان تابشی مفید لامپ ۵/۰W است. در هر دقیقه چند فوتون از این لامپ گسیل می‌شود؟

۲. توان باریکهٔ نور خروجی یک لیزر گازی هلیم نئون ۵/۰mW است. اگر توان ورودی این لیزر ۵۰/۰W باشد،
الف) بازده لیزر را حساب کنید.
ب) اگر طول‌موج باریکهٔ نور خروجی ۶۳۲nm باشد، شمار فوتون‌هایی را پیدا کنید که در هر ثانیه از این لیزر گسیل می‌شود.

۳. یک لامپ رشته‌ای با توان ۱۰۰W از فاصلهٔ یک کیلومتری دیده می‌شود. فرض کنید نور لامپ به‌طور یکنواخت در فضای اطراف آن منتشر می‌شود و یازدهٔ لامپ ۵ درصد است (یعنی ۵W تابش مرئی گسیل می‌کند) و فقط ۱ درصد این تابش دارای طول‌موجی در حدود ۵۵۰nm است. در هر ثانیه چه تعداد فوتون با این طول‌موج وارد مردمک‌های چشم ناظری می‌شود که در این فاصله قرار دارد؟ (قطر مردمک را ۲/۰mm در نظر بگیرید.)

۴. شدت تابشی خورشید در خارج جو زمین حدود ۱۳۶۰W/m² است؛ یعنی در هر ثانیه به سطحی برابر ۱m²، مقدار انرژی ۱۳۶۰J می‌رسد. وقتی این تابش به سطح زمین می‌رسد مقداری زیادی از شدت آن، به علت جذب در جو و آبرها از دست می‌رود. اگر شدت تابشی متوسط خورشید در سطح زمین به‌ازای هر متر مربع حدود ۲۰۰W/m² باشد، در هر ثانیه چند فوتون به هر متر مربع از سطح زمین می‌رسد؟ طول‌موج متوسط فوتون‌ها را ۵۷۰nm فرض کنید.

۵. الف) منظور از اثر فوتوالکتریک چیست؟
ب) توضیح دهید نظریهٔ کوانتومی تابش که توسط اینشتین مطرح شد و در آن نور به‌صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی در نظر گرفته شد چگونه به تبیین اثر فوتوالکتریک کمک کرد؟
پ) معادلهٔ مربوط به اثر فوتوالکتریک به‌صورت $K_{max} = hf - W$ بیان می‌شود. سه بخش این معادله را به طور جداگانه توضیح دهید.

۶. توضیح دهید برای یک فلز معین، تغییر هر یک از کمیت‌های زیر چه تأثیری در نتیجهٔ اثر فوتوالکتریک دارد.
الف) افزایش یا کاهش بسامد نور فرودی نسبت به بسامد آستانه
ب) افزایش شدت نور فرودی در بسامدهای کوچک‌تر از بسامد آستانه
پ) کاهش شدت نور فرودی در بسامدهای بزرگ‌تر از بسامد آستانه

۷. حداقل انرژی لازم برای جدا کردن یک الکترون از سطح فلز سدیم برابر ۲/۲۸eV است.
الف) طول‌موج آستانه برای گسیل فوتوالکترون از سطح فلز سدیم چقدر است و با مراجعه به شکل ۵ــ۶ معلوم کنید این طول‌موج مربوط به چه رنگی است؟
ب) آیا فوتون‌هایی با طول‌موج ۶۸۰nm قادر به جدا کردن الکترون از سطح این فلز هستند؟

۸. تابش فرابنفشی با طول‌موج ۲۰۰nm بر سطح نمونه‌ای از جنس تنگل با تابع کار ۴/۹۰eV تابیده می‌شود. بیشینهٔ تندی فوتوالکترون‌های جدا شده از سطح تنگل را حساب کنید.

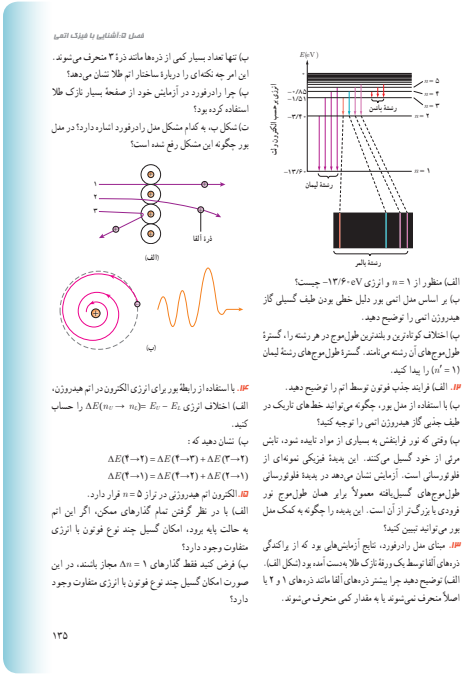
۹. هر گاه بر سطح فلزی نوری با طول‌موج ۴۲۰nm بتابد بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌های گسیل‌شده حدود ۰/۵۰eV است. بسامد آستانه برای گسیل فوتوالکترون‌ها از سطح این فلز چقدر است؟

۵ــ۲ و ۵ــ۳ طیف خطی و مدل اتم رادرفورد ــ بور

۱۰. الف) طیف گسیلی یک جسم در چه مواردی پیوسته و در چه مواردی گسسته یا خطی است؟ منشأ فیزیکی این تفاوت را توضیح دهید.
ب) توضیح دهید چگونه می‌توان طیف‌های گسیلی پیوسته و خطی را ایجاد کرد.

۱۱. شکل صفحهٔ چند سه رشتهٔ طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی را روی نمودار تراز انرژی نشان می‌دهد که بر اساس مدل اتمی بور رسم شده است.

۱۳۴


فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی

ب) تنها تعداد بسیار کمی از ذره‌ها مانند ذرهٔ ۳ منحرف می‌شوند. این امر چه نکته‌ای را دربارهٔ ساختار اتم طلا نشان می‌دهد؟

پ) چرا رادرفورد در آزمایش خود از صفحهٔ بسیار نازک طلا استفاده کرده بود؟

ت) شکل پ، به کدام مشکل مدل رادرفورد اشاره دارد؟ در مدل بور چگونه این مشکل رفع شده است؟

ذرهٔ آلفا

(الف)

(ب)

با استفاده از رابطهٔ بور برای انرژی الکترون در اتم هیدروژن، الف) اختلاف انرژی $\Delta E(n_u \to n_l) = E_u - E_l$ را حساب کنید.

ب) نشان دهید که :

$\Delta E(۴\to۲) = \Delta E(۴\to۳) + \Delta E(۳\to۲)$

$\Delta E(۴\to۱) = \Delta E(۴\to۲) + \Delta E(۲\to۱)$

الکترون اتم هیدروژنی در تراز $n = ۵$ قرار دارد.

الف) با در نظر گرفتن تمام گذارهای ممکن، اگر این اتم به حالت پایه برود، امکان گسیل چند نوع فوتون با انرژی متفاوت وجود دارد؟

ب) فرض کنید فقط گذارهای $\Delta n = ۱$ مجاز باشند، در این صورت امکان گسیل چند نوع فوتون با انرژی متفاوت وجود دارد؟

۱۳۵

$E(eV)$

انرژی در حبس الکترون در اتم

$n = ۵$

$n = ۴$

$n = ۳$

$n = ۲$

$n = ۱$

$-۰/۸۵$

$-۱/۵۱$

$-۳/۴$

$-۱۳/۶$

رشتهٔ پاشن

رشتهٔ لیمان

رشتهٔ بالمر

الف) منظور از $n = ۱$ و انرژی $-۱۳/۶۰\,eV$ چیست؟

ب) بر اساس مدل اتمی بور دلیل خطی بودن طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی را توضیح دهید.

پ) اختلاف کوتاه‌ترین و بلندترین طول‌موج در هر رشته را، گسترهٔ طول‌موج‌های آن رشته می‌نامند. گسترهٔ طول‌موج‌های رشتهٔ لیمان ($n' = ۱$) را پیدا کنید.

الف) فرایند جذب فوتون توسط اتم را توضیح دهید.

ب) با استفاده از مدل بور، چگونه می‌توانید خط‌های تاریک در طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را توجیه کنید؟

ب) وقتی که نور فرابنفش به بسیاری از مواد تابیده شود، تابش مرئی از خود گسیل می‌کنند. این پدیدهٔ فیزیکی نمونه‌ای از فلوئورسانی است. آزمایش نشان می‌دهد در پدیدهٔ فلوئورسانی طول‌موج‌های گسیل‌یافته معمولاً برابر همان طول‌موج نور فرودی یا بزرگ‌تر از آن است. این پدیده را چگونه به کمک مدل بور می‌توانید تبیین کنید؟

مبنای مدل رادرفورد، نتایج آزمایش‌هایی بود که از پراکندگی ذره‌های آلفا توسط یک ورقهٔ نازک طلا به‌دست آمده بود (شکل الف).

الف) توضیح دهید چرا بیشتر ذره‌های آلفا مانند ذره‌های ۱ و ۲ یا اصلاً منحرف نمی‌شوند یا به مقدار کمی منحرف می‌شوند.

۱۲ الف) به شکل ۵ــ۱۸ــ ب و شرح متناظر با آن توجه شود.

ب) با توجه به شکل ۵ــ۱۶، هنگام عبور فوتون‌ها از سلول حاوی اتم‌های گازی، برخی از این فوتون‌ها که انرژی آنها برابر با اختلاف انرژی ترازهای اتم‌های درون گاز هستند جذب شده و به همین دلیل طیف ایجاد شده دارای خط‌های تاریکی است که طول موج آنها متناظر با طول موج همین فوتون‌های جذب شده است. نکتهٔ مهمی که باید توجه شود این است که مدت کوتاهی ($۱۰^{-۸}\,s$) پس از جذب این فوتون‌ها توسط الکترون و رفتن به مدار بالاتر، دوباره الکترون به حالت قبلی بازمی‌گردد و فوتونی با همان طول موج جذب شده را گسیل می‌کند. از آنجا که جهت این فوتون در جهت فوتون جذب شده نیست (یعنی دارای جهت کاتوره‌ای است) لذا دائماً این خط‌های تاریک روی طیف جذبی گازهای اتمی مشاهده می‌شود.

پ) زیرا هنگام برخورد نور فرابنفش به یک ماده، به دلیل انرژی زیادی که فوتون‌های آن دارند ممکن است الکترون‌هایی پس از جذب انرژی فوتون، به چند تراز بالاتر از جایی که بوده‌اند بروند (شکل الف). پس از مدت کوتاهی ($۱۰^{-۸}\,s$) و هنگام برگشت این الکترون‌ها ممکن است مستقیماً به تراز اولیه خود نروند و پس از رفتن روی ترازهای میانی به تراز اولیه خود بازگردند (شکل ب).

۱۳ الف و ب) به شرح مدل رادرفورد و شکل ۵ــ۱۰ توجه شود.

پ) زیرا ورقه‌های طلا را بدون آنکه دوام خود را از دست بدهند به اندازه کافی می‌توان نازک ساخت. معمولاً ورقه‌های طلا را با ضخامت صدها اتم نیز می‌توان ساخت.

ت) ناپایداری اتم. زیرا مطابق فیزیک کلاسیک، الکترون‌های (بار منفی) در حال چرخش به دور هسته (با بار مثبت) به تدریج انرژی خود را از دست می‌دهند و سرانجام روی هسته فرو می‌افتند.

۱۴ الف) با استفاده از رابطه ۵ــ۸ ($E_n = \frac{-۱۳/۶\,eV}{n^۲}$) داریم :

$$\Delta E(n_u \to n_L) = \frac{-۱۳/۶\,eV}{n_u^۲} + \frac{۱۳/۶\,eV}{n_L^۲} = (-۱۳/۶\,eV)\left(\frac{۱}{n_u^۲} - \frac{۱}{n_L^۲}\right)$$

ب)

$$\Delta E(۴\to۲) = \Delta E(۴\to۳) + \Delta E(۳\to۲)$$

$$(-۱۳/۶\,eV)\left(\frac{۱}{۴^۲} - \frac{۱}{۲^۲}\right) = (-۱۳/۶\,eV)\left(\frac{۱}{۴^۲} - \frac{۱}{۳^۲}\right) + (-۱۳/۶\,eV)\left(\frac{۱}{۳^۲} - \frac{۱}{۲^۲}\right)$$

$$\frac{۱}{۱۶} - \frac{۱}{۴} = \frac{۱}{۱۶} - \frac{۱}{۹} + \frac{۱}{۹} - \frac{۱}{۴} = \frac{۱}{۱۶} - \frac{۱}{۴}$$

۱۵ الف) گذارهای ممکن از $n=۵$ به حالت پایه ($n=۱$) عبارت‌اند از :

$\Delta E(۴\to۱)$ و $\Delta E(۴\to۲)$ و $\Delta E(۴\to۳)$ و $\Delta E(۵\to۴)$

$\Delta E(۳\to۱)$ و $\Delta E(۳\to۲)$ و $\Delta E(۵\to۳)$

$\Delta E(۲\to۱)$ و $\Delta E(۵\to۲)$

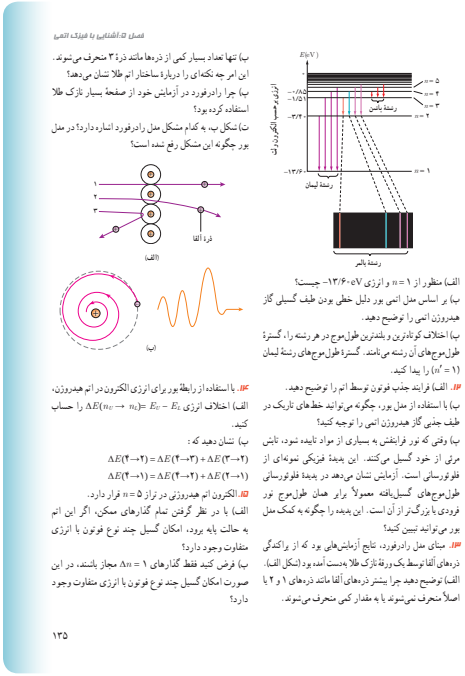
$\Delta E(۵\to۱)$

همان‌طور که دیده می‌شود در مجموع امکان ۱۰ گذار وجود دارد.

ب) با توجه به شرط $\Delta n=۱$، تنها امکان ۴ گذار زیر وجود دارد.

$\Delta E(۵\to۴)$ و $\Delta E(۴\to۳)$ و $\Delta E(۳\to۲)$

$\Delta E(۲\to۱)$



فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی

ب) تنها تعداد بسیار کمی از ذره‌ها مانند ذرهٔ ۳ منحرف می‌شوند. این امر چه نکته‌ای را دربارهٔ ساختار اتم طلا نشان می‌دهد؟

ب) چرا رادرفورد در آزمایش خود از صفحهٔ بسیار نازک طلا استفاده کرده بود؟

ت) شکل ب، به کدام مشکل مدل رادرفورد اشاره دارد؟ در مدل بور چگونه این مشکل رفع شده است؟

ذرهٔ آلفا

(الف)

(ب)

$E(eV)$

انرژی بر حسب الکترون‌ولت

رشتهٔ بالمر

رشتهٔ لیمان

$n=۵$

$n=۴$

$n=۳$

$n=۲$

$n=۱$

$-۰/۸۵$

$-۱/۵۱$

$-۳/۴$

$-۱۳/۶$

الف) منظور از $n=۱$ و انرژی $-۱۳/۶۰۵۷$ جیست؟

ب) بر اساس مدل اتمی بور دلیل خطی بودن طیف گسیلی گاز هیدروژن را توضیح دهید.

پ) اختلاف کوتاه‌ترین و بلندترین طول‌موج در هر رشته را، گسترهٔ طول‌موج‌های آن رشته می‌نامند. گسترهٔ طول‌موج‌های رشتهٔ لیمان ($n'=۱$) را پیدا کنید.

۱۱. الف) فرایند جذب فوتون توسط اتم را توضیح دهید.

ب) با استفاده از مدل بور، چگونه می‌توانید خط‌های تاریک در طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را توجیه کنید؟

پ) وقتی که نور فرابنفش به بسیاری از مواد تابیده شود، تابش مرئی از خود گسیل می‌کنند. این پدیدهٔ فیزیکی نمونه‌ای از فلوئورسانی است. آزمایش نشان می‌دهد در پدیدهٔ فلوئورسانی طول‌موج‌های گسیل‌یافته معمولاً برابر همان طول‌موج نور فرودی یا بزرگ‌تر از آن است. این پدیده را چگونه به کمک مدل بور می‌توانید تبیین کنید؟

۱۲. مبنای مدل رادرفورد، نتایج آزمایش‌هایی بود که از پراکندگی ذره‌های آلفا توسط یک ورقهٔ نازک طلا به‌دست آمده بود (شکل الف). الف) توضیح دهید چرا بیشتر ذره‌های آلفا مانند ذره‌های ۱ و ۲ یا اصلاً منحرف نمی‌شوند یا به مقدار کمی منحرف می‌شوند.

۱۴. با استفاده از رابطهٔ بور برای انرژی الکترون در اتم هیدروژن، الف) اختلاف انرژی $\Delta E(n_u\to n_L)=E_u-E_L$ را حساب کنید.

ب) نشان دهید که :

$\Delta E(۴\to۲)=\Delta E(۴\to۳)+\Delta E(۳\to۲)$

$\Delta E(۴\to۱)=\Delta E(۴\to۲)+\Delta E(۲\to۱)$

۱۵. الکترون اتم هیدروژنی در تراز $n=۵$ قرار دارد.

الف) با در نظر گرفتن تمام گذارهای ممکن، اگر این اتم به حالت پایه برود، امکان گسیل چند نوع فوتون با انرژی متفاوت وجود دارد؟

ب) فرض کنید فقط گذارهای $\Delta n=۱$ مجاز باشند، در این صورت امکان گسیل چند نوع فوتون با انرژی متفاوت وجود دارد؟

۱۳۵

۵ـ۴ـ لیزر

۱۶ الف) یعنی اتم‌ها در حالت عادی هستند و برانگیخته نشده‌اند.

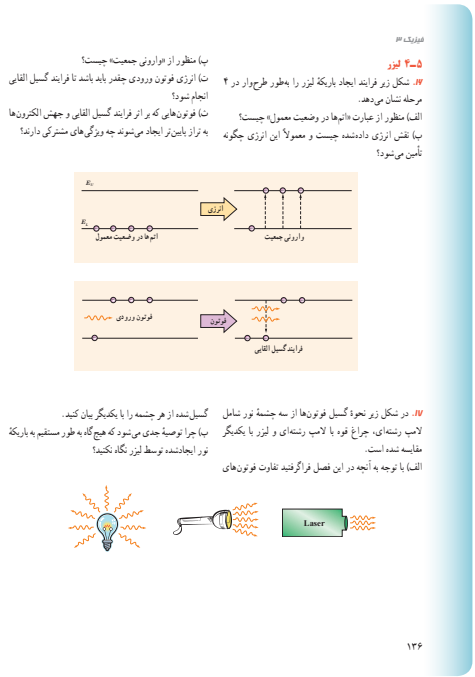
ب) این انرژی سبب برانگیخته شدن اتم‌ها می‌شود.

پ) حالتی است که تعداد اتم‌های برانگیخته شده فراتر از تعداد اتم‌ها در حالت معمول باشد.

ت) درست برابر اختلاف انرژی ترازهای E_u و E_L است.

ث) هم‌بسامد، هم‌جهت و همگام (هم‌فاز)اند.

۱۷ فوتون‌های گسیل شده از رشتهٔ تنگستن لامپ دارای طیف گسترده و پیوسته‌ای از طول موج‌ها هستند و در تمام جهت‌های مختلف حرکت می‌کنند درحالی‌که آینهٔ درون چراغ‌قوه جهت‌مندی بهتری به فوتون گسیل شده از لامپ می‌دهد و فوتون‌ها در گسترهٔ فضایی کوچک‌تری منتشر می‌شوند. فوتون‌های گسیل شده از لیزر، افزون بر اینکه هم‌بسامدند، هم‌جهت و همگام هستند.



فیزیک ۳

۵ـ۴ لیزر

۱۷. شکل زیر فرایند ایجاد باریکهٔ لیزر را به‌طور طرح‌وار در ۴ مرحله نشان می‌دهد.

الف) منظور از عبارت «اتم‌ها در وضعیت معمول» چیست؟

ب) نقش انرژی داده‌شده چیست و معمولاً این انرژی چگونه تأمین می‌شود؟

ب) منظور از «وارونی جمعیت» چیست؟

ت) انرژی فوتون ورودی چقدر باید باشد تا فرایند گسیل القایی انجام شود؟

ث) فوتون‌هایی که بر اثر فرایند گسیل القایی و جهش الکترون‌ها به تراز پایین‌تر ایجاد می‌شوند چه ویژگی‌های مشترکی دارند؟

E_u

E_L

انرژی

اتم‌ها در وضعیت معمول

وارونی جمعیت

فوتون ورودی

فوتون

فرایند گسیل القایی

۱۸. در شکل زیر نحوهٔ گسیل فوتون‌ها از سه چشمهٔ نور شامل لامپ رشته‌ای، چراغ قوه با لامپ رشته‌ای و لیزر با یکدیگر مقایسه شده است.

الف) با توجه به آنچه در این فصل فراگرفته تفاوت فوتون‌های گسیل‌شده از هر چشمه را با یکدیگر بیان کنید.

ب) چرا توصیهٔ جدی می‌شود که هیچ‌گاه به طور مستقیم به باریکهٔ نور ایجادشده توسط لیزر نگاه نکنید؟

Laser

۱۳۶

فصل ششم

آشنایی با فیزیک هسته‌ای

۶ـ۱ـ ساختار هسته
۶ـ۲ـ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر
۶ـ۳ـ شکافت هسته‌ای
۶ـ۴ـ گداخت (همجوشی) هسته‌ای
پرسش‌ها و تمرین‌های پیشنهادی فصل ۶
راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۶

پیامدها

دانش‌آموزان با درک مفاهیم مرتبط با فیزیک هسته‌ای، به این شناخت می‌رسند که :

- مبحث فیزیک هسته‌ای کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف زندگی بشر دارد.
- عدم رعایت نکات ایمنی و استانداردهای لازم در حوزهٔ فیزیک هسته‌ای، می‌تواند پیامدهای زیان‌بار و غیرقابل جبرانی داشته باشد.

چه شناختی مطلوب است؟

- هستهٔ اتم از نوترون و پروتون‌ها تشکیل شده است که به‌طور کلی نوکلئون نامیده می‌شوند.
- اتم‌هایی که تعداد پروتون یکسان و تعداد نوترون متفاوت دارند ایزوتوپ نامیده می‌شوند.
- نیروی بین نوکلئون‌های مجاور یکدیگر، نیروی هسته‌ای نامیده می‌شود که بسیار کوتاه‌برد است.
- انرژی لازم برای جدا کردن نوکلئون‌های یک هسته، انرژی بستگی هسته‌ای نامیده می‌شود.
- به‌طور کلی جرم هسته از مجموع جرم نوکلئون‌های تشکیل‌دهندهٔ آن اندکی کمتر است. این اختلاف جرم را کاستی جرم می‌نامند.
- در پرتوزایی طبیعی، پرتوهای α، پرتوهای β و پرتوهای γ ایجاد می‌شود.
- مدت زمانی که طول می‌کشد تا تعداد هسته‌های مادر موجود در یک نمونه به نصف برسد، نیمه‌عمر نامیده می‌شود.
- فرایند تقسیم شدن یک هستهٔ سنگین به دو هسته با جرم کمتر، شکافت هسته‌ای نامیده می‌شود.
- فرایند ترکیب شدن دو هستهٔ سبک و تشکیل هستهٔ سنگین‌تر، گداخت یا همجوشی هسته‌ای نامیده می‌شود.

چه پرسش‌هایی اساسی است و باید درنظر گرفته شود؟

- مرتبهٔ بزرگی نسبت ابعاد هسته به ابعاد اتم چقدر است؟
- ایزوتوپ چیست؟
- منشأ و ویژگی‌های فیزیکی نیروی هسته‌ای چیست؟
- منشأ انرژی بستگی چیست؟
- در پرتوزایی طبیعی چه پرتوهایی ایجاد می‌شود و ویژگی‌های هرکدام از این پرتوها چیست؟
- مفهوم نیمه‌عمر چیست؟
- فرایند شکافت و فرایند گداخت هسته‌ای چه ویژگی‌هایی دارند؟
- نقش مواد کندساز در قلب راکتورهای هسته‌ای چیست؟

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

دانش‌آموزان خواهند دانست که :

- نوکلئون‌ها (شامل پرتون و نوترون) اجزای تشکیل‌دهنده هسته‌اند.
- هر نوکلئون فقط به نوکلئون مجاورش نیروی هسته‌ای وارد می‌کند.
- انرژی معادل انرژی بستگی هسته‌ای باید تأمین شود تا هسته به نوکلئون‌های تشکیل‌دهندهٔ آن تقسیم شود.
- در پرتوزایی طبیعی، سه نوع پرتو با ویژگی‌های فیزیکی متفاوت ایجاد می‌شود.
- با گذشت زمان، تعداد هسته‌های مادر پرتوزا در یک نمونه کاهش می‌یابد.
- واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ با جذب یک نوترون کُند (کم‌انرژی) آغاز می‌شود.
- به فرایند افزایش درصد یا غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در یک نمونه، غنی‌سازی اورانیم گفته می‌شود.
- در فرایند گداخت هسته‌ای، دو هسته سبک با یکدیگر ترکیب می‌شوند و هستهٔ سنگین‌تری به‌وجود آروند.

دانش‌آموزان قادر خواهند بود :

- به کمک عدد اتمی عناصر، محل و نام آنها را در جدول تناوبی عناصر مشخص کنند.
- نحوهٔ جلوگیری و نفوذ هر کدام از پرتوهای α، β و γ را به‌طور عملی پیشنهاد دهند.
- نحوهٔ کار آشکارسازی دود را شرح دهند.

بودجه‌بندی پیشنهادی

- **جلسهٔ اول** : تصویر شروع فصل + مقدمه‌ای بر بحث فیزیک هسته‌ای + ساختار هسته تا ابتدای پایداری هسته.
- **جلسهٔ دوم** : از پایداری هسته تا پایان بخش ۶ــ۱ + بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۶ از شماره ۱ تا ۴.
- **جلسهٔ سوم** : بخش ۶ــ۲ تا ابتدای نیمه‌عمر.
- **جلسهٔ چهارم** : از ابتدای نیمه‌عمر تا پایان بخش ۶ــ۲ + بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۶ از شمارهٔ ۵ تا شمارهٔ ۱۱.
- **جلسهٔ پنجم** : بخش ۶ــ۳ و ۶ــ۴.
- **جلسهٔ ششم** : جمع‌بندی و بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۶ از شمارهٔ ۱۲ تا ۱۷.
- **جلسهٔ هفتم** : آزمون تشریحی فصل ۶.

در این تصویر یکی از کاربردهای فیزیک هسته‌ای در پزشکی نوین و امروزی را نشان می‌دهد که بدون جراحی، قادرند برخی از بیماری‌ها و اختلالات مرتبط با مغز را درمان کنند. دانش‌آموزان در ادامهٔ فصل با جزئیات این روش آشنا می‌شوند.

راهنمای تدریس

۶ـ۱ ساختار هسته

ابتدا نگاهی به شکل ۶ــ۱ و مرتبهٔ بزرگی ابعاد اتم نسبت به ابعاد هسته داشته باشید.

سپس به معرفی واژهٔ نوکلئون بپردازید و دلیل این نامگذاری را می‌توانید هنگامی اشاره کنید که به بررسی نیروی هسته‌ای می‌پردازید.

فصل ۶: آشنایی با فیزیک هسته‌ای

برای یک عنصر با نماد شیمیایی X، نماد هسته به‌صورت زیر نشان داده می‌شود[۱] :

$$^{A}_{Z}X_{N}$$

(عدد جرمی، عدد اتمی، نماد عنصر، عدد نوترونی)

مشخص کردن N در نمادنویسی بالا ضروری نیست؛ زیرا می‌توان آن را از رابطهٔ ۶ـ۱ به‌دست آورد. همچنین در بسیاری موارد Z را هم می‌توان ذکر نکرد؛ زیرا نماد شیمیایی عنصر، نشان‌دهندهٔ مقدار Z است.

برای مثال، هستهٔ اتم آلومینیم را به‌جای $^{27}_{13}Al_{14}$ می‌توان به‌صورت $^{27}_{13}Al$ یا ^{27}Al نمایش داد.

ایزوتوپ‌ها : ویژگی‌های هسته را تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های آن تعیین می‌کند. خواص شیمیایی هر اتم را تعداد پروتون‌های هسته (عدد اتمی Z) تعیین می‌کند. به همین سبب هسته‌هایی که تعداد پروتون مساوی ولی تعداد نوترون متفاوت دارند خواص شیمیایی یکسانی دارند، در نتیجه این هسته‌ها در جدول تناوبی عناصر هم‌مکان هستند و بنابراین ایزوتوپ (هم‌مکان) نامیده می‌شوند. به طور مثال، کربن به دو صورت پایدار و با درصدهای فراوانی بسیار متفاوتی در طبیعت یافت می‌شود که یکی از ۶ پروتون و ۶ نوترون ($^{12}_{6}C$)، و دیگری از آنها از ۶ پروتون و ۷ نوترون ($^{13}_{6}C$) تشکیل شده است. این دو هسته، ایزوتوپ‌های کربن هستند. جرم‌های اتمی درج شده در جدول تناوبی عناصر، میانگین جرم‌های اتمی ایزوتوپ‌های مختلف هر عنصر است که با توجه به درصد فراوانی آنها حساب شده‌اند. به‌جز هیدروژن، ایزوتوپ‌های مختلف یک هسته را با نام همان هسته مشخص می‌کنند (جدول ۶ ــ۲).

جدول ۶ ــ۲ ایزوتوپ‌های مختلف چند عنصر و درصد فراوانی آنها در طبیعت

نام عنصر	نماد	Z	N	درصد فراوانی در طبیعت	نام عنصر	نماد	Z	N	درصد فراوانی در طبیعت
هیدروژن ۱	H	۱	۰	۹۹/۹۸۸۵	کربن ۱۳	^{13}C	۶	۷	۱/۰۷
دوتریم (هیدروژن ۲، ^{2}H)	D	۱	۱	۰/۰۱۱۵	کربن ۱۴	^{14}C	۶	۸	یافت نمی‌شود
تریتم (هیدروژن ۳، ^{3}H)	T	۱	۲	بسیار نادر	اورانیم ۲۳۵	^{235}U	۹۲	۱۴۳	۰/۷۲۰
کربن ۱۲	^{12}C	۶	۶	۹۸/۹۳	اورانیم ۲۳۸	^{238}U	۹۲	۱۴۶	۹۹/۲۸۴

تمرین ۶ـ۱

با توجه به آنچه تاکنون دیدید و همچنین با استفاده از جدول تناوبی عناصر، که در پیوست کتاب آمده است، تعداد هسته را در هر یک از موارد زیر تعیین کنید.

الف) ایزوتوپ فلوئور (F) با عدد نوترونی ۱۰ ب) ایزوتوپ قلع (Sn) با عدد نوترونی ۶۶

۱ـ در کتاب‌های تخصصی فیزیک هسته‌ای، این نماد را نماد نوکلئید (nuclide) می‌نامند.

۱۳۹

فیزیک ۳

فیزیک هسته‌ای، شاخه‌ای از فیزیک است که در آن با ساختار، برهم‌کنش‌ها و واپاشی هسته‌های اتمی سروکار داریم. بخش عمده‌ای از پیشرفت فیزیک هسته‌ای، مدیون تحلیل نتایج آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌هایی است که طی قرن گذشته توسط دانشمندانی از حوزه‌های فیزیک و شیمی انجام شده است. آنچه پیش از همه منجر به گسترش فیزیک هسته‌ای شد، به نحولاتی مربوط است که با ساخت شتاب‌دهنده‌های ذرات در سال ۱۹۳۲ میلادی آغاز شد. در این فصل پس از آشنایی مقدماتی با ساختار هسته و پرتوزایی طبیعی، با شکافت و هم‌جوشی هسته‌ای نیز آشنا می‌شوید.

شکل ۶ــ۱ مقایسهٔ ابعاد اتم و هسته به‌طور تقریبی

۶ـ۱ ساختار هسته

کشف پرتوزایی طبیعی در سال ۱۸۹۶ میلادی توسط فیزیک‌دان فرانسوی، هانری بکرل، آغازی برای پی بردن به وجود هستهٔ اتم بود. با کاوش درون اتم، در مرکز آن، هسته را می‌یابیم که تمام آن تقریباً $\frac{1}{\text{۱۸۳۶}}$ تمام اتم است (شکل ۶ــ۱).

هستهٔ اتم از نوترون‌ها و پروتون‌ها تشکیل شده است که به‌طور کلی نوکلئون نامیده می‌شوند. نوترون، در سال ۱۹۳۲ میلادی توسط فیزیک‌دان انگلیسی، جیمز چادویک، کشف شد. نوترون بار الکتریکی ندارد، و جرمش اندکی بیشتر از پروتون است (جدول ۶ــ۱). جرم اتم‌ها و همچنین اجزای تشکیل‌دهندهٔ اتم را، افزون بر یکای کیلوگرم با یکای جرم اتمی نیز بیان می‌کنند.

جدول ۶ ــ۱ برخی از ویژگی‌های فیزیکی ذرات تشکیل‌دهندهٔ اتم

ذره	بار الکتریکی (C)	جرم	
		کیلوگرم (kg)	یکای جرم اتمی (u)*
الکترون	$-۱/۶\times۱۰^{-۱۹}$	$۹/۱۰۹۳۸۹\times۱۰^{-۳۱}$	$۵/۴۸۵۸\times۱۰^{-۴}$
پروتون	$+۱/۶\times۱۰^{-۱۹}$	$۱/۶۷۲۶۲۲\times۱۰^{-۲۷}$	۱/۰۰۷۲۷۶
نوترون	۰	$۱/۶۷۴۹۲۹\times۱۰^{-۲۷}$	۱/۰۰۸۶۶۴

تعداد پروتون‌های هسته را عدد اتمی (Z) می‌نامند و در عنصرهای مختلف متفاوت است. در یک اتم خنثی، تعداد پروتون‌های هسته با تعداد الکترون‌های دور هسته برابر است. تعداد نوترون‌های هسته، عدد نوترونی (N) نامیده می‌شود. همچنین مجموع تعداد کل پروتون‌ها و نوترون‌ها را عدد جرمی (A) می‌نامند.

$$\frac{\text{تعداد نوترون‌ها و پروتون‌ها}}{\text{(عدد جرمی)}}=\frac{A}{}=\frac{\text{تعداد پروتون‌ها}}{\text{(عدد اتمی)}}+\frac{\text{تعداد نوترون‌ها}}{\text{(عدد نوترونی)}}=\frac{Z}{}+\frac{N}{} \qquad (۶ــ۱)$$

* اگر شیء ۱ دهم $\frac{1}{12}$ جرم اتم کربن ۱۲ را یکای جرم اتمی (atomic mass unit) می‌نامند و آن را با اختصار u یا amu نشان می‌دهند. بنا به این تعریف، جرم اتم کربن ۱۲، دقیقاً برابر ۱۲ u است.

هانری بکرل (۱۹۰۸ـ۱۸۵۲م.)
فیزیک‌دان فرانسوی در سال ۱۸۹۲ به‌عنوان استاد موزهٔ ملی تاریخ طبیعی پاریس انتخاب شد. وی نخستین دانشمندی است که ـ در سال ۱۸۹۶ و در حالی که مشغول بررسی خاصیت فسفرسانس نمک‌های اورانیم بود ـ پدیدهٔ پرتوزایی را کشف کرد. بکرل در سال ۱۹۰۳ به‌همراه ماری کوری و پیر کوری جایزهٔ نوبل فیزیک را به‌خاطر کشف پرتوزایی طبیعی دریافت کرد. به افتخار فعالیت‌های وی در زمینهٔ پرتوزایی، یکای SI برای فعالیت پرتوزایی، بکرل (Bq) نام‌گذاری شده است.

فصل ۶: آشنایی با فیزیک هسته‌ای

برای یک عنصر با نماد شیمیایی X، نماد هسته به‌صورت زیر نشان داده می‌شود[۱] :

$${}^{A}_{Z}X_{N}$$

(عدد جرمی: A، عدد اتمی: Z، نماد عنصر: X، عدد نوترونی: N)

مشخص کردن N در نمادنویسی بالا ضروری نیست؛ زیرا می‌توان آن را از رابطهٔ $A = Z + N$ به‌دست آورد. همچنین در بسیاری موارد Z را هم می‌توان ذکر نکرد؛ زیرا نماد شیمیایی عنصر، نشان‌دهندهٔ مقدار Z است.

برای مثال، هستهٔ اتم آلومینیم را به‌جای ${}^{27}_{13}Al_{14}$ می‌توان به‌صورت ${}^{27}_{13}Al$ یا ${}^{27}Al$ نمایش داد.

ایزوتوپ‌ها : ویژگی‌های هسته را تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های آن تعیین می‌کند. خواص شیمیایی هر اتم را تعداد پروتون‌های هسته (عدد اتمی Z) تعیین می‌کند. به همین سبب هسته‌هایی که تعداد پروتون مساوی ولی تعداد نوترون متفاوت دارند، خواص شیمیایی یکسانی دارند، در نتیجه این هسته‌ها در جدول تناوبی عناصر هم‌مکان هستند و بنابراین ایزوتوپ (هم‌مکان) نامیده می‌شوند. به طور مثال، کربن به دو صورت پایدار و با درصدهای فراوانی بسیار متفاوتی در طبیعت یافت می‌شود که یکی از ۶ پروتون و ۶ نوترون (${}^{12}_{6}C$)، و دیگری از آن‌ها از ۶ پروتون و ۷ نوترون (${}^{13}_{6}C$) تشکیل شده است. این دو هسته، ایزوتوپ‌های کربن هستند. جرم‌های اتمی درج شده در جدول تناوبی عناصر، میانگین جرم‌های اتمی ایزوتوپ‌های مختلف هر عنصر است که با توجه به درصد فراوانی آن‌ها حساب شده‌اند. به‌جز هیدروژن، ایزوتوپ‌های مختلف یک هسته را با نام همان هسته مشخص می‌کنند (جدول ۶ــ۲).

جدول ۶ــ۲ ایزوتوپ‌های مختلف چند عنصر و درصد فراوانی آن‌ها در طبیعت

نام عنصر	نماد	Z	N	درصد فراوانی در طبیعت	نام عنصر	نماد	Z	N	درصد فراوانی در طبیعت
هیدروژن ۱	H	۱	۰	۹۹/۹۸۸۵	کربن ۱۳	${}^{13}C$	۶	۷	۱/۰۷
دوتریم (هیدروژن ۲، ${}^{2}H$)	D	۱	۱	۰/۰۱۱۵	کربن ۱۴	${}^{14}C$	۶	۸	یافت نمی‌شود
تریتیم (هیدروژن ۳، ${}^{3}H$)	T	۱	۲	بسیار نادر	اورانیم ۲۳۵	${}^{235}U$	۹۲	۱۴۳	۰/۷۱۶
کربن ۱۲	${}^{12}C$	۶	۶	۹۸/۹۳	اورانیم ۲۳۸	${}^{238}U$	۹۲	۱۴۶	۹۹/۲۸۴

تمرین ۶ــ۱

با توجه به جدول تناوبی عناصر که در پیوست کتاب آمده است

الف) عدد اتمی F عبارت است از $Z = ۹$. به این ترتیب :

$A = Z + N = ۹ + ۱۰ = ۱۹$

در نتیجه نماد هسته برای فلوئور را می‌توان به یکی از صورت‌های زیر نوشت :

${}^{19}F$ ، ${}^{19}_{9}F$ ، ${}^{19}_{9}F_{10}$

ب) عدد اتمی قلع برابر $Z = ۵۰$ است. به این ترتیب :

${}^{116}Sn$ ، ${}^{116}_{50}Sn$ ، ${}^{116}_{50}Sn_{66}$

۱ــ در کتاب‌های تخصصی فیزیک هسته‌ای، این نماد را نماد نوکلئید (nuclide) می‌نامند.

۱۳۹

راهنمای معلم

پایداری هسته

در این قسمت ویژگی‌های نیروی هسته‌ای و اهمیت آن در پایداری هسته با توجه به نیروی دافعهٔ شدید بین پروتون‌های درون هسته بررسی شده است. لازم است توجه کنید که در این کتاب به تقسیم‌بندی نیروی هسته‌ای به دو نیروی هسته‌ای ضعیف و هسته‌ای قوی پرداخته نشده است بلکه صرفاً به مفهوم نیروی هسته‌ای به عنوان نیروی جاذبه که بین نوکلئون‌های مجاور یکدیگر وارد می‌شود اشاره شده است. همان‌طور که در شکل ۶ــ۲ نیز نشان داده شده است، نیروی هسته‌ای تنها بین نوکلئون‌های مجاور (یا به عبارت دیگر همسایه‌های اول) وارد می‌شود، زیرا نیروی هسته‌ای به شدت کوتاه‌برد است. دلیل نام‌گذاری نوکلئون نیز برای پروتون‌ها و نوترون‌های درون هسته به دلیل ماهیت نیروی هسته‌ای باز می‌گردد. از منظر نیروی هسته‌ای، تمامی ذرات داخل هسته که مجاور یکدیگرند نیروی هسته‌ای جاذبه‌ای به یکدیگر وارد می‌کنند و این نیرو مستقل از بار الکتریکی نوکلئون‌ها است.

توریم ($Z=۹۰$) و اورانیوم ($Z=۹۲$) که در طبیعت یافت می‌شوند سایر هسته‌های سنگین با عدد اتمی بزرگ‌تر از ۸۳ ناپایدارند. این دو عنصر، تنها عنصرهایی‌اند که وابانی آنها چنان کُند است که از هنگام تشکیل منظومهٔ شمسی در چندین میلیارد سال پیش، فقط مقدار کمی از آنها پر از وابانی، به عنصرهای سبک‌تر تبدیل شده‌اند.

پرسش ۶ــ۱

هر نقطه آبی رنگ در نمودار شکل ۶ــ۳ نشان‌دهندهٔ یک هستهٔ پایدار است. با توجه به این نمودار به پرسش‌های زیر پاسخ دهید.
الف) نسبت تعداد نوترون به تعداد پروتون (N/Z) برای هسته‌های پایدار مختلف ثابت است یا متفاوت؟ توضیح دهید.
ب) ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر را چگونه می‌توان با استفاده از این نمودار تشخیص داد؟

انرژی بستگی هسته‌ای و ترازهای انرژی هسته : برای جدا کردن نوکلون‌های یک هسته، انرژی لازم است. انرژی لازم برای این منظور، انرژی بستگی هسته‌ای نامیده می‌شود. شکل ۶ــ۴ این موضوع را به‌طور طرح‌وار نشان می‌دهد.

اندازه‌گیری‌های دقیق نشان داده است که جرم هسته از مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل‌دهنده‌اش اندکی کمتر است. اگر این اختلاف جرم را که به آن کاستی جرم هسته گفته می‌شود، مطابق رابطهٔ معروف اینشتین ($E=mc^2$)، در مربع تندی نور (c^2) ضرب کنیم انرژی بستگی هسته‌ای به‌دست می‌آید[۱]. توجه کنید که هرچند اختلاف جرم هسته با مجموع جرم نوکلون‌های تشکیل‌دهندهٔ آن بسیار ناچیز است، چون در c^2 که عدد بسیار بزرگی است ضرب می‌شود، این کاستی جرم اندک، معادل انرژی قابل ملاحظه‌ای است[۲].

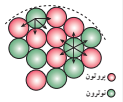
شکل ۶ــ۴ انرژی‌ای معادل انرژی بستگی هسته‌ای باید تأمین شود تا هسته به نوکلون‌های تشکیل‌دهندهٔ آن تقسیم شود.

انرژی نوکلون‌های وابسته به هسته نیز مانند انرژی الکترون‌های وابسته به اتم، کوانتیده‌اند و نوکلون‌های درون هسته نمی‌توانند هر انرژی دلخواهی را اختیار کنند. همچنین، همان‌طور که الکترون‌های اتم می‌توانند با جذب انرژی از تراز پایه به تراز برانگیخته بروند، نوکلون‌ها نیز می‌توانند با جذب انرژی به ترازهای انرژی بالاتر بروند و در نتیجه هسته برانگیخته شود. هستهٔ برانگیخته با گسیل فوتون به تراز پایه برمی‌گردد. انرژی فوتون گسیل‌شده، با اختلاف انرژی بین تراز برانگیخته و تراز پایه برابر است. هستهٔ برانگیخته را با گذاشتن ستاره روی نماد $^{A}_{Z}X$ به‌صورت $^{A}_{Z}X^{*}$ مشخص می‌کنند. نکتهٔ قابل توجه آن است که اختلاف بین ترازهای انرژی نوکلون‌ها در هسته از مرتبهٔ keV تا مرتبهٔ MeV است، در حالی که اختلاف بین ترازهای انرژی الکترون‌ها در اتم از مرتبهٔ eV است. از این رو، هسته‌ها در واکنش‌های شیمیایی برانگیخته نمی‌شوند.

۱ــ با رابطهٔ معروف اینشتین ($E=mc^2$)، در نسبی (۱) نیز آشنا شدید.
۲ــ محاسبهٔ انرژی بستگی هسته خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن باید انجام نشود.

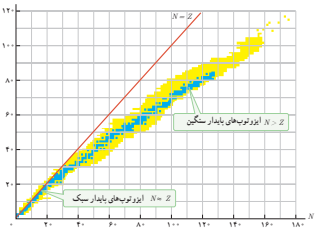
پایداری هسته : همان‌طور که در شکل ۶ــ۱ نشان داده شده اندازهٔ هسته در مقایسه با ابعاد اتم بسیار کوچک‌تر است. با وجود این، بیشتر جرم اتم (بیش از ۹۹/۹ درصد آن) در هسته متمرکز شده است. محاسبه نشان می‌دهد مرتبهٔ بزرگی چگالی هسته $10^{14}\,g/cm^3$ است که به صورتی باورنکردنی بزرگ است (برای مقایسه توجه کنید که چگالی آب $1\,g/cm^3$ است). موضوع وقتی شگفت‌انگیزتر می‌شود که به اندازهٔ نیروی الکتروستاتیکی رانشی خیلی قوی بین پروتون‌های درون هسته، که بسیار به یکدیگر نزدیک‌اند، توجه کنیم. در این صورت چه چیزی مانع از هم پاشیدن هسته می‌شود؟ با توجه به پایداری بسیاری از هسته‌هایی که در طبیعت وجود دارند روشن است که نوعی نیروی جاذبه باید اجزای هسته را کنار هم نگه دارد. از طرفی، جاذبهٔ حاصل از نیروی گرانشی بین نوکلون‌ها، چنان ضعیف است که نمی‌تواند با نیروی الکتروستاتیکی رانشی مقابله کند. این موضوع وجود نیروی جذبه‌ی بین نوکلون‌ها را مطرح کرد که به آن نیروی هسته‌ای گفته می‌شود.

نیروی هسته‌ای، کوتاه‌برد است و تنها در فاصله‌ای کوچک‌تر از ابعاد هسته اثر می‌کند (شکل ۶ــ۲). افزون بر این، نیروی هسته‌ای مستقل از بار الکتریکی است، یعنی نیروی ربایشی هسته‌ای یکسانی بین دو پروتون، دو نوترون، یا یک پروتون و یک نوترون وجود دارد. به‌همین دلیل از منظر نیروی هسته‌ای، تفاوتی بین پروتون و نوترون وجود ندارد و دلیل نام‌گذاری آنها با نام عام نوکلون نیز همین است.



شکل ۶ــ۲ قسمتی از هسته و نوکلون‌های آن که به صورت طرح‌وار نشان داده شده است. هر نوکلون، فقط به نزدیک‌ترین نوکلون‌های مجاورش نیروی هسته‌ای وارد می‌کند.

برای پایداری هسته، باید نیروی دافعهٔ الکتروستاتیکی بین پروتون‌ها با نیروی جاذبهٔ بین نوکلون‌ها، که ناشی از نیروی هسته‌ای است، موازنه شده باشند. ولی به دلیل بلندبُرد بودن نیروی الکتروستاتیکی، یک پروتون تمام پروتون‌های دیگر درون هسته را دفع می‌کند، در حالی که یک پروتون یا یک نوترون، فقط نزدیک‌ترین نوکلون‌های مجاور خود را با نیروی هسته‌ای جذب می‌کند. به همین دلیل وقتی تعداد پروتون‌های درون هسته افزایش یابد، اگر هسته بخواهد پایدار باقی بماند، باید تعداد نوترون‌های درون هسته نیز افزایش یابد. شکل ۶ــ۳ نمودار N برحسب Z را برای عنصرهای مختلف نشان می‌دهد. هستهٔ پایدار با بیشترین تعداد پروتون ($Z=83$)، متعلق به بیسموت ($^{209}_{83}Bi$) است. به جز



شکل ۶ــ۳ نمودار تغییرات Z برحسب N برای هسته‌های پایدار و پرتوزا. هر نقطهٔ آبی رنگ نشان‌دهندهٔ یک هستهٔ پایدار است. نقاط زرد رنگ هسته‌های پرتوزای شناخته شده را نشان می‌دهند.

پرسش ۶ــ۱

الف) همان‌طور که در نمودار ۶ــ۱۳ دیده می‌شود تا حدود $Z=20$، نسبت $\frac{N}{Z}$ برابر یک است ولی به تدریج و با افزایش Z، تعداد نوترون‌های درون هسته افزایش بیشتری می‌یابد به‌طوری که پس از $Z=50$ به بعد، به ازای افزایش یک پروتون، چندین نوترون به هسته اضافه می‌شود.

ب) به ازای Z معین، با شمارش تعداد دانه‌های آبی رنگ و زرد رنگ در امتداد محور N می‌توان تعداد ایزوتوپ‌های هر عضو را مشخص کرد.

با استفاده از فایل اصلی pdf کتاب درسی و بزرگ کردن نمودار می‌توان تعداد ایزوتوپ‌های هر عنصر را مشخص کرد.

همچنین می‌توان به آدرس زیر مراجعه کرد :

uplod.wikipedia.org/wikipedia/commons/8/80/Isotopes_and_half-life.svg

فصل ۶: آشنایی با فیزیک هسته‌ای

توریم ($Z=۹۰$) و اورانیوم ($Z=۹۲$) که در طبیعت یافت می‌شوند سایر هسته‌های سنگین با عدد اتمی بزرگ‌تر از ۸۳ ناپایدارند. این دو عنصر، تنها عنصرهایی‌اند که وابانی آنها چنان کُند است که از هنگام تشکیل منظومهٔ شمسی در چندین میلیارد سال پیش، فقط مقدار کمی از آنها پر از وابانی، به عنصرهای سبک‌تر تبدیل شده‌اند.

پرسش ۶ــ۱

هر نقطه آبی‌رنگ در نمودار شکل ۶ــ۳ نشان‌دهندهٔ یک هستهٔ پایدار است. با توجه به این نمودار به پرسش‌های زیر پاسخ دهید.
الف) نسبت تعداد نوترون به تعداد پروتون (N/Z) برای هسته‌های پایدار مختلف ثابت است یا متفاوت؟ توضیح دهید.
ب) ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر را چگونه می‌توان با استفاده از این نمودار تشخیص داد؟

انرژی بستگی هسته‌ای و ترازهای انرژی هسته : برای جدا کردن نوکلون‌های یک هسته، انرژی لازم است. انرژی لازم برای این منظور، انرژی بستگی هسته‌ای نامیده می‌شود. شکل ۶ــ۴ این موضوع را به‌طور طرح‌وار نشان می‌دهد.

اندازه‌گیری‌های دقیق نشان داده است که جرم هسته از مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل‌دهنده‌اش اندکی کمتر است. اگر این اختلاف جرم را که به آن کاستی جرم هسته گفته می‌شود، مطابق رابطهٔ معروف اینشتین ($E=mc^2$)، در مربع تندی نور (c^2) ضرب کنیم انرژی بستگی هسته‌ای به‌دست می‌آید[۱]. توجه کنید که هرچند اختلاف جرم هسته با مجموع جرم نوکلون‌های تشکیل‌دهندهٔ آن بسیار ناچیز است، چون در c^2 که عدد بسیار بزرگی است ضرب می‌شود، این کاستی جرم اندک، معادل انرژی قابل ملاحظه‌ای است[۲].

شکل ۶ــ۴ انرژی‌ای معادل انرژی بستگی هسته‌ای باید تأمین شود تا هسته به نوکلون‌های تشکیل‌دهندهٔ آن تقسیم شود.

انرژی نوکلون‌های وابسته به هسته نیز مانند انرژی الکترون‌های وابسته به اتم، کوانتیده‌اند و نوکلون‌های درون هسته نمی‌توانند هر انرژی دلخواهی را اختیار کنند. همچنین، همان‌طور که الکترون‌های اتم می‌توانند با جذب انرژی از تراز پایه به تراز برانگیخته بروند، نوکلون‌ها نیز می‌توانند با جذب انرژی به ترازهای انرژی بالاتر بروند و در نتیجه هسته برانگیخته شود. هستهٔ برانگیخته با گسیل فوتون به تراز پایه برمی‌گردد. انرژی فوتون گسیل‌شده، با اختلاف انرژی بین تراز برانگیخته و تراز پایه برابر است. هستهٔ برانگیخته را با گذاشتن ستاره روی نماد $^{A}_{Z}X$ به‌صورت $^{A}_{Z}X^{*}$ مشخص می‌کنند. نکتهٔ قابل توجه آن است که اختلاف بین ترازهای انرژی نوکلون‌ها در هسته از مرتبهٔ keV تا مرتبهٔ MeV است، در حالی که اختلاف بین ترازهای انرژی الکترون‌ها در اتم از مرتبهٔ eV است. از این رو، هسته‌ها در واکنش‌های شیمیایی برانگیخته نمی‌شوند.

۱ــ با رابطهٔ معروف اینشتین ($E=mc^2$)، در نسبی (۱) نیز آشنا شدید.
۲ــ محاسبهٔ انرژی بستگی هسته خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن باید انجام نشود.

۱۴۱

انرژی بستگی هسته‌ای و ترازهای انرژی هسته : ادامهٔ راهنمای معلم را در این قسمت به‌طور کیفی و براساس شکل ۶ــ۴ به بررسی انرژی بستگی بپردازید. همان‌طور که در زیرنویس کتاب درسی نیز تأکید شده است، هرگونه محاسبهٔ انرژی بستگی هسته خارج از اهداف این کتاب است و در ارزشیابی‌های رسمی نیز مورد توجه نخواهد بود.

راهنمای معلم

۶ـ۲ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر

در این قسمت نگاهی به ویژگی‌های فیزیکی ذرات گسیل شده از هسته شده است که به‌طور طبیعی از هسته‌های ناپایدار خارج می‌شود.

فصل ۶: آشنایی با فیزیک هسته‌ای

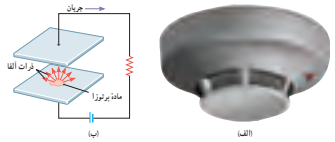
در این رابطه X هستهٔ مادر و Y هستهٔ دختر نامیده می‌شود. شکل ۶ــ۵، مثالی از واپاشی آلفا، برای اورانیم ۲۳۸ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.

شکل ۶ــ۵ در واپاشی α یک هستهٔ مادر ناپایدار، ذرهٔ α گسیل می‌کند و هستهٔ متفاوتی (هستهٔ دختر) به‌وجود می‌آید.

ذره‌های آلفا، سنگین‌اند و بار مثبت دارند. پُرد این ذره‌ها کوتاه است. این ذرات پس از طی مسافت کوتاهی در هوا (۱ تا ۲ سانتی‌متر) و یا با عبور از لایه‌ای نازک از مواد جذب می‌شوند. اگر این ذره‌ها از راه تنفس یا دستگاه گوارش وارد بدن شوند، باعث آسیب شدید به بافت‌های بدن می‌شوند. بنابراین، باید مراقب بود که مواد آلفازا هرگز وارد بدن نشوند.

فنّاوری و کاربرد: واپاشی آلفا و آشکارسازهای دود

یکی از کاربردهای گسنردهٔ واپاشی α در آشکارسازهای دود است (شکل الف). شکل ب، مدار و بخش اصلی یک آشکارساز دود را نشان می‌دهد. دو صفحهٔ کوچک و موازی فلزی در فاصلهٔ حدود یک سانتی‌متر از یکدیگر قرار داده می‌شوند. مقدار اندکی مادهٔ پرتوزا را که ذرات α گسیل می‌کند در وسط یکی از صفحه‌ها می‌گذارند. ذرات α با مولکول‌های هوای بین دو صفحه برخورد می‌کنند، مولکول‌های هوا یونیده می‌شوند و یون‌های مثبت و منفی به‌وجود می‌آیند. ولتاژ باتری باعث می‌شود یک صفحه مثبت و صفحهٔ دیگر منفی بماند، به طوری که هر صفحه یون‌های با بار مخالف را جذب می‌کند. در نتیجه در مدار متصل به صفحه‌ها جریانی به‌وجود می‌آید. وجود ذرات دود میان صفحه‌ها جریان را کاهش می‌دهد؛ زیرا یون‌هایی که به ذرات دود برخورد می‌کنند معمولاً خنثی می‌شوند. اُفت جریان که ذرات دود باعث آن می‌شود هشداردهنده‌ای را به‌کار می‌اندازد.



فیزیک ۳

عکسی تاریخی از خانواده‌ای که هما آنها نوبل گرفتند.
ماری کوری (۱۹۳۴ــ۱۸۶۷ م.)
پیر کوری (۱۹۰۶ــ۱۸۵۳ م.)
ایرن کوری (۱۹۵۶ــ۱۸۹۷ م.)

ماری کوری فیزیک‌دان و شیمی‌دان لهستانی ــ فرانسوی است که مطالعات پیشگام‌وی در زمینهٔ پرتوزایی طبیعی راه‌انداز و سایر عنصرها، دو جایزهٔ نوبل برای وی به همراه داشت: جایزهٔ نوبل فیزیک در سال ۱۹۰۳ به خاطر کشف پرتوزایی طبیعی (به طور مشترک با شوهرش پیر کوری و هانری بکرل) و جایزهٔ نوبل شیمی در سال ۱۹۱۱ به خاطر جدا کردن رادیم خالص. وی پژوهشگاه رادیم را در دانشگاه پاریس تأسیس کرد و در آنجا به پژوهش در زمینهٔ کاربردهای پزشکی مواد پرتوزا پرداخت. دخترش ایرن، جایزهٔ نوبل شیمی سال ۱۹۳۵ را به خاطر کشف پرتوزایی مصنوعی، یک سال پس از درگذشت مادرش دریافت کرد.

۶ـ۲ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر

همان‌طور که در مقدمهٔ فصل نیز اشاره کردیم کشف پرتوزایی طبیعی توسط هانری بکرل، آغازی برای پی بردن به وجود هستهٔ اتم بود. وقتی یک هستهٔ ناپایدار یا پرتوزا به‌طور طبیعی (یا اصطلاحاً خودبه‌خود) واپاشی می‌کند، نوع معیّنی از ذرات یا فوتون‌های پر انرژی آزاد می‌شوند. این فرایند واپاشی، پرتوزایی طبیعی نامیده می‌شود.

در پرتوزایی طبیعی سه نوع پرتو ایجاد می‌شود: پرتوهای آلفا (α)، پرتوهای بتا (β) و پرتوهای گاما (γ). پرتوهای α کمترین نفوذ را دارند و با ورقهٔ نازک سربی یا ضخامت تاچیز (≈۰/۰۱mm) متوقف می‌شوند، در حالی که پرتوهای β مسافت خیلی بیشتری را (≈۰/۱mm) در سرب نفوذ می‌کنند. پرتوهای γ بیشترین نفوذ را دارند و می‌توانند از ورقه‌ای سربی به ضخامت قابل ملاحظه‌ای (≈۱۰۰mm) بگذرند. در تمام فرایندهای واپاشی پرتوزا مشاهده شده است که تعداد توکلئون‌ها در طی فرایند واپاشی هسته‌ای پایسته است؛ یعنی تعداد توکلئون‌ها، پیش از فرایند با تعداد توکلئون‌ها پس از فرایند مساوی است.

پرسش ۶ــ۴

شکل روبه‌رو طرح آزمایش ساده‌ای را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان سه نوع پرتوزایی طبیعی را مشاهده کرد و به تفاوت بار و جرم پرتوها از یکدیگر پی برد. قطعه‌ای از مادهٔ پرتوزا را در ته حفرهٔ باریکی در یک استوانهٔ سربی قرار می‌دهند. استوانه را درون اتاقکی می‌گذارند و هوای درون آن را تخلیه می‌کنند. سپس یک صفحهٔ عکاسی مقابل حفره قرار می‌دهند و میدان مغناطیسی یکنواختی درون اتاقک برقرار می‌کنند. خطوط قرمزرنگ، مسیر حرکت پرتوها را نشان می‌دهد. نوع بار پرتوها را با هم مقایسه کنید.

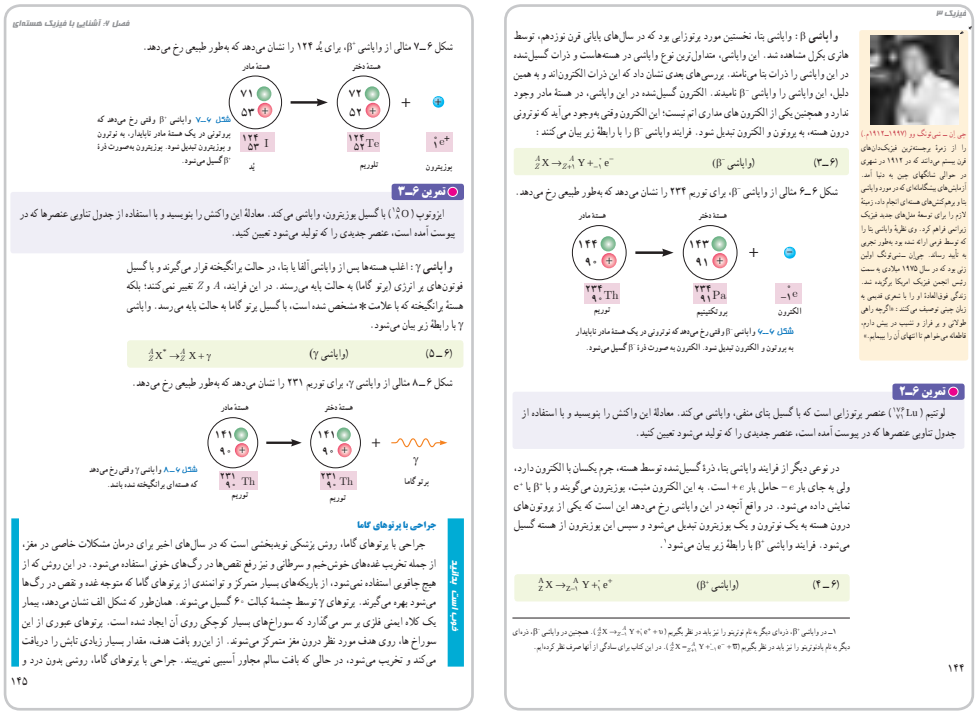
واپاشی α : در این نوع واپاشی که در هسته‌های سنگین صورت می‌گیرد، هستهٔ $^{A}_{Z}X$ با گسیل ذرهٔ آلفا واپاشد. شواهد تجربی نشان می‌دهند که پرتوهای α، ذرات باردار مثبت از جنس هستهٔ اتم هلیم ($^{4}_{2}He$) هستند و از دو پروتون و دو نوترون تشکیل شده‌اند. واپاشی α با رابطهٔ زیر بیان می‌شود :

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}Y + ^{4}_{2}He \qquad \text{(واپاشی } \alpha) \qquad (۶ــ۲)$$

پرسش ۶ــ۲

در تصویر داده شده مربوط به این پرسش در کتاب رشته ریاضی (چاپ ۱۳۹۷) لازم است میزان $\vec{B}$ به‌صورت برونسو در نظر گرفته شود. این تصویر کتاب رشته تجربی درست است.

با توجه به حضور میزان $\vec{B}$ مسیر بدون انحراف از جنس تابش گاما است و مسیر با انحراف کمتر مربوط به ذرات آلفا و مسیر با انحراف بیشتر مربوط به ذرات بتا منفی است.



فیزیک ۳

جی. ای. ـ تی. تاوک وود (۱۹۹۲ـ۱۹۱۲ م.) را از زمرهٔ برجسته‌ترین فیزیک‌دان‌های قرن بیستم می‌دانند که در ۱۹۱۲ در شهری در حوالی شانگهای چین به دنیا آمد. آزمایش‌های پیشگامانه‌ای که در مورد واپاشی بتا و برهم‌کنش‌های هسته‌ای انجام داد، زمینهٔ لازم را برای توسعهٔ مدل‌های جدید فیزیک زوجی فراهم کرد. وی نظریهٔ واپاشی بتا را که توسط فرمی ارائه شده بود به‌طور تجربی به تأیید رساند. چین ـ سی‌تاوک اولین زنی بود که در سال ۱۹۷۵ میلادی به سمت رئیس انجمن فیزیک امریکا برگزیده شد. زندگی توان‌افزا او را با شعری قدیمی به زبان چینی توصیف می‌کنند: «اگرچه راهی طولانی و پر فراز و نشیب در پیش دارم، قاطعانه می‌خواهم تا انتهای آن را بپیمایم.»

واپاشی β : واپاشی بتا، نخستین مورد پرتوزایی بود که در سال‌های پایانی قرن نوزدهم، توسط هانری بکرل مشاهده شد. این واپاشی، متداول‌ترین نوع واپاشی در هسته‌هاست و ذرات گسیل‌شده در این واپاشی را ذرات بتا می‌نامند. بررسی‌های بعدی نشان داد که این ذرات الکترون‌اند و به همین دلیل، این واپاشی را واپاشی β^- نامیدند. الکترون گسیل‌شده در این واپاشی، در هستهٔ مادر وجود ندارد و همچنین یکی از الکترون‌های مداری اتم نیست؛ این الکترون وقتی به‌وجود می‌آید که نوترونی درون هسته، به پروتون و الکترون تبدیل شود. فرایند واپاشی β^- را با رابطهٔ زیر بیان می‌کنند :

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e^{-} \qquad (\beta^- \text{ واپاشی}) \qquad (۶ـ۳)$$

شکل ۶ـ۶ مثالی از واپاشی β^-، برای توریم ۲۳۴ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.

شکل ۶ـ۷ واپاشی β^- و فقی رخ می‌دهد که نوترونی در هستهٔ مادر ناپایدار، به پروتون و الکترون تبدیل شود. الکترون به‌صورت ذرهٔ β^- گسیل می‌شود.

تمرین ۶ـ۴

لوتتیم ($^{176}_{71}Lu$) عنصر پرتوزایی است که با گسیل بتای منفی، واپاشی می‌کند. معادلهٔ این واکنش را بنویسید و با استفاده از جدول تناوبی عنصرها که در پیوست آمده است، عنصر جدیدی را که تولید می‌شود تعیین کنید.

در نوعی دیگر از فرایند واپاشی بتا، ذرهٔ گسیل‌شده توسط هسته، جرم یکسان با الکترون دارد، ولی به جای بار $-e$، حامل بار $+e$ است. به این الکترون مثبت، پوزیترون می‌گویند و با β^+ یا e^+ نمایش داده می‌شود. در واقع آنچه در این واپاشی رخ می‌دهد این است که یکی از پروتون‌های درون هسته به یک نوترون و یک پوزیترون تبدیل می‌شود و سپس این پوزیترون از هسته گسیل می‌شود. فرایند واپاشی β^+ با رابطهٔ زیر بیان می‌شود[۱].

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e^{+} \qquad (\beta^+ \text{ واپاشی}) \qquad (۶ـ۴)$$

۱ـ در واپاشی β^-، ذرهای دیگر به نام نوترینو را نیز باید در نظر بگیریم ($^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e^{-} + \bar{\nu}$). همچنین در واپاشی β^+، ذرهای دیگر به نام پادنوترینو را نیز باید در نظر بگیریم ($^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e^{+} + \nu$). در این کتاب برای سادگی از آنها صرف نظر کرده‌ایم.

۱۴۴

شکل ۶ـ۷ مثالی از واپاشی β^-، برای $^{124}_{53}I$ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.

شکل ۶ـ۷ واپاشی β^- و فقی رخ می‌دهد که نوترونی در هستهٔ مادر ناپایدار، به نوترون و پوزیترون تبدیل شود. پوزیترون به‌صورت ذرهٔ β^- گسیل می‌شود.

تمرین ۶ـ۳

ایزوتوپ ($^{19}_{8}O$) با گسیل پوزیترون، واپاشی می‌کند. معادلهٔ این واکنش را بنویسید و با استفاده از جدول تناوبی عنصرها که در پیوست آمده است، عنصر جدیدی را که تولید می‌شود تعیین کنید.

واپاشی γ : اغلب هسته‌ها پس از واپاشی آلفا یا بتا، در حالت برانگیخته قرار می‌گیرند و با گسیل فوتون‌های پر انرژی (پرتو گاما) به حالت پایه می‌رسند. در این فرایند، A و Z تغییر نمی‌کنند؛ بلکه هستهٔ برانگیخته که با علامت $*$ مشخص شده است، با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسد. واپاشی γ با رابطهٔ زیر بیان می‌شود.

$$^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma \qquad (\text{واپاشی } \gamma) \qquad (۶ـ۵)$$

شکل ۶ـ۸ مثالی از واپاشی γ، برای توریم ۲۳۱ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.

شکل ۶ـ۸ واپاشی γ و فقی رخ می‌دهد که هسته‌ای برانگیخته تنها باشد.

جراحی با پرتوهای گاما

جراحی با پرتوهای گاما، روش پزشکی نوپدیدی است که در سال‌های اخیر برای درمان مشکلات خاصی در مغز، از جمله تخریب غده‌های خوش‌خیم و سرطانی و نیز رفع نقص‌ها در رگ‌های خونی استفاده می‌شود. در این روش که از هیچ جاقوی استفاده نمی‌شود، از باریکه‌های بسیار متمرکز و توانمندی از پرتوهای گاما که متوجه غده و نقص در رگ‌ها می‌شود بهره می‌گیرند. پرتوهای γ توسط جمجمهٔ کبالت ۶۰ گسیل می‌شوند. همان‌طور که شکل الف نشان می‌دهد، بیمار یک کلاه ایمنی فلزی بر سر می‌گذارد که سوراخ‌های بسیار کوچکی روی آن ایجاد شده است. پرتوهای عبوری از این سوراخ‌ها، روی هدف مورد نظر درون مغز متمرکز می‌شوند. از این‌رو بافت هدف، مقدار بسیار زیادی تابش را دریافت می‌کند و تخریب می‌شود، در حالی که بافت سالم مجاور آسیبی نمی‌بیند. جراحی با پرتوهای گاما، روشی بدون درد و

تمرین ۶ــ۲

$$^{176}_{71}Lu \rightarrow {}^{176}_{72}Ha + {}^{0}_{-1}e^{-}$$

لوتسیم $_{71}Lu$، دارای یک ایزوتوپ پایدار $^{175}_{71}Lu$ با درصد فراوانی ۹۷/۴۱ درصد است. همچنین دارای سه ایزوتوپ ناپایدار که در این میان $^{176}_{71}Lu$، با درصد فراوانی ۲/۵۹۹ درصد، دارای نیمه عمر $۳/۷۸ \times ۱۰^{۱۰}$ سال است.

تمرین ۶ــ۳

$$^{15}_{8}O \rightarrow {}^{15}_{7}N + {}^{0}_{1}e^{+}$$

اکسیژن دارای سه ایزوتوپ پایدار ^{16}O، ^{17}O و ^{18}O است که ^{16}O با ۹۹/۷۶ درصد بیشترین فراوانی را دارد.

مثال ۶ــ۱

در حادثهٔ انفجار نیروگاه هسته‌ای چرنوبیل، یُد ۱۳۱ ($^{131}_{53}I$)، یکی از ایزوتوپ‌های بود که وارد محیط‌زیست شد. این ایزوتوپ، فرار است و همراه با جریان‌های جوّی، تا کشورهای دوردست از محل نیروگاه حرکت کرد و با نشستن روی برگ گیاهان، سبب آلودگی گوشت و شیر دام‌هایی شد که این گیاهان را می‌خوردند. نیمه‌عمر این ایزوتوپ یزوتوپ تقریباً ۸ روز است. پس از گذشت ۴۰ روز از حادثهٔ چرنوبیل، چه کسری از هسته‌های مادر اولیه در محیط‌زیست باقی مانده بود؟

پاسخ : نیمه‌عمر ایزوتوپ یُد ۱۳۱ برابر ۸ روز است و ۴۰ روز را معادل ۵ نیمه‌عمر $^{131}_{53}I$ در نظر می‌گیریم. اگر N_0 تعداد هسته‌های مادر اولیه باشد، پس از گذشت ۴۰ روز جدول زیر را می‌توان تنظیم کرد.

تعداد نیمه‌عمرهای سپری‌شده	۰	۱	۲	۳	۴	۵
هسته‌های مادر باقی‌مانده	N_0	$\frac{1}{2}\times N_0=\frac{N_0}{2}$	$\frac{1}{2}\times\frac{N_0}{2}=\frac{N_0}{4}$	$\frac{1}{2}\times\frac{N_0}{4}=\frac{N_0}{8}$	$\frac{1}{2}\times\frac{N_0}{8}=\frac{N_0}{16}$	$\frac{1}{2}\times\frac{N_0}{16}=\frac{N_0}{32}$

بنابراین، پس از گذشت ۴۰ روز از حادثهٔ چرنوبیل، تنها $\frac{1}{32}$ از هسته‌های مادر اولیه در محیط‌زیست باقی ماندند.

اگر تعداد هسته‌های مادر اولیه در یک نمونهٔ پرتوزا N_0 باشد، پس از گذشت زمان t، تعداد هسته‌های پرتوزای باقی مانده از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$N = N_0\left(\frac{1}{2}\right)^{n} \qquad \text{(تعداد هسته‌های پرتوزای باقی‌مانده)} \quad (۶\text{ــ}۶)$$

که در آن n از رابطهٔ $\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$ به‌دست می‌آید[۱].

تمرین ۶ــ۲

پس از گذشت ۹ روز، تعداد هسته‌های پرتوزای یک نمونه، به $\frac{1}{8}$ تعداد موجود در آغاز کاهش یافته است. نیمه‌عمر (برحسب روز) ماده چقدر است؟

کاربرد فیزیک

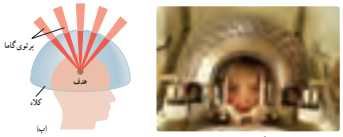
گاز رادون پرتوزا در خانه‌ها

رادون ($^{222}_{86}Rn$)، گازی پرتوزاست که به‌طور طبیعی به‌وجود می‌آید و محصول واپاشی رادیم ($^{226}_{88}Ra$) است. رادون درون خاک به شکل گاز است و می‌تواند از محل هایی مانند شکاف‌های روی دیوارها و کف ساختمان، حفره‌های دور لوله‌ها، منبع آب یا لوله‌های آب وارد خانه‌ها شود (فقط سیز رنگ روی شکل). اینکه میزان جمع شدن رادون درون خانه بتواند به‌طور چشمگیری بالا رود، به نوع احداث ساختمان و غلظت رادون در خاک اطراف ساختمان بستگی دارد. گاز رادون با نیمه‌عمر ۳/۸۳ روز، به هسته‌های دختری که آنها نیز پرتوزا هستند واپاشی می‌کند. این هسته‌های پرتوزا، می‌توانند به ذرات غبار و دود بچسبند و با تنفس وارد ریه‌ها شوند و پس از واپاشی، به بافت‌های بدن آسیب بزنند. اگر شخصی برای مدتی طولانی در معرض گاز رادون باشد، ممکن است به سرطان ریه مبتلا شود. از آنجا که میزان تجمع گاز رادون را می‌توان با دستگاه‌هایی اندازه‌گیری کرد توصیه می‌شود که خانه‌ها برای سنجش رادون مورد آزمایش قرار گیرند.

۱ــ در این کتاب صرفاً حل مسئله‌هایی مورد نظر است که در آنها « عددی صحیح باشد و سایر حالت‌های دیگر نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

کاربرد فیزیک در پزشکی

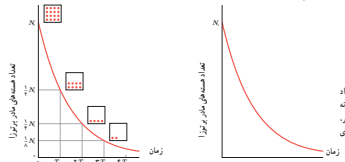
خوشبختانه بیشتر سرطان‌ها به‌خوبی به پرتوهای یونساز پاسخ می‌دهند و با استفاده از پرتوهای یونساز می‌توان بسیاری از سرطان‌ها را درمان کرد. مدت زمان بستری شدن در بیمارستان، خیلی کوتاه‌تر از جراحی به روش معمول است و بیمار پس از چند روز، به روال زندگی عادی خود باز می‌گردد.



(الف) در جراحی با پرتو گاما، کلاه ایمنی فلزی‌ای که سوراخ‌های کوچکی دارد روی سر بیمار قرار داده می‌شود. (ب) پرتوهای گاما پس از عبور از این سوراخ‌ها، روی هدف تعیین‌شده در مغز، متمرکز می‌شوند.

نیمه‌عمر : ایزوتوپ‌های پرتوزا با گذشت زمان واپاشیده می‌شوند. برای یک نمونه از یک مادهٔ پرتوزا، بر اساس داده‌های تجربی می‌توان بیان کرد که در پایان زمان معیّنی، چه کسری از مادهٔ پرتوزا واپاشیده. برای مثال در مورد هسته‌های توریم ۹۰ پس از زمان معیّنی می‌توان گفت که چه کسری از آنها به رادیم ۸۸ تبدیل شده است.

برای بررسی بیشتر این موضوع، یک نمونهٔ پرتوزا را در نظر بگیرید. فرض کنید در لحظهٔ $t = 0$ تعداد هسته‌های مادر پرتوزای موجود در این نمونه، برابر N_0 باشد. اگر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های مادر موجود در نمونه را برحسب زمان رسم کنیم نمودار شکل ۶ــ۹ الف به‌دست می آید. همان‌طور که روی نمودار نیز دیده می‌شود، پس از گذشت زمان کافی، تعداد هسته‌های مادر موجود در نمونه، به صفر میل می‌کند. برای درک بهتر این نمودار، کمیتی به نام نیمه‌عمر را معرفی می‌کنیم و آن را با نماد $T_{\frac{1}{2}}$ نشان می‌دهیم. بنا به تعریف، نیمه‌عمر، مدت زمانی است که طول می‌کشد تا تعداد هسته‌های مادر موجود در یک نمونه، به نصف برسند (شکل ۶ــ۹ ب). برخی از ایزوتوپ‌ها مانند اورانیم ۲۳۸، دارای نیمه‌عمری در حدود سن زمین (۴/۵ میلیارد سال) هستند. این عناصر منشأ پرتوزایی طبیعی در محیط پیرامون ما هستند.



شکل ۶ــ۹ الف) با گذشت زمان، تعداد هسته‌های مادر پرتوزا در یک نمونه کاهش می‌یابد. ب) با گذشت هر نیمه‌عمر، نیمی از هسته‌های مادر پرتوزای باقی‌مانده واپاشی می‌کنند.

رونالد یلو (۱۹۲۱ــ۲۰۱۱ م.)
فیزیک‌دان آمریکایی. وی از دریافت دستگاری فیزیک هسته‌ای، در زمینهٔ کاربرد ایزوتوپ‌های پرتوزا در پزشکی تحقیق کرد. وی روش ایمنی‌سنجی تابشی را ابداع کرد، که در آن از ردیاب‌های پرتوزا برای اندازه‌گیری مقادیر کم مواد در خون یا سایر نمونه‌ها استفاده می‌شود. اهمیت این روش را اعطای جایزهٔ نوبل پزشکی در سال ۱۹۷۷ به وی مشخص نمد.

تمرین ۶ــ۴

با استفاده از رابطهٔ ۶ــ۶ داریم :

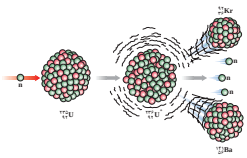
$$n = \frac{1}{8} \text{ و روز } t = 9$$

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{t}{n} = \frac{9}{\frac{1}{8}} = 72 \text{ روز}$$

۶ــ۳ شکافت هسته‌ای

در سال ۱۹۳۹ میلادی گروهی از دانشمندان آلمانی، کشف کردند که هستهٔ اورانیم ۲۳۵ ($^{235}_{92}U$) پس از جذب نوترون، به دو تکه تقسیم می‌شود و هر تکه، جرم کمتری از هستهٔ اولیه دارد. فرایند تقسیم شدن یک هستهٔ سنگین به دو هسته با جرم کمتر، شکافت هسته‌ای نامیده می‌شود. در فرایند شکافت اورانیم، ترکیب‌های متفاوتی از هسته‌های کوچک‌تر همراه با تعدادی نوترون (بین ۲ تا ۵) به‌وجود می‌آید[۱]. شکل ۶ــ۱۰، یکی از این واکنش‌های ممکن شکافت را نشان می‌دهد که در آن هستهٔ اورانیم $^{235}_{92}U$ پس از جذب نوترون و تبدیل به ایزوتوپ ناپایدار $^{236}_{92}U^{*}$، به هسته‌های باریم $^{141}_{56}Ba$ و کریپتون $^{92}_{36}Kr$ تقسیم شده است. واکنش وقتی شروع می‌شود که نوترونی گُند (با انرژی جنبشی در حدود ۰/۰۴eV) توسط هستهٔ $^{235}_{92}U$ جذب و هستهٔ مرکب $^{236}_{92}U^{*}$ ایجاد شود. این هستهٔ مرکب در کمتر از 10^{-12}s و مطابق واکنش زیر واپاشیده می‌شود :

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow \underbrace{{}^{236}_{92}U^{*}}_{\text{هستهٔ مرکب (ناپایدار)}} \rightarrow \underbrace{{}^{141}_{56}Ba}_{\text{باریم}} + \underbrace{{}^{92}_{36}Kr}_{\text{کریپتون}} + \underbrace{3\,{}^{1}_{0}n}_{\text{سه نوترون}}$$



شکل ۶ــ۱۰ واکنش شکافت $^{235}_{92}U$ با جذب یک نوترون گُند شروع می‌شود.

وقتی نوترونی با هستهٔ اورانیم ۲۳۵ برخورد کند و جذب شود، هستهٔ اورانیم شروع به ارتعاش می‌کند و تغییر شکل می‌دهد. ارتعاش تا وقتی ادامه می‌یابد که تغییر شکل چنان جدی شود که نیروی جاذبهٔ هسته‌ای دیگر نتواند با نیروی دافعهٔ الکتروستاتیکی بین پروتون‌های هسته متوازن شود. در این هنگام، هسته به پاره‌هایی واپاشیده می‌شود که حامل انرژی (به‌طور عمده انرژی جنبشی) هستند.

واکنش زنجیری : همان‌طور که دیدیم فرایند شکافت $^{235}_{92}U$ با جذب یک نوترون گُند آغاز می‌شود. اگر محصولات شکافت، باریم $^{141}_{56}Ba$ و کریپتون $^{92}_{36}Kr$ باشند، در این فرایند ۳ نوترون به‌وجود می‌آید. چون نوترون‌ها بار الکتریکی ندارند، هسته‌های دیگر آنها را دفع نمی‌کنند. نوترون‌ها پس از گُند شدن، توسط هسته‌های دیگر جذب می‌شوند و باعث شکافت در ۳ هستهٔ اورانیم دیگر می‌شوند و ۹ نوترون آزاد می‌کنند. اگر هر یک از این نوترون‌ها نیز موفق به شکافت یک هستهٔ اورانیم شود، ۲۷ نوترون آزاد می‌شود و به همین ترتیب تا آخر. این رشته واکنش را، واکنش زنجیری می‌نامند (شکل ۶ــ۱۱).

۱ــ به‌طور میانگین ۲/۷ نوترون در هر واکنش شکافت آزاد می‌شود.

لیز مایتنر (۱۹۶۸ــ۱۸۷۸ م.)، فیزیک‌دان آلمانی به واسطهٔ تحقیقات در خصوص پرتوزایی معرفی است و عنصر پرتوزای پروتکتینیم را کشف کرد. مهمترین کار وی، توصیف نتایج بمباران اورانیم توسط نوترون‌ها بود که منجر به فرایند شکافت هسته‌ای شد. مایتنر نخستین دانشمندی بود که نام شکافت را برای این فرایند پیشنهاد کرد.

اتو هان (۱۹۶۸ــ۱۸۷۹ م.)، فیزیک‌دان آلمانی به خاطر فعالیت‌هایش در زمینهٔ شکافت هسته‌ای، جایزهٔ نوبل شیمی را در سال ۱۹۴۴ دریافت کرد. وی پس از جنگ جهانی دوم تا سال ۱۹۶۰ ریاست مؤسسهٔ ماکس پلانک را به عهده داشت که یکی از معتبرترین مراکز پژوهشی در پیشبرد علوم است.

غنی‌سازی اورانیم : همان‌طور که اشاره کردیم، واکنش زنجیری در سنگ معدن اورانیم رخ نمی‌دهد. برای استفاده از اورانیم به‌عنوان سوخت در نیروگاه‌های هسته‌ای یا استفاده در انفجارهای هسته‌ای، باید فراوانی ایزوتوپ ۲۳۵ را در یک نمونهٔ اورانیم، افزایش دهیم. به فرایند افزایش درصد یا غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در یک نمونه، **غنی‌سازی** گفته می‌شود. بیشتر راکتورهای تجاری تولید برق، مانند راکتور نیروگاه هسته‌ای بوشهر، از اورانیمی استفاده می‌کنند که در آنها ایزوتوپ $^{235}_{92}U$ تا ۳درصد غنی‌سازی شده است. همچنین در بیشتر راکتورهای پژوهشی، مانند راکتور پژوهشی دانشگاه تهران، از سوختی استفاده می‌شود که ایزوتوپ $^{235}_{92}U$ تا ۲۰درصد غنی‌سازی شده است.

شیوه‌های مرسوم غنی‌سازی اورانیم

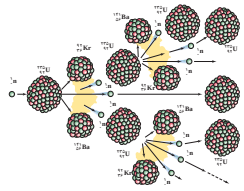
جداسازی ایزوتوپ کمیاب $^{235}_{92}U$ از ایزوتوپ فراوان $^{238}_{92}U$ بسیار دشوار است؛ زیرا هر دو ایزوتوپ به لحاظ شیمیایی یکسان‌اند و نمی‌توان از واکنش‌های شیمیایی برای جداسازی آنها استفاده کرد. جداسازی این دو ایزوتوپ بر اساس اختلاف جرم آنها صورت می‌گیرد. یکی از روش‌های انجام این کار، استفاده از فرایند پخش است. در این روش، اورانیم در ترکیب با فلوئور به‌صورت گاز هگزافلوراید اورانیم (UF_6) درمی‌آید؛ در این گاز، تندی متوسط ایزوتوپ $^{235}_{92}U$ کمی بیشتر از ایزوتوپ سنگین‌تر $^{238}_{92}U$ است. به‌همین دلیل ایزوتوپ ۲۳۵ از غشاهای نازکی که در این روش جداسازی به کار می‌رود، راحت‌تر می‌گذرد. پدیدهٔ پخش پس از طی هزاران مرحله، سرانجام منجر به تولید اورانیم با غنای مناسب می‌شود. غنی‌سازی اورانیم با استفاده از روش سانتریفوژ گازی، نیز رایج است. در این روش، گاز هگزافلوراید اورانیم در یک استوانهٔ چرخان فوق سریع (معمولاً ۵۰ هزار دور در دقیقه) به حرکت درمی‌آید. مولکول‌های گاز که حاوی $^{238}_{92}U$ هستند، سنگین‌تر شده و به خارج رانده می‌شوند و مولکول‌های سبک‌تر حاوی $^{235}_{92}U$، از مرکز دستگاه استخراج می‌شوند.

ازیکو فرمی (۱۹۵۴-۱۹۰۱ م.)
فیزیک‌دان ایتالیایی-آمریکایی در بیشتر حوزه‌های فیزیک جدید، هم به لحاظ نظری و هم در حوزه فعالیت‌های آزمایشگاهی و تجربی سهم بسزایی داشت. وی در سال ۱۹۳۰ نظریه‌ای برای واپاشی بتازا پیشنهاد کرد که هنوز به کار می‌رود. فرمی نخستین دانشمندی بود که تبدیل عناصر را بر اثر بمباران نوترونی نشان داد و برای این کار جایزهٔ نوبل فیزیک سال ۱۹۳۸ را دریافت کرد. وی همچنین روند ساخت اولین راکتور هسته‌ای را در دانشگاه شیکاگو هدایت کرد.

راکتورهای شکافت هسته‌ای : نوترون‌های آزادشده در فرایند شکافت ایزوتوپ $^{235}_{92}U$، انرژی جنبشی زیادی دارند (به‌طور متوسط حدود ۲MeV) و به نوترون‌های تُند معروف‌اند. این نوترون‌ها، با احتمال بسیار بیشتری جذب ایزوتوپ $^{238}_{92}U$ می‌شوند. تجربه نشان می‌دهد اگر بتوان نوترون‌های تند را به نحوی کُند ساخت که انرژی جنبشی آنها به حدود ۰/۰۴eV یا کمتر از آن برسد، احتمال جذب آنها توسط ایزوتوپ‌های $^{235}_{92}U$ افزایش می‌یابد. این افزایش احتمال می‌تواند برای ایجاد واکنش زنجیری شکافت، کافی باشد. آب معمولی (H_2O)، آب سنگین (D_2O) و گرافیت (اتم‌های کربن) از جمله موادی هستند که به‌عنوان **کُندساز**[1] نوترون‌ها در واکنش‌های شکافت هسته‌ای استفاده می‌شوند.

راکتور هسته‌ای، جایی است که در آن واکنش زنجیری شکافت به‌شکل کنترل شده رخ می‌دهد. اولین راکتور هسته‌ای به‌منظور شکافت $^{235}_{92}U$، در سال ۱۹۴۲ میلادی توسط انریکو فرمی و همکارانش در دانشگاه شیکاگو ساخته شد. امروزه راکتورهایی با انواع و اندازه‌های مختلف ساخته شده‌اند که بیشتر به منظور تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های هسته‌ای به‌کار می‌روند (شکل ۶ـ۱۳ الف).

۱ـ Moderator



شکل ۶ـ۱۱ مدل ساده‌ای از واکنش زنجیری. یک نوترون وارد هستهٔ اورانیم ۲۳۵ می‌شود و فرایند شکافت رخ می‌دهد. برای سادگی، بجز باریم و کریپتون، محصولات دیگر شکافت را در این شکل نشان نداده‌ایم.

در واکنش‌های شکافت هسته‌ای، جرم محصولات شکافت، کمتر از جرم هستهٔ مرکّب است. این اختلاف جرم بنا به رابطهٔ $E=mc^2$، سبب آزاد شدن انرژی گرمایی زیادی می‌شود.

انرژی‌ای که توسط محصولات شکافت حمل می‌شود عمدتاً به شکل انرژی جنبشی است. در هر واکنش شکافت حدود ۲۰۰MeV انرژی آزاد می‌شود. این انرژی، 10^8 برابر انرژی آزادشده به‌ازای هر مولکول در یک واکنش شیمیایی معمولی، نظیر سوختن بنزین یا زغال سنگ است. حتی در انفجار تری نیترو تولوئن (TNT)، انرژی آزادشده به ازای هر مولکول، در حدود ۳۰eV است.

شکل ۶ـ۱۲ الف، تصویری از ورودی مجتمع معدنی اورانیم ساغند (واقع در حوالی شهر اردکان یزد) را نشان می‌دهد. ممکن است این پرسش مطرح شود که چرا واکنش زنجیری به طور طبیعی در این معدن و دیگر معدن‌های اورانیم رخ نمی‌دهد؟ پاسخ این است که در سنگ معدن اورانیم، دو ایزوتوپ ۲۳۵ و ۲۳۸ وجود دارد، به‌طوری که فراوانی ایزوتوپ ۲۳۵ حدود ۰/۷۲ درصد است. به عبارت دیگر از هر ۱۴۰ اتم اورانیم موجود در سنگ معدن اورانیم، تنها یکی از آنها ایزوتوپ ۲۳۵ و مابقی ایزوتوپ ۲۳۸ است (شکل ۶ـ۱۲ ب). اگرچه $^{235}_{92}U$ فراوان‌ترین ایزوتوپ اورانیم است، احتمال اینکه نوترونی را گیر بیندازد و شکافته شود، بسیار کم است و در نتیجه واکنش زنجیری را ناممکن می‌سازد.

شکل ۶ـ۱۲ الف) معدن اورانیم ساغند با پیشترین ظرفیت تولید در ایران در حوالی شهر اردکان یزد واقع است. ب) در سنگ معدن اورانیم از هر ۱۴۰ اتم اورانیم، تنها یکی ایزوتوپ ۲۳۵ است.

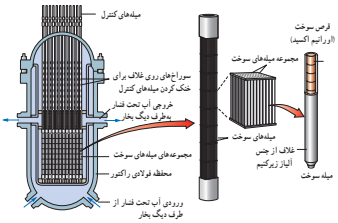
فریتز اشتراسمن (۱۹۸۰-۱۹۰۲ م.)، فیزیک‌دان آلمانی یکی از دستیاران اتوهان در پروژهٔ شکافت اورانیم در سال ۱۹۳۸ بود. وی توانست پاره‌های حاصل از شکافت را که توسط نوترون‌های تُند بمباران شده بودند شناسایی کند. اشتراسمن برای سال‌ها پس از جنگ جهانی دوم، مدیر بخش شیمی مؤسسهٔ ماکس پلانک بود.

اتو فریش (۱۹۷۹-۱۹۰۴ م.)، فیزیک‌دان اتریشی تبار گروهی در لوس آلاموس بود که در سال ۱۹۳۹ میلادی بخار دافع جرم، لازم برای ساختن بمب اتمی را به‌دست آورد، به‌طوری که این جرم بحرانی، قادر باشد فرایند شکافت را به‌طور زنجیری ادامه دهد.

(توجه کنید که اصطلاح حالت بحرانی در اینجا، به معنی حالت خطرناک نیست). در این حالت، راکتور با توان خروجی ثابت کار می‌کند. وقتی راکتور زیر بحرانی باشد به‌طور میانگین، نوترون‌های آزادشده از هر شکافت، کمتر از یک شکافت بعدی را انجام می‌دهند. در راکتور زیر بحرانی، واکنش زنجیری خودنگهدار نیست و سرانجام خاموش می‌شود.

وقتی به طور میانگین، نوترون‌های هر شکافت بیشتر از یک شکافت بعدی را انجام دهند، راکتور فرابحرانی است. در حالت فرابحرانی، توان خروجی راکتور افزایش می‌یابد و اگر کنترل نشود، می‌تواند به ذوب شدن بخشی یا تمام قلب راکتور منجر شود که با پخش مواد پرتوزای خطرناک به محیط‌زیست همراه باشد.

واضح است که برای نگه‌داشتن راکتور در حالت بحرانی، سازوکاری برای کنترل آن لازم است. این عمل با تعدادی میله‌های کنترل (مواد جذب‌کنندهٔ نوترون که ترکیبی از عناصری مانند بور، ایندیم، کادمیم و نقره هستند) صورت می‌گیرد که می‌توانند به داخل یا خارج قلب راکتور حرکت داده شوند.



شکل ۶ـ۱۴ دوتریم و تریتیم در هم گداخته می‌شوند تا هستهٔ هلیم تشکیل شود. در این واکنش، مقدار زیادی انرژی (حدود ۱۷/۶MeV) آزاد می‌شود که بخش عمده‌ای از آن به‌صورت انرژی جنبشی نوترون است.

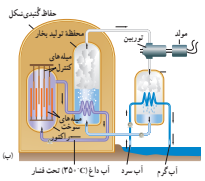
۶ـ۴ گداخت (همجوشی) هسته‌ای

یک نوع دیگر واکنش هسته‌ای که منشأ تولید انرژی در ستارگان و از جمله خورشید است، گداخت یا همجوشی هسته‌ای نام دارد. در فرایند گداخت هسته‌ای، دو هستهٔ سبک با یکدیگر ترکیب می‌شوند و هستهٔ سنگین‌تری به‌وجود می‌آورند. برای مثال، واکنش گداخت زیر را در نظر بگیرید :

$$D + T \rightarrow {}^{4}He + {}^{1}n$$

در این واکنش با همجوشی هسته‌های دو ایزوتوپ هیدروژن یعنی دوتریم و تریتیم، هستهٔ هلیم و یک نوترون پرانرژی تولید می‌شود (شکل ۶ـ۱۴). در واکنش گداخت، مجموع جرم محصولات فرایند، کمتر از مجموع جرم هسته‌های اولیه است. در اینجا نیز این اختلاف جرم با توجه به رابطهٔ $E=mc^2$، سبب آزاد شدن مقدار زیادی انرژی می‌شود.

راکتورهای هسته‌ای افزون بر سوخت هسته‌ای و مادهٔ کُندساز (که پیش از این شرح داده شد) دارای، میله‌های کنترل و شاره‌ای (معمولاً آب) هستند که گرما را به خارج راکتور انتقال می‌دهد (شکل ۶ـ۱۳ ب).



(الف)

شکل ۶ـ۱۳ الف) نیروگاه ۱۰۰۰ مگاواتی شکافت هسته‌ای بوشهر. راکتور آب تحت فشار (PWR)، این نیروگاه، در زیر قسمت گنبدی‌شکل قرار دارد. ب) طرح‌واره‌ای از یک راکتور PWR و قسمت‌های اصلی یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

سوخت هسته‌ای (معمولاً با حدود ۳درصد ایزوتوپ $^{235}_{92}U$) به‌صورت میله‌هایی با قطر حدود ۱cm است و هزاران عدد از این میله‌ها در قلب راکتور قرار دارد.

با وارد کردن میله‌های کنترل به داخل راکتور، آهنگ واکنش شکافت، یعنی تعداد نوترون‌های موجود برای به‌وجود آوردن شکافت، تنظیم می‌شود. میله‌های کنترل معمولاً از مواد جذب‌کنندهٔ نوترون، مانند کادمیم یا بور، ساخته می‌شوند. در نوعی از راکتورها، که به راکتورهای آب تحت فشار (PWR)[1] معروف‌اند، آبی که سوخت هسته‌ای را احاطه کرده است، تحت فشار زیاد (حدود ۱۵۰ اتمسفر) قرار دارد تا بدون آنکه بجوشد به دماهای بالا برسد. این آب داغ، به سامانهٔ بستهٔ دیگری که محتوی آب با فشار کمتر است، پمپ می‌شود تا این آب را گرم کند. گرمای انتقال‌یافته به سامانهٔ دوم، سبب تولید بخار می‌شود که توربین و مولد الکتریسیته را به کار می‌اندازد.

کنترل واکنش زنجیری در راکتور شکافت

شکل صفحهٔ بعد طرحی با جزئیات بیشتر از قلب یک راکتور را نشان می‌دهد. وقتی نوترون پر انرژی عنصر سوخت را ترک می‌کند، وارد آب تحت فشار پیرامون می‌شود. تندی این نوترون توسط کندساز (مثلاً آب معمولی)، در کمتر از یک میلی‌ثانیه کاهش می‌یابد و نوترون کُندشده می‌تواند با ورود مجدد به عنصر سوخت، سبب شکافت دیگری شود. برای آنکه توان خروجی راکتور ثابت بماند، باید تنها یکی از نوترون‌های آزادشده در هر شکافت، سبب شکافت بعدی شود. وقتی به‌طور میانگین هر شکافت به شکافت دیگری منجر شود، گفته می‌شود که راکتور در حالت عادی یا اصطلاحاً در حالت بحرانی است

۱ـ Pressurized _ Water Reactor

$^{-}\mu$ و $^{+}\mu$ نشان می‌دهند. میون‌ها ذراتی بنیادی و دارای طول‌عمری از مرتبهٔ میکروثانیه هستند[1].

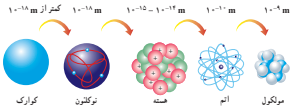
طبقه‌بندی ذرات : تمامی ذرات زیر اتمی را در سه خانوادهٔ حامل‌های نیرو، لپتون‌ها و هادرون‌ها می‌توان طبقه‌بندی کرد.

■ خانوادهٔ حامل‌های نیرو از ذراتی تشکیل شده‌اند که نقشی اساسی در برهم‌کنش‌ها بازی می‌کنند. برای مثال، فوتون که یکی از ذرات عضو این خانواده است عامل برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی است.

■ خانوادهٔ لپتون‌ها شامل ذراتی هستند که تمامی آنها بنیادی‌اند. الکترون، پوزیترون، نوترینوها و میون‌ها از جملهٔ ذرات عضو خانوادهٔ لپتون‌ها هستند.

■ خانوادهٔ هادرون‌ها، شامل ذراتی غیر بنیادی هستند که از ذرات ریزتری به نام کوارک‌ها ساخته شده‌اند. پروتون، نوترون و پیون‌ها[2] از جملهٔ ذرات خانوادهٔ هادرون‌ها به‌شمار می‌روند.

کوارک‌ها : همان‌طور که اشاره کردیم ذرات خانوادهٔ هادرون‌ها، مانند پروتون و نوترون بنیادی نیستند. برای توضیح این موضوع، در سال ۱۹۶۴ دو فیزیک‌دان آمریکایی به نام‌های موری گلمن و جورج تسوایگ به طور مستقل، مدلی را پیشنهاد کردند که مطابق آن، هادرون‌ها از ترکیب ذرات بنیادی به نام کوارک‌ها تشکیل شده‌اند. در این مدل، سه نوع کوارک و سه پادکوارک متناظر با آنها پیشنهاد شده است. به این ترتیب، می‌توان گفت ذرات بنیادی یا همان پُی سازه‌های ماده، کوارک‌ها و لپتون‌ها هستند و همهٔ عالم از آنها ساخته شده است. شکل زیر طرحی ساده از چگونگی تشکیل ماده از واحدهای اصلی را نشان می‌دهد.



کوارک‌ها، نوکلئون‌ها را می‌سازند. نوکلئون‌ها (که عضو خانوادهٔ هادرون‌ها هستند) هسته را می‌سازند. اتم‌ها از هسته و الکترون (عضو خانوادهٔ لپتون‌ها) ساخته می‌شوند. اتم‌ها، مولکول‌ها را می‌سازند و عالم ماده، از آنها ساخته می‌شود.

موری گلمن (۱۹۲۹) فیزیک‌دان امریکایی، درحالی‌که فقط ۲۲ سال داشت دکترایش را در سال ۱۹۵۱ از دانشگاه MIT گرفت و دورهٔ پسادکترای خود را در دانشگاه پرینستون گذراند. وی از سال ۱۹۵۵ تا زمان بازنشستگی خود در سال ۱۹۹۳، استاد دانشگاه کلتک[3] بود. مجموعه کارهای گلمن در دهه‌های ۵۰ تا ۷۰ میلادی به تحولات مطمئنی در فیزیک ذرات بنیادی انجامید، چنان که برخی از وی به نام پدر فیزیک ذرات بنیادی یاد می‌کنند. موری گلمن و جورج تسوایگ (۱۹۲۷) هر کدام به‌طور جداگانه مدلی برای ذرات سازندهٔ هادرون‌ها پیشنهاد کردند ولی گلمن بود که این ذرات بنیادی را کوارک نامید.
گلمن در سال ۱۹۶۹ برای سهم مهمی که در کشف و دسته‌بندی ذرات بنیادی و برهم‌کنش‌های آنها داشت برندهٔ جایزهٔ نوبل فیزیک شد.

۱ـ در یک روش برای تولید میون، باریکه پرانرژی پروتون (ویژگی‌ها از MeV ۵۰۰ به هدف بلندی از جنس کربن برخورد می‌کند و یک نوترون و یک π^{+} تولید می‌شود. پس از ۲۶ns، π^{+} به $^{+}\mu$ تبدیل می‌شود.

۲ـ پیون‌ها در سال ۱۹۴۷ کشف شدند و به سه صورت مثبت، منفی و خنثی وجود دارند که به‌ترتیب با π^{-} ، π^{+} و π^{0} نشان داده می‌شوند. جرم هر سه پیون با یکدیگر برابر است. پیون‌های π^{+} و π^{-} پادذرهٔ یکدیگرند و دارای طول عمری از مرتبهٔ 10^{-8} ثانیه هستند.

۳ـ California Institute of Technology

از آنجا که در واکنش‌های گداخت، مقدار بسیار زیادی انرژی آزاد می‌شود، ساخت راکتورهای گداخت مورد توجه زیادی است (شکل ۶ـ۱۵)؛ اگرچه تاکنون نوع تجاری آن ساخته نشده است. مشکلات در ساخت راکتور گداخت به این علت بیش می‌آید که دو هستهٔ کم‌جرم باید به‌قدر کافی به‌هم نزدیک شوند تا نیروی کوتاه‌بُرد هسته‌ای بتواند آنها را کنار هم نگه دارد و واکنش گداخت انجام شود. ولی، هر هسته، بار مثبت دارد و هستهٔ دیگر را دفع می‌کند، برای آنکه هسته‌ها با وجود این نیروی رانشی بسیار قوی، بتوانند به هم گداخته شوند، باید دما بسیار بالا باشد تا هسته‌ها با انرژی جنبشی زیادی به یکدیگر برخورد کنند. به همین دلیل، برای انجام این واکنش باید مقدار زیادی انرژی صرف کرد. به‌طور مثال، برای شروع واکنش دوتریم ـ ترتیم، به دمایی حدود ده‌ها میلیون درجهٔ سلسیوس نیاز است. دمایی از این مرتبه در ستارگان و خورشید وجود دارد. مثلاً خورشید، که در آن از گداخت هسته‌های هیدروژن انرژی آزاد می شود، دمای درونی آن فراتر از ۲۰ میلیون درجهٔ سلسیوس برآورد شده است. در نتیجه واکنش گداخت هسته‌ای، در مرکز خورشید و ستارگان که دما و فشار بسیار بالاست صورت می‌گیرد.

شکل ۶ـ۱۵ طرحی از راکتور آزمایشی گرما هسته‌ای بین‌المللی (ITER)[1]. ساخت این راکتور با مشارکت چندین کشور جهان، از سال ۲۰۰۷ در فرانسه شروع شده است و پیش‌بینی می‌شود بتای آن در سال ۲۰۲۱ به اتمام برسد. قرار است این راکتور از سال ۲۰۳۵ با توان خروجی ۵۰۰ مگاوات شروع به کار کند.

آشنایی مختصر با ذرات بنیادی

تا سال ۱۹۳۲ سه ذرهٔ سازندهٔ اتم‌ها شامل الکترون، پروتون، و نوترون کشف شده بودند و به‌عنوان سه ذرهٔ بنیادی تصور می‌شدند؛ ولی شواهد تجربی به‌دست آمده پس از آن، نشان داد که نه تنها پروتون و نوترون ذرات بنیادی نیستند؛ بلکه صدها ذرهٔ زیر اتمی دیگر نیز وجود دارد. به‌طور کلی ذرات زیر اتمی شناخته‌شده در عالم، یا مانند الکترون، پوزیترون، نوترینوها و میون‌ها بنیادی‌اند، یا مانند پروتون، نوترون و پیون‌ها غیر بنیادی‌اند و از ذرات بنیادی‌ای به نام کوارک‌ها ساخته شده‌اند.
در شتاب‌دهنده‌ها بیشتر ذرات زیر اتمی را با برخورد پروتون‌ها یا نوترون‌های پر انرژی با یک هستهٔ هدف به‌وجود می‌آورند.
در ادامه به معرفی چند ذرهٔ بنیادی پرداخته و به طبقه‌بندی ذرات زیر اتمی نیز اشاره می‌شود.

پوزیترون : در سال ۱۹۳۲ ذره‌ای با همان جرم الکترون، ولی با بار مخالف (+e) توسط کارل اندرسون، فیزیک‌دان آمریکایی، کشف شد و جایزهٔ نوبل فیزیک ۱۹۳۶ را برای وی به همراه داشت. این الکترون مثبت، پوزیترون نامیده شد[2] که پادذرهٔ الکترون است! پوزیترون پایدار است و خودبه‌خود و بایاشیده نمی‌شود.

نوترینوها : در وایاشی β با این ذره آشنا شدید که در سال ۱۹۳۰ میلادی توسط ولفگانگ پائولی معرفی شد و به‌طور تجربی در سال ۱۹۵۶ مورد تأیید قرار گرفت. نوترینوها (شامل سه ذره و سه پادذره) ذراتی بنیادی، بدون بار و دارای جرم بسیار اندکی هستند. همچنین آشکارسازی آنها بسیار دشوار است، زیرا با ماده برهم‌کنش بسیار ضعیفی دارند. برای مثال، در هر ثانیه از مرتبهٔ هزار میلیارد نوترینو از بدن ما می‌گذرد و اثر نشناخته شده‌ای بر ما ندارد!

میون‌ها : در سال ۱۹۳۷ دو فیزیک‌دان آمریکایی، ذرات باردار جدیدی را کشف کردند که جرم آنها کمی بیش از ۲۰۰ برابر جرم الکترون و اندازهٔ بار آنها برابر بار الکترون بود. این دو ذره را که جرمی بکسان، ولی بار مخالف دارند میون می‌نامند و با نمادهای

۱ـ International Thermonuclear Experimental Reactor

۲ـ نام پوزیترون (positron)، صورت کوتاه‌شدهٔ الکترون مثبت (positive electron) است.

پرسش‌ها و تمرین‌های پیشنهادی فصل ۶

۱ فراوان‌ترین ایزوتوپ اورانیوم $^{238}_{92}U$ است. عددهای ۲۳۸ و ۹۲ نشان‌دهندهٔ چه چیزهایی هستند؟ در هر اتم این ایزوتوپ، چند پروتون و چند نوترون و چند الکترون وجود دارد؟

۲ عدد اتمی نقره ۴۷ و عدد نوکلئونی آن ۱۰۷ و اتم خنثی است.

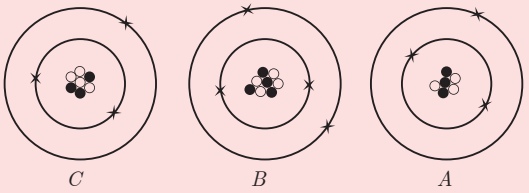
الف) اتم نقره دارای چند پروتون و نوترون است؟ پروتون‌ها و نوترون‌ها در کجا قرار دارند؟

ب) آیا در اتم ذره دیگری وجود دارد؟ تعداد این ذره‌ها چقدر است؟

پ) چرا اتم خنثی است؟

ت) نقرهٔ ۱۰۸، ایزوتوپ دیگری از نقره است. به‌طور کامل توضیح دهید واژهٔ ایزوتوپ به چه معنایی است.

۳ در شکل رو به رو سه اتم دیده می‌شود.



الف) دو تا از این اتم‌ها از یک عنصرند،

۱ کدام‌یک با دو تای دیگر متفاوت است؟

۲ دلیلی برای پاسخ خود بیاورید.

ب) دو تا از این اتم‌ها ایزوتوپ‌های یک عنصرند،

۱ این دو کدام‌اند؟

۲ پاسخ خود را توضیح دهید.

پ) کدام‌یک از ذره‌هایی که با ○، ● و × نشان داده شده‌اند

۱ بار مثبت دارند؟

۲ بار ندارند؟

۳ جرمشان از همه کمتر است؟

ت) با همین نمادها نمودار ذرهٔ α را رسم کنید.

۴ کدام تابش از مادهٔ پرتوزا

الف) بار مثبت دارد؟

ب) بیشترین قدرت نفوذ را دارد؟

پ) در میدان مغناطیسی به راحتی منحرف می‌شود؟

ت) از موج الکترومغناطیسی تشکیل شده است؟

ث) باعث شدیدترین یونش می‌شود؟

ج) در هوا کوچک‌ترین برد را دارد؟

چ) بار منفی دارد؟

ح) در میدان الکتریکی منحرف نمی‌شود؟

۵ جدول زیر را کامل کنید.

ذره یا پرتو	جرم	بار
پروتون	یک واحد	+ یک واحد
نوترون	.....	.....
الکترون	.....	.....
ذرهٔ آلفا	.....	.....
ذرهٔ بتا	.....	.....
پرتو گاما	.....	.....

الف) واکنش‌های زیر را که نشان‌دهندهٔ واپاشی پرتوزا هستند کامل کنید.

۱ $^{۲۱۴}_{۸۴}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{?}_{?}\alpha + {}^{?}_{?}\mathrm{Pb}$

۲ $^{۲۱۰}_{۸۳}\mathrm{Bi} \rightarrow {}^{?}_{?}\beta + {}^{?}_{?}\mathrm{Po}$

ب) با توجه به دو واکنش بالا توضیح دهید در واپاشی‌های

۱ آلفازا

۲ بتازا

چه تغییری در هسته رخ می‌دهد؟

۶ گسیل پرتوی گاما چه اثری بر هسته می‌گذارد؟

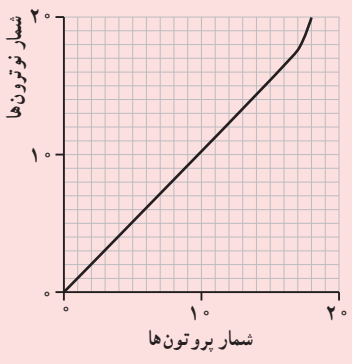
۷ به دقت توضیح دهید چگونه چشمهٔ پرتوزایی که تنها ذرهٔ آلفا گسیل می‌کند می‌تواند بار منفی الکتروسکوپ را تخلیه کند.

۸ در رآکتوری یک قطعه مس $^{۶۳}_{۲۹}\mathrm{Cu}$ با نوترون بمباران می‌شود و با جذب نوترون به یک ایزوتوپ پرتوزا تبدیل می‌شود.

الف) رابطه‌ای برای نشان دادن جذب نوترون به‌وسیلهٔ هستهٔ مس بنویسید.

ب) هستهٔ حاصل ناپایدار است. انتظار دارید در این هسته چه نوع واپاشی صورت بگیرد؟ با رابطه نشان دهید.

۹ در نمودار روبه‌رو شمار نوترون‌ها و پروتون‌های هسته داده شده است. اتم فسفر ۳۲ دارای ۱۷ نوترون است :



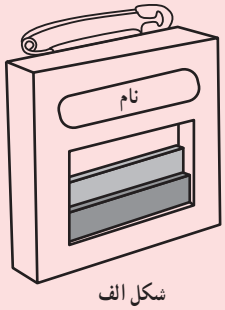
الف) شمار پروتون‌های هستهٔ آن چند است؟

ب) روی نمودار با علامت × جای فسفر ۳۲ را مشخص کنید.

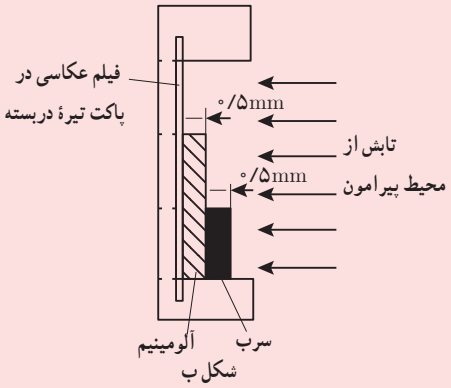
پ) از روی نمودار چگونه تشخیص می‌دهید که فسفر ۳۲ پرتوزا است؟

ت) با محاسبهٔ نسبت $\frac{N}{Z}$ نشان دهید که فسفر ۳۲ با واپاشی β^- به یک ایزوتوپ پایدار تبدیل می‌شود.

۱۰ کارکنان ایستگاه‌های تولید انرژی هسته‌ای دزسنج مخصوصی به سینه می‌زنند که نشان می‌دهد آیا مقدار تابش هسته‌ای که به بدن آنها رسیده در حد خطرناک است یا نه (شکل الف). در این دزسنج یک قطعه فیلم عکاسی در یک پاکت که نور به آن وارد نمی‌شود وجود دارد. هر چند هفته یک‌بار این فیلم را از پاکت بیرون می‌آورند و ظاهر می‌کنند. بخش‌هایی از فیلم که تابش به آنها رسیده است تیره رنگ می‌شود. شکل ب ساختار این دزسنج را نشان می‌دهد :



شکل الف



شکل ب

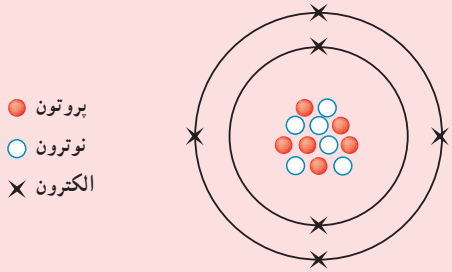
الف) چرا نباید دزسنج را در جیب گذاشت؟

ب) اگر مقدار زیادی پرتو α به دزسنج برسد، فیلم آن چه تغییری می‌کند؟

پ) از روی فیلم چگونه می‌فهمیم که شخص پرتو α دریافت نکرده است؟

ت) چرا فیلم را در پاکتی می‌گذارند که نور به آن وارد نمی‌شود؟

۱۱ الف) شکل زیر اتم کربن ۱۲ ($_{6}^{12}C$) را نشان می‌دهد. جدول زیر را کامل کنید.



شکل ۴ــ۱۲

ذره	تعداد آن در اتم
پروتون	.....
نوترون	.....
الکترون	.....

ب) کربن ۱۴ ($_{6}^{14}C$) پرتوزاست. چه تفاوتی میان کربن ۱۲ و کربن ۱۴ وجود دارد؟

پ) کربن ۱۴ با گسیل ذرهٔ بتا واپاشی می‌کند.

۱ــ بتا از کدام بخش اتم گسیل می‌شود؟

۲ــ کدام گزینه دربارهٔ ذرهٔ بتا درست است؟

الف) پروتون سریع ب) نوترون سریع پ) الکترون سریع

۱۲ بخش نخست از زنجیرهٔ واپاشی ایزوتوپ $^{۲۳۸}_{۹۲}U$ به‌صورت زیر است :

$$^{۲۳۸}_{۹۲}U \rightarrow ^{۲۳۴}_{۹۰}Th \rightarrow ^{۲۳۴}_{۹۱}Pa \rightarrow ^{۲۳۴}_{۹۲}U \rightarrow ^{۲۳}Th \rightarrow ^{۲۲۶}_{۸۸}Ra$$

در این پنج مرحله چه ذره‌هایی گسیل می‌شوند؟

۱۳ مغز انسان می تواند دچار یک نوع تومور مغزی به نام گلیوبلاستوم شود. این نوع تومور در مغز پخش می‌شود و نمی‌توان آن را با جراحی درمان کرد. به‌جای آن جراحانِ مغز و اعصاب به بیمار محلولی تزریق می کنند که حاوی عنصر بور است. گلیوبلاستوم بور را جذب می‌کند. سپس مغز بیمار را با ذره‌های نوترون بمباران می‌کنند. واکنش زیر انجام می‌شود :

$$^{۱۰}_{۵}B + ^{۱}_{۰}n \rightarrow ^{۷}_{۳}Li + ^{x}_{y}He$$

الف) در واکنش بالا x و y را مشخص کنید.

ب) هسته بور به لیتیم و هلیم تجزیه می‌شود. این فرایند چه نام دارد؟ توضیح دهید چرا هسته‌های هلیم و لیتیم به سرعت از هم دور می‌شوند.

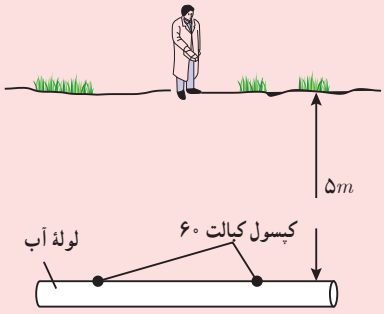
پ) توضیح دهید چگونه این فرایند موجب نابودی گلیوبلاستوم می‌شود.

ت) چرا این فرایند برای افراد سالم خطرناک است؟

۱۴ نیمه‌عمر سیزیم ۱۴۰ در محیطی که تابش زمینهٔ آن بالاست اندازه‌گیری می‌شود. نتایج در جدول زیر نشان داده شده است. با رسم نمودار مناسب نیمه‌عمر سیزیم را حساب کنید.

زمان (s)	آهنگ شمارش (زمان / واپاشی)
۰	۶۸
۳۰	۵۲
۶۰	۴۰
۹۰	۳۲
۱۲۰	۲۴
۱۵۰	۲۰
۱۸۰	۱۶
۲۴۰	۱۲
۲۷۰	۸
۳۰۰	۱۰

۱۵ در شهری لوله‌های آب در اعماق زمین قرار دارند. شرکت آب چشمه‌های پرتوزایی را در مسیر لوله‌ها قرار داده است تا در هنگام شکسته شدن لوله‌ها در آینده بتواند زمین را حفر و آنها را تعمیر کند (شکل رو به رو).



کپسول کبالت ۶۰ چشمه‌هایی پرتوزا هستند که به لوله‌ها چسبانیده شده‌اند و پرتوهای گاما گسیل می‌کنند. لوله‌های در عمق ۵ متری قرار دارند.

الف) توضیح دهید چرا چشمه‌های گسیل کنندهٔ پرتوهای آلفا و بتا برای ردیابی این نوع لوله‌کشی‌ها مناسب نیستند.

ب) پرتوهای گاما بخشی از طیف الکترومغناطیسی هستند.

۱ دو بخش از طیف الکترومغناطیسی را که می‌توانند برای درمان بیماری سرطان به‌کار روند نام ببرید.

۲ دو بخش از طیف الکترومغناطیسی را که می‌توانند در ارتباطات به‌کار روند نام ببرید.

۳ دو بخش از طیف الکترومغناطیسی را که می‌توانند برای تولید گرما به‌کار روند نام ببرید.

پ) مراقبت‌های لازمی را که هنگام کار گذاشتن لوله‌ها باید کارگران رعایت کنند نام ببرید.

۱۶ در نیروگاه‌های هسته‌ای از شکافت هسته برای تولید برق استفاده می‌شود،

الف) منظور از شکاف هسته‌ای چیست؟

ب) در شکاف هسته‌ای چه نوع انرژی‌ای آزاد می‌شود؟

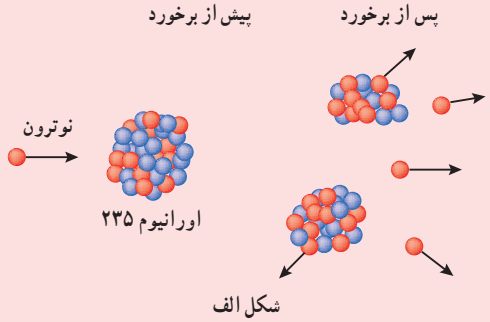
پ) دو مزیت و دو اشکال استفاده از نیروگاه هسته‌ای را بنویسید.

ت) واژه‌های ژنراتور، مبدل گرمایی، رآکتور و بخار را در جای درست خود در چند جملهٔ زیر به‌کار ببرید :

در نیروگاه هسته‌ای، شکافت هسته‌ای در ..... صورت می‌گیرد. انرژی به‌وسیلهٔ خنک‌کننده از سوخت هسته‌ای گرفته می‌شود و به ..... منتقل می‌شود که در آنجا برای تولید ..... به‌کار می‌رود و توربین‌ها را به‌کار می‌اندازد. توربین‌ها .....ها را می‌چرخانند و برق تولید می‌کنند.

۱۷ در یک ایستگاه تولید برق هسته‌ای، از انرژی آزاد شده در فرایند شکافت هسته برای تولید برق استفاده می‌شود.

الف) شکافت اورانیوم ۲۳۵ در شکل الف نشان داده شده است.

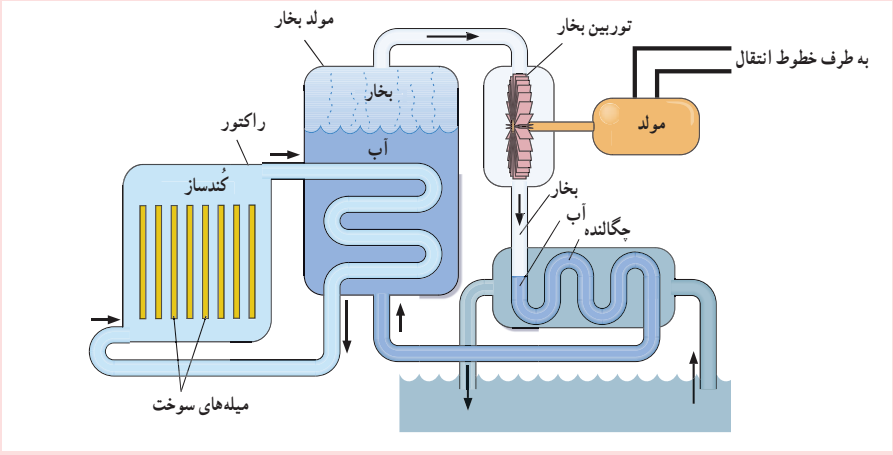


شکل الف

۱ فرایندی را که در این نمودار نشان داده شده است شرح دهید.

۲ در شکافت اورانیوم ۲۳۵ انرژی از هسته آزاد می‌شود. این انرژی کجا می‌رود؟

ب) در شکل ب اجزای اصلی ایستگاه برق هسته‌ای دیده می‌شود. توضیح دهید چگونه سوخت آن برای تولید انرژی به‌کار می‌رود.



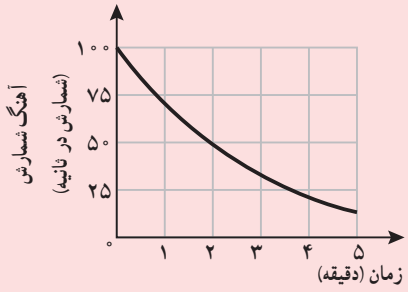
شکل ب

۱۸ الف) حدود نیروی رانش میان دو پروتون را که در فاصلهٔ $۱۰^{-۱۴}$ متری یکدیگر واقع‌اند برآورد کنید. ($\varepsilon_۰ = ۸/۸۵ \times ۱۰^{-۱۲} C^۲/Nm^۲$)

ب) با توجه به نتیجهٔ بخش الف، کار نیروی هسته‌ای را در جدا کردن دو ذرهٔ هسته‌ای تخمین بزنید.

۱۹ ایزوتوپ پرتوزای $^{۲۳۲}_{۹۰}Th$ در چهار واپاشی پی‌درپی دو ذرهٔ آلفا و دو ذرهٔ بتا گسیل می‌کند. اگر هستهٔ دختر به‌صورت $^{A}_{Z}X$ باشد، اندازه‌های A و Z را مشخص کنید. آیا $^{۲۳۲}_{۹۰}Th$ و $^{A}_{Z}X$ ایزوتوپ‌اند؟ چرا؟

۲۰ نمودار واپاشی یک اتم به‌صورت شکل زیر است. نیمه‌عمر آن چقدر است؟



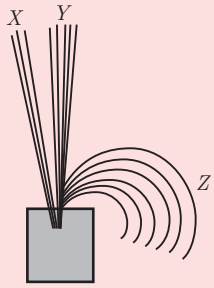
شکل ۴ــ۲۰

۲۱ واپاشی پرتوزای ایزوتوپ کوتاه‌عمر توریم با رابطهٔ $^{۲۲۵}_{۹۰}Th \rightarrow ^{A}_{Z}Ra + \alpha$ مشخص می‌شود. نیمه‌عمر آن ۸/۰ دقیقه است.

الف) A و Z چه کمیتی را نشان می‌دهند؟

ب) مقدار آنها چقدر است؟

۲۲ الف) تفاوت بار، جرم و سرعت پرتوهای آلفا، بتا و گاما را بنویسید.



ب) در نخستین سال‌های سدهٔ بیستم مادام کوری نموداری مانند شکل روبه‌رو کشید و مسیر حرکت سه پرتو را در هوا در میدان مغناطیسی یکنواخت نشان داد. اندازه‌ها در این شکل مطابق مقیاس نیستند.

۱ جنس پرتوهای Y ، X و Z را مشخص کنید.

۲ جهت میدان مغناطیسی را تعیین کنید.

۲۳ خورشید با آهنگ $۴\times۱۰^{۲۶}\,W$ انرژی تولید می‌کند.

الف) با استفاده از رابطهٔ $E=mc^۲$ تعیین کنید خورشید در هر ثانیه چقدر از جرم خود را از دست می‌دهد.

ب) اگر خورشید با همین آهنگ تولید انرژی مدت $۱۰^{۱۰}$ سال دوام بیاورد، چقدر جرم از دست می‌دهد؟

پ) این مقدار جرم چند درصد جرم کنونی خورشید است؟

۲۴ توان تولیدی متوسط یک نیروگاه برق هسته‌ای در شبکهٔ سراسری $۱۵۰\,MW$ است. اگر در این نیروگاه در هر ساعت ۰/۳ کیلوگرم سوخت اورانیوم ۲۳۵ مصرف شود :

الف) نیروگاه در هر ساعت چند ژول انرژی دریافت می‌کند؟

ب) اگر از هر کیلوگرم سوخت اورانیوم $۵/۴\times۱۰^{۱۲}\,J$ به‌دست آید، بازده نیروگاه چند درصد است؟

۲۵ در لایه‌های بالایی جو زمین بر اثر برخورد نوترون با نیتروژن $^{۱۴}_{۷}N$ ، کربن پرتوزا به‌وجود می‌آید و داریم

$$^{۱۴}_{۷}N + {}^{۱}_{۰}n \rightarrow {}^{۱۴}_{۶}C + X$$

الف) ۱ در واکنش بالا عددهای اتمی و جرمی X را تعیین کنید.

۲ X را شناسایی کنید.

ب) جرم کربن ـ۱۴ تولید شده در مدت یک سال بر اثر این واکنش ۷/۵ کیلوگرم است. نشان دهید که شمار اتم‌های کربن ـ۱۴ تولیدشده در هر سال تقریباً $۳/۰\times۱۰^{۲۶}$ است.

نیمه‌عمر کربن ـ۱۴ را $۵/۷\times۱۰^{۳}$ سال و عدد آووگادرو را $۶/۰\times۱۰^{۲۳}$ بگیرید.

۲۶ منظور از «نیمه‌عمر یک مادهٔ پرتوزا ۲ دقیقه است» چیست؟ پس از ۸ دقیقه چه مقدار ماده برجای می‌ماند؟

۲۷ با توجه به جدول، نمودار آهنگ شمارش برحسب زمان را رسم کنید و به کمک آن نیم‌عمر ماده را به‌دست آورید.

شمارش در ثانیه	زمان (دقیقه)
۱۰۰	۰
۵۹	۱
۳۴	۲
۲۰	۳
۱۲	۴
۷	۵

۲۷ معادلهٔ زیر واکنش هسته‌ای برخوردِ یک نوترون کُند با هستهٔ $^{235}_{92}U$ را نشان می‌دهد.

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{146}_{57}La + ^{87}_{35}Br + 3\,^{1}_{0}X$$

الف) ۱ این فرایند چه نام دارد؟

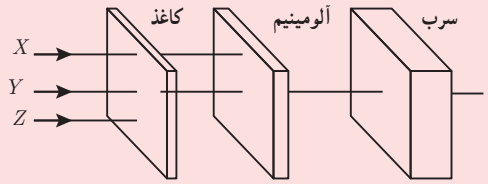
۲ X نمایش چه چیزی است؟

۳ تفاوت این واکنش هسته‌ای را با واکنشی که در خورشید روی می‌دهد بنویسید.

ب) معمولاً واکنش بالا برای تولید انرژی الکتریکی به روش هسته‌ای انجام می‌شود. نام یک مشکل زیست‌محیطی را که همراه با این نوع تولید الکتریسیته به‌وجود می‌آید بنویسید.

پ) کاهش جرم در یک واکنش هسته‌ای از نوع بالا $3/4\times10^{-28}kg$ و تندی نور $3\times10^{8}m/s$ است. مقدار انرژی این واکنش را حساب کنید.

۲۹ در شکل زیر جنس پرتوهای X ، Y و Z را مشخص کنید.

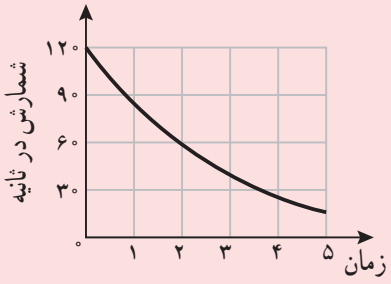


شکل ۴ــ۲۴

	A	B	C	D	E
X	آلفا	بتا	گاما	گاما	بتا
Y	بتا	آلفا	آلفا	بتا	گاما
Z	گاما	گاما	بتا	آلفا	آلفا

الف) A ب) B پ) C ت) D ث) E

۳۰ نیمه‌عمر مادهٔ پرتوزایی که نمودار واپاشی آن مطابق شکل زیر است. چقدر است؟



الف) ۱ دقیقه ب) ۲ دقیقه پ) ۳ دقیقه ت) ۴ دقیقه ث) ۵ دقیقه

۳۱ کدام گزینه نادرست است؟

الف) اتم از یک هستهٔ کوچک درست شده است که الکترون‌ها پیرامون آن را فرا گرفته‌اند.

ب) هسته از تعداد یکسانی از پروتون و نوترون درست شده است که نوکلئون نامیده می‌شوند.

پ) پروتون دارای بار مثبت و نوترون خنثی و جرم آنها تقریباً برابر است.

ت) بار الکترون منفی است ولی از لحاظ مقدار با بار پروتون برابر است ولی جرم آن بسیار کمتر است.

ث) در اتم معمولی شمار پروتون‌ها و الکترون‌ها برابر است.

۳۲ عدد جرمی لیتیم ۷ و عدد اتمی آن ۳ است.

۱ نماد آن $^{7}_{4}Li$ است.

۲ ۳ پروتون، ۴ نوترون و سه الکترون دارد.

۳ یکی از ایزوتوپ‌های آن ۳ پروتون، ۳ نوترون و ۳ الکترون دارد.

الف) ۱ و ۲ و ۳ ب) ۱ و ۲ پ) ۲ و ۳ ت) ۱ ث) ۳

۳۳ رادون $^{220}_{86}Rn$ با گسیل ذرهٔ α به کدام‌یک از عنصرهای زیر تبدیل می‌شود؟

الف) $^{216}_{85}At$ ب) $^{216}_{86}Rn$ پ) $^{218}_{84}Po$ ت) $^{216}_{84}Po$ ث) $^{217}_{85}At$

۳۴ توریم $^{234}_{90}Th$ با گسیل ذرهٔ β^- به کدام‌یک از عنصرهای زیر تبدیل می‌شود؟

الف) $^{235}_{90}Th$ ب) $^{230}_{89}Ac$ پ) $^{234}_{89}Ac$ ت) $^{232}_{88}Ra$ ث) $^{234}_{91}Pa$

۳۵ یک ایزوتوپ پرتوزا یک ذرهٔ آلفا و دو ذرهٔ β^- گسیل می‌کند، هسته‌ای که برجا می‌ماند نسبت به حالت پیشین،

الف) تعداد ذره‌های هسته‌ای بیشتری دارد. ب) همان تعداد ذره‌های هسته‌ای را دارد.

پ) تعداد پروتون‌های بیشتری دارد. ت) تعداد پروتون کمتری دارد.

ث) همان تعداد پروتون دارد.

۳۶ یک زنجیرهٔ واپاشی با $^{232}_{90}Th$ آغاز می‌شود و به ترتیب واپاشی آلفازا، بتازا، بتازا، گامازا و آلفازا می‌یابد. محصول پایانی کدام است؟

الف) $^{224}_{88}Ra$ ب) $^{230}_{82}Pb$ پ) $^{326}_{86}Rn$ ت) $^{227}_{85}At$ ث) $^{225}_{87}Fr$

۳۷ــ اگر نیمه‌عمر یک ایزوتوپ پرتوزا ۱۶۰۰ سال باشد، چند سال طول می‌کشد تا $\frac{7}{8}$ آن واپاشی کند؟

الف) ۲۰۰ ب) ۱۴۰۰ پ) ۴۸۰۰ ت) ۱۲۸۰۰

۳۸ در فرایند هم‌جوشی دو هستهٔ $^{2}_{1}H$ و $^{3}_{1}H$ در یک رآکتور، یک نوترون به بیرون پرتاب می‌شود، هستهٔ به‌دست آمده (Y) کدام است؟

الف) $^{5}_{1}Y$ ب) $^{5}_{2}Y$ پ) $^{4}_{1}Y$ ت) $^{4}_{2}Y$ ث) $^{3}_{2}Y$

۳۹ دو عنصر پرتوزای X و Y به ترتیب نیمه‌عمرهای ۵۰ و ۱۰۰ دقیقه دارند. شمار اتم‌های A و B با یکدیگر مساوی‌اند. بعد از ۲۰۰ دقیقه نسبت زیر برابر با کدام‌یک از عددهاست؟

$$\frac{\text{شمار اتم‌های تغییر نکرده X}}{\text{شمار اتم‌های تغییر نکرده Y}}$$

الف) ۴ ب) ۲ پ) ۱ ت) $\frac{۱}{۲}$ ث) $\frac{۱}{۴}$

۴۰ هنگامی که هستهٔ اتم $^{۷}_{۳}\mathrm{Li}$ با ذره‌های خاصی بمباران می‌شود، تنها دو ذرهٔ آلفا به‌دست می‌آید. کدام‌یک از ذره‌های زیر در بمباران شرکت داشته‌اند؟

الف) الکترون‌ها ب) پروتون‌ها پ) دوترون‌ها ت) نوترون‌ها ث) فوتون‌ها

۴۱ در یک رآکتور شکافت گرمایی، به‌کار بردن میله‌های تنظیم‌کننده اثری

الف) در تندی نوترون‌های تولید شده در شکافت ندارند.

ب) در آهنگ نوترون‌های تولید شده در شکافت ندارند.

پ) در انرژی تولید شده در رآکتورهای هسته‌ای ندارند.

ت) در مقدار تابش‌های تولید شده در رآکتور هسته‌ای ندارند.

ث) در آهنگ تجزیهٔ هستهٔ $^{۲۳۵}\mathrm{U}$ ندارند.

راهنمای پاسخ‌یابی به پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۶

۶ـ۱ ساختار هسته

۱ اگر هنگام قرارگرفتن نوترون‌ها درون توپ تنیس، فضاهای خالی را نادیده بگیریم و ضریب پرشدگی را یک در نظر بگیریم، در این صورت داریم :

$$\frac{\frac{۴}{۳}\pi R^۳}{\frac{۴}{۳}\pi r^۳} = \frac{(۳/۲\times ۱۰^{-۲}\,\mathrm{m})^۳}{(۱۰^{-۱۵}\,\mathrm{m})^۳} \approx ۱۰^{۴۰}$$ مرتبه بزرگی تعداد نوترون‌هایی که در توپ تنیس جای می‌گیرند

$۱۰^{۱۳}\,\mathrm{kg} = ۱۰^{۴۰}\times ۱۰^{-۲۷}\,\mathrm{kg} \approx$ مرتبه بزرگی جرم توپ تنیس در این شرایط

برای مقایسه خوب است بدانید مرتبهٔ بزرگی جرم تمامی ساکنین روی کرهٔ زمین حدود $۱۰^{۱۲}\,\mathrm{kg}$ است!

۲ الف) تعداد نوکلئون‌ها (عدد جرمی) $A = ۲۰۸$

ب) $N = A - Z = ۲۰۸ - ۸۲ = ۱۲۶$

پ) $q = +Ze = +۸۲\,e$

۳ الف)

$$^{۱۹۵}_{۷۸}\mathrm{X} = {}^{۱۹۵}_{۷۸}\mathrm{Pt}$$

$$N = A - Z = ۱۹۵ - ۷۸ = ۱۱۷$$

ب)

$$^{۳۲}_{۱۶}\mathrm{X} = {}^{۳۲}_{۱۶}\mathrm{S}$$

$$N = A - Z = ۳۲ - ۱۶ = ۱۶$$

پ)

$$^{۶۱}_{۲۹}\mathrm{X} = {}^{۶۱}_{۲۹}\mathrm{Pm}$$

$$N = A - Z = ۶۱ - ۲۹ = ۳۲$$

۴ $^{۶۱}_{۲۵}\mathrm{X}$ و $^{۵۹}_{۲۵}\mathrm{X}$ از ایزوتوپ‌های منگنز هستند که به طریق شیمیایی قابل جداسازی نیستند. در حالی که $^{۶۱}_{۲۶}\mathrm{X}$ یکی از ایزوتوپ‌های آهن است و به سادگی می‌توان به روش شیمیایی آن را از ایزوتوپ منگنز جدا نمود.

۶ـ۲ـ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر

۵

$$^{۲۱۱}_{۸۲}\mathrm{Pb} \rightarrow {}^{۲۱۱}_{۸۳}\mathrm{Bi} + \beta^-$$

$$^{۱۱}_{۶}\mathrm{C} \rightarrow {}^{۱۱}_{۵}\mathrm{B} + \beta^+$$

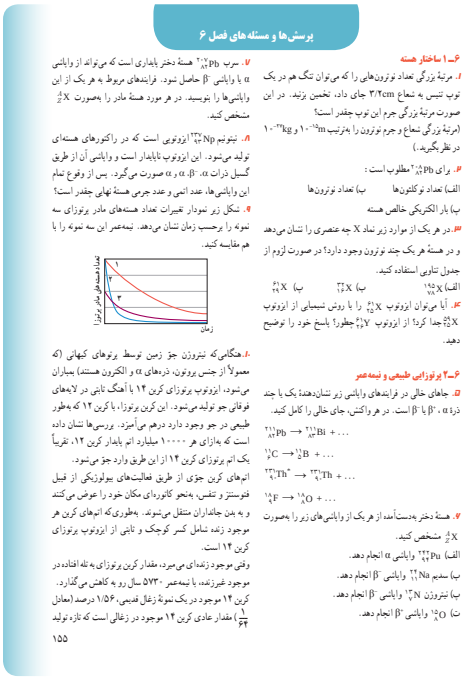
$$^{۲۳۱}_{۹۰}\mathrm{Th}^* \rightarrow {}^{۲۳۱}_{۹۰}\mathrm{Th} + \gamma$$

$$^{۱۸}_{۹}\mathrm{F} \rightarrow {}^{۱۸}_{۸}\mathrm{O} + \beta^+$$

۶

الف) $$^{۲۴۲}_{۹۴}\mathrm{Pu} \rightarrow {}^{۲۳۸}_{۹۲}\mathrm{U} + \alpha$$

ب) $$^{۲۴}_{۱۱}\mathrm{Na} \rightarrow {}^{۲۴}_{۱۲}\mathrm{Mg} + \beta^-$$



پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۶

۶ـ۱ ساختار هسته

۱. مرتبهٔ بزرگی تعداد نوترون‌هایی را که می‌توان تنگ هم در یک توپ تنیس به شعاع ۳/۲cm جای داد، تخمین بزنید. در این صورت مرتبهٔ بزرگی جرم این توپ چقدر است؟
(مرتبهٔ بزرگی شعاع و جرم نوترون را به‌ترتیب $۱۰^{-۱۵}\mathrm{m}$ و $۱۰^{-۲۷}\mathrm{kg}$ در نظر بگیرید.)

۲. برای $^{۲۰۸}_{۸۲}\mathrm{Pb}$ مطلوب است :
الف) تعداد نوکلئون‌ها ب) تعداد نوترون‌ها
پ) بار الکتریکی خالص هسته

۳. در هر یک از موارد زیر نماد X چه عنصری را نشان می‌دهد و در هستهٔ هر یک چند نوترون وجود دارد؟ در صورت لزوم از جدول تناوبی استفاده کنید.
الف) $^{۱۹۵}_{۷۸}\mathrm{X}$ ب) $^{۳۲}_{۱۶}\mathrm{X}$ پ) $^{۶۱}_{۲۹}\mathrm{X}$

۴. آیا می‌توان ایزوتوپ $^{۶۱}_{۲۵}\mathrm{X}$ را با روش شیمیایی از ایزوتوپ $^{۵۹}_{۲۵}\mathrm{X}$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ $^{۶۱}_{۲۶}\mathrm{Y}$ چطور؟ پاسخ خود را توضیح دهید.

۶ـ۲ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر

۵. جاهای خالی در فرایندهای واپاشی زیر نشان‌دهندهٔ یک یا چند ذرهٔ α، β^- یا β^+ است. در هر واکنش، جای خالی را کامل کنید.

$^{۲۱۱}_{۸۲}\mathrm{Pb} \rightarrow {}^{۲۱۱}_{۸۳}\mathrm{Bi} + \ldots$

$^{۱۱}_{۶}\mathrm{C} \rightarrow {}^{۱۱}_{۵}\mathrm{B} + \ldots$

$^{۲۳۱}_{۹۰}\mathrm{Th}^* \rightarrow {}^{۲۳۱}_{۹۰}\mathrm{Th} + \ldots$

$^{۱۸}_{۹}\mathrm{F} \rightarrow {}^{۱۸}_{۸}\mathrm{O} + \ldots$

۶. هستهٔ دختر به‌دست‌آمده از هر یک از واپاشی‌های زیر را به‌صورت $^{A}_{Z}\mathrm{X}$ مشخص کنید.
الف) $^{۲۴۲}_{۹۴}\mathrm{Pu}$ واپاشی α انجام دهد.
ب) سدیم $^{۲۴}_{۱۱}\mathrm{Na}$ واپاشی β^- انجام دهد.
پ) نیتروژن $^{۱۳}_{۷}\mathrm{N}$ واپاشی β^+ انجام دهد.
ت) $^{۱۵}_{۸}\mathrm{O}$ واپاشی β^+ انجام دهد.

۷. سرب $^{۲۱۱}_{۸۲}\mathrm{Pb}$ هستهٔ دختر بایداری است که می‌تواند از واپاشی α یا واپاشی β^- حاصل شود. فرایندهای مربوط به هر یک از این واپاشی‌ها را بنویسید. در هر مورد هستهٔ مادر را به‌صورت $^{A}_{Z}\mathrm{X}$ مشخص کنید.

۸. نپتونیم $^{۲۳۹}_{۹۳}\mathrm{Np}$ ایزوتوپی است که در راکتورهای هسته‌ای تولید می‌شود. این ایزوتوپ ناپایدار است و واپاشی آن از طریق گسیل ذرات α، β^- و α صورت می‌گیرد. پس از وقوع تمام این واپاشی‌ها، عدد اتمی و عدد جرمی هستهٔ نهایی چقدر است؟

۹. شکل زیر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های مادر پرتوزای سه نمونه را برحسب زمان نشان می‌دهد. نیمه‌عمر این سه نمونه را با هم مقایسه کنید.

۱۰. هنگامی‌که نیتروژن جو زمین توسط پرتوهای کیهانی (که معمولاً از جنس پروتون، ذره‌های α و الکترون هستند) بمباران می‌شود، ایزوتوپ پرتوزای کربن ۱۴ با آهنگ ثابتی در لایه‌های فوقانی جو تولید می‌شود. این کربن پرتوزا، با کربن ۱۲ که به‌طور طبیعی در جو وجود دارد درهم می‌آمیزد. بررسی‌ها نشان داده است که به‌ازای هر ۱۰۰۰۰ میلیارد اتم پایدار کربن ۱۲، تقریباً یک اتم پرتوزای کربن ۱۴ از این طریق وارد جو می‌شود.
اتم‌های کربن جوی از طریق فعالیت‌های بیولوژیکی از قبیل فتوسنتز و تنفس، به‌نحو کاوره‌ای مکان خود را عوض می‌کنند و به بدن جانداران منتقل می‌شوند. به‌طوری‌که اتم‌های کربن هر موجود زنده شامل کسر کوچک و ثابتی از ایزوتوپ پرتوزای کربن ۱۴ است.
وقتی موجود زنده‌ای می‌میرد، مقدار کربن پرتوزای به تله افتاده در موجود غیرزنده، با نیمه‌عمر ۵۷۳۰ سال رو به کاهش می‌گذارد. کربن ۱۴ موجود در یک نمونهٔ زغال قدیمی، ۱/۵۶ درصد (معادل $\frac{۱}{۶۴}$) مقدار عادی کربن ۱۴ موجود در زغالی است که تازه تولید

پ) $^{13}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{13}_{6}\mathrm{N} + \beta^{-}$

ت) $^{15}_{8}\mathrm{O} \rightarrow {}^{15}_{7}\mathrm{O} + \beta^{+}$

۷ یک راه برای دیدن سری‌های واپاشی پرتوزا، مراجعه به کتاب‌های مرجع هسته‌ای است ولی با مراجعه به اینترنت و با استفاده از کلیه واژه‌های (radioactive decay series) یا (decay chain) است. مراجعه به سایت زیر نیز برخی از سری‌های واپاشی پرتوزا را ارائه می‌دهد. حفظ کردن این سری و ارزشیابی از آن، جزو اهداف این فصل نیست.

www.en.wikipedia.org/wiki/decay–chain

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۶

۶ـ۱ ساختار هسته

۱. مرثیهٔ بزرگی تعداد نوترون‌هایی را که می‌توان تنگ هم در یک توپ تنیس به شعاع ۳/۲cm جای داد، تخمین بزنید. در این صورت مرثیهٔ بزرگی جرم این توپ چقدر است؟ (مرثیهٔ بزرگی شعاع و جرم نوترون را به‌ترتیب 10^{-15}m و 10^{-27}kg در نظر بگیرید.)

۲. برای $^{208}_{82}\mathrm{Pb}$ مطلوب است:

الف) تعداد نوکلئون‌ها ب) تعداد نوترون‌ها

پ) بار الکتریکی خالص هسته

۳. در هر یک از موارد زیر نماد X چه عنصری را نشان می‌دهد و در هستهٔ هر یک چند نوترون وجود دارد؟ در صورت لزوم از جدول تناوبی استفاده کنید.

الف) $^{131}_{53}\mathrm{X}$ ب) $^{32}_{15}\mathrm{X}$ پ) $^{1}_{1}\mathrm{X}$

۴. آیا می‌توان ایزوتوپ $^{A}_{15}\mathrm{X}$ را با روش شیمیایی از ایزوتوپ $^{32}_{15}\mathrm{X}$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ $^{A}_{15}\mathrm{Y}$ چطور؟ پاسخ خود را توضیح دهید.

۶ـ۳ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر

۵. جاهای خالی در فرایندهای واپاشی زیر نشان‌دهندهٔ یک یا چند ذرهٔ α، β^{-} یا β^{+} است. در هر واکنش، جای خالی را کامل کنید.

$^{211}_{82}\mathrm{Pb} \rightarrow {}^{211}_{83}\mathrm{Bi} + \ldots$

$^{11}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{11}_{5}\mathrm{B} + \ldots$

$^{232}_{90}\mathrm{Th}^{*} \rightarrow {}^{232}_{90}\mathrm{Th} + \ldots$

$^{18}_{9}\mathrm{F} \rightarrow {}^{18}_{8}\mathrm{O} + \ldots$

۶. هستهٔ دختر به‌دست‌آمده از هر یک از واپاشی‌های زیر را به‌صورت $^{A}_{Z}\mathrm{X}$ مشخص کنید.

الف) $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ واپاشی α انجام دهد.

ب) سدیم $^{24}_{11}\mathrm{Na}$ واپاشی β^{-} انجام دهد.

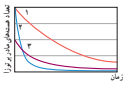
پ) نیتروژن $^{13}_{7}\mathrm{N}$ واپاشی β^{+} انجام دهد.

ت) $^{15}_{8}\mathrm{O}$ واپاشی β^{+} انجام دهد.

۷. سرب $^{214}_{82}\mathrm{Pb}$ هستهٔ دختر پایداری است که می‌تواند از واپاشی α یا واپاشی β^{-} حاصل شود. فرایندهای مربوط به هر یک از این واپاشی‌ها را بنویسید. در هر مورد هستهٔ مادر را به‌صورت $^{A}_{Z}\mathrm{X}$ مشخص کنید.

۸. نپتونیم $^{237}_{93}\mathrm{Np}$ ایزوتوپی است که در راکتورهای هسته‌ای تولید می‌شود. این ایزوتوپ ناپایدار است و واپاشی آن از طریق گسیل ذرات α، β^{-} و α به صورت می‌گیرد. پس از وقوع تمام این واپاشی‌ها، عدد اتمی و عدد جرمی هستهٔ نهایی چقدر است؟

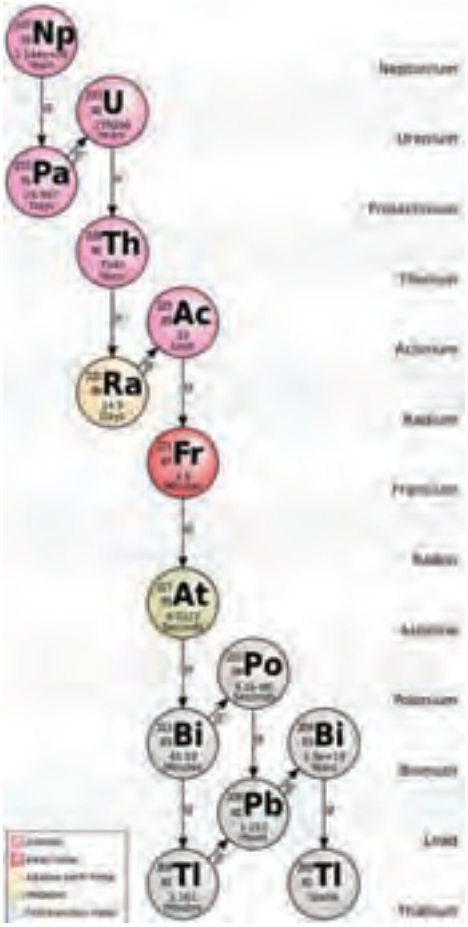
۹. شکل زیر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های مادر پرتوزای سه نمونه را برحسب زمان نشان می‌دهد. نیمه‌عمر این سه نمونه را با هم مقایسه کنید.



۱۰. هنگامی‌که نیتروژن جو زمین توسط پرتوهای کیهانی (که معمولاً از جنس پروتون، ذره‌های α و الکترون هستند) بمباران می‌شود، ایزوتوپ پرتوزای کربن ۱۴ با آهنگ ثابتی در لایه‌های فوقانی جو تولید می‌شود. این کربن پرتوزا، با کربن ۱۲ که به‌طور طبیعی در جو وجود دارد درهم می‌آمیزد. بررسی‌ها نشان داده است که به‌ازای هر ۱۰۰۰۰ میلیارد اتم پایدار کربن ۱۲، تقریباً یک اتم پرتوزای کربن ۱۴ از این طریق وارد جو می‌شود.

اتم‌های کربن جوّی از طریق فعالیت‌های بیولوژیکی از قبیل فتوسنتز و تنفس، به‌نحو کانوره‌ای مکان خود را عوض می‌کنند و به بدن جانداران منتقل می‌شوند. به‌طوری‌که اتم‌های کربن هر موجود زنده شامل کسر کوچک و ثابتی از ایزوتوپ پرتوزای کربن ۱۴ است.

وقتی موجود زنده‌ای می‌میرد، مقدار کربن پرتوزای به تله افتاده در موجود غیرزنده، با نیمه‌عمر ۵۷۳۰ سال رو به کاهش می‌گذارد. کربن ۱۴ موجود در یک نمونهٔ زغال قدیمی، ۱/۵۶ درصد (معادل $\frac{1}{64}$) مقدار عادی کربن ۱۴ موجود در زغالی است که تازه تولید



در شکل‌های بالا، سری‌های واپاشی پرتوزای $^{237}_{93}NP$ به $^{205}_{81}Ti$ که هستهٔ دختر پایداری است و همچنین $^{235}_{92}U$ به هستهٔ دختر پایدار $^{207}_{82}Pb$ نشان داده شده است.

برای مثال در ادامه تعدادی از فرایندهای مربوط به واپاشی α یا β^- اورانیم ۲۳۵ ($^{235}_{92}U$) به هستهٔ دختر پایدار سرب ۲۰۷ ($^{207}_{82}Pb$) آمده است.

$$^{235}_{92}U \rightarrow ^{231}_{90}Th + \alpha$$

$$^{231}_{90}Th \rightarrow ^{231}_{91}Pb + \beta^-$$

$$\vdots$$

$$^{207}_{81}Ti \rightarrow ^{207}_{82}Pb + \beta^-$$

یا

$$^{211}_{84}Po \rightarrow ^{207}_{82}Pb + \alpha$$

۸ همان‌طور که در تصویر مربوط پاسخ تمرین ۷ دیده می‌شود سری واپاشی پرتوزای نپتونیم ۲۳۷ ($^{237}_{93}Np$) آمده است.

$$^{237}_{93}Np \rightarrow ^{233}_{91}Pa + \alpha$$

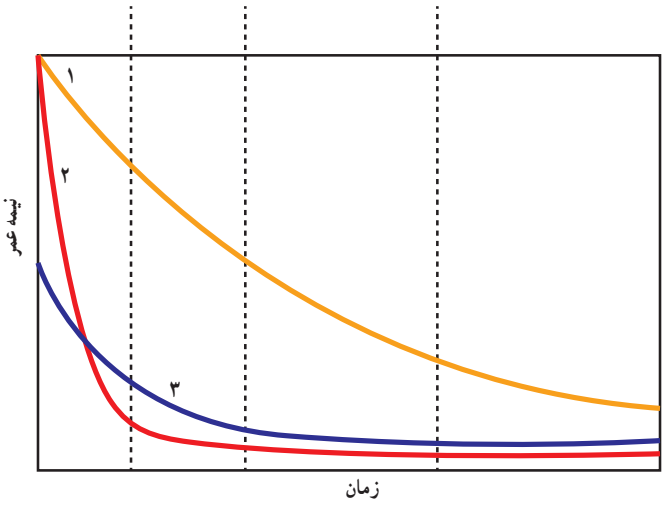
$$^{233}_{91}Pa \rightarrow ^{233}_{92}U + \beta^-$$

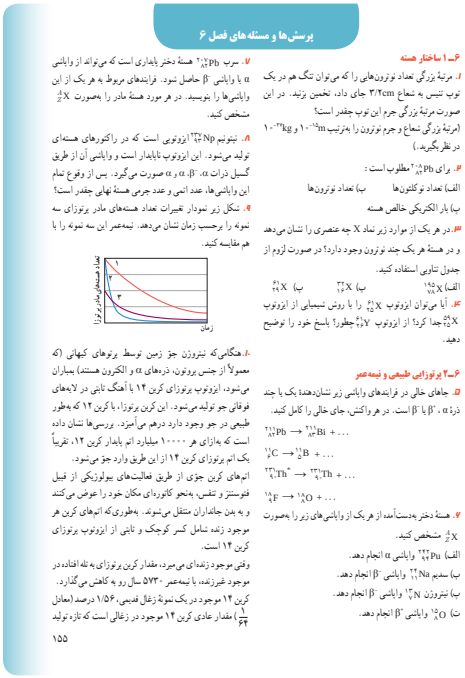
$$^{233}_{92}U \rightarrow ^{229}_{90}Th + \alpha$$

$$^{229}_{90}Th \rightarrow ^{225}_{88}Ra + \alpha$$

همان‌طور که دیده می‌شود $^{237}_{93}Np$ پس از واپاشی‌های α، β^-، α و α به هستهٔ دختر رادیوم ۲۲۵ ($^{225}_{88}Ra$) تبدیل می‌شود که هنوز پرتوزا است و پس از واپاشی‌های دیگر به هستهٔ دختر پایدار تالیم ۲۰۵ ($^{205}_{81}Tl$) تبدیل می‌شود.

۹ با توجه به گام‌های زمانی نشان داده شده روی نمودار شکل زیر، مشخص است که نمونه ۱، دارای بیشترین نیمه عمر و نمونهٔ ۲ دارای کمترین نیمه‌عمر است.





پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۶

۶-۱ ساختار هسته

۱. مرثیهٔ بزرگی تعداد نوترون‌هایی را که می‌توان تنگ هم در یک توپ تنیس به شعاع ۳/۲cm جای داد، تخمین بزنید. در این صورت مرثیهٔ بزرگی چرم این توپ چقدر است؟ (مرثیهٔ بزرگی شعاع و جرم نوترون را به‌ترتیب $10^{-15}m$ و $10^{-27}kg$ در نظر بگیرید.)

۲. برای $^{208}_{82}Pb$ مطلوب است :
الف) تعداد نوکلئون‌ها ب) تعداد نوترون‌ها
پ) بار الکتریکی خالص هسته

۳. در هر یک از موارد زیر نماد X چه عنصری را نشان می‌دهد و در هستهٔ هر یک چند نوترون وجود دارد؟ در صورت لزوم از جدول تناوبی استفاده کنید.
الف) $^{14}_{6}X$ ب) $^{32}_{15}X$ پ) $^{A}_{47}X$

۴. آیا می‌توان ایزوتوپ $^{A}_{15}X$ را با برون شیمیایی از ایزوتوپ $^{A}_{13}X$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ $^{A}_{7}Y$ چطور؟ پاسخ خود را توضیح دهید.

۶-۲ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر

۵. جاهای خالی در فرایندهای واپاشی زیر نشان‌دهندهٔ یک یا چند ذرهٔ α، β^- یا β^+ است. در هر واکنش، جای خالی را کامل کنید.

$^{211}_{83}Pb \rightarrow ^{211}_{83}Bi + \ldots$

$^{11}_{6}C \rightarrow ^{11}_{5}B + \ldots$

$^{232}_{90}Th^{*} \rightarrow ^{232}_{90}Th + \ldots$

$^{18}_{9}F \rightarrow ^{18}_{8}O + \ldots$

۶. هستهٔ دختر به‌دست‌آمده از هر یک از واپاشی‌های زیر را به‌صورت $^{A}_{Z}X$ مشخص کنید.
الف) $^{239}_{94}Pu$ واپاشی α انجام دهد.
ب) سدیم $^{24}_{11}Na$ واپاشی β^- انجام دهد.
پ) نیتروژن $^{13}_{7}N$ واپاشی β^+ انجام دهد.
ت) $^{19}_{8}O$ واپاشی β^- انجام دهد.

۷. سرب $^{208}_{82}Pb$ هستهٔ دختر پایداری است که می‌تواند از واپاشی α یا واپاشی β^- حاصل شود. فرایندهای مربوط به هر یک از این واپاشی‌ها را بنویسید. در هر مورد هستهٔ مادر را به‌صورت $^{A}_{Z}X$ مشخص کنید.

۸. نپتونیم $^{237}_{93}Np$ ایزوتوپی است که در راکتورهای هسته‌ای تولید می‌شود. این ایزوتوپ ناپایدار است و واپاشی آن از طریق گسیل ذرات α، β^-، α و α صورت می‌گیرد. پس از وقوع تمام این واپاشی‌ها، عدد اتمی و عدد جرمی هستهٔ نهایی چقدر است؟

۹. شکل زیر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های مادر پرتوزای سه نمونه را برحسب زمان نشان می‌دهد. نیمه‌عمر این سه نمونه را با هم مقایسه کنید.

۱۰. هنگامی‌که نیتروژن جو زمین توسط پرتوهای کیهانی (که معمولاً از جنس پروتون، ذره‌های α و الکترون هستند) بمباران می‌شود، ایزوتوپ پرتوزای کربن ۱۴ با آهنگ ثابتی در لایه‌های فوقانی جو تولید می‌شود. این کربن پرتوزا، با کربن ۱۲ که به‌طور طبیعی در جو وجود دارد درهم می‌آمیزد. بررسی‌ها نشان داده است که به‌ازای هر ۱۰۰۰۰ میلیارد اتم پایدار کربن ۱۲، تقریباً یک اتم پرتوزای کربن ۱۴ از این طریق وارد جو می‌شود.
اتم‌های کربن جوّی از طریق فعالیت‌های بیولوژیکی از قبیل فتوسنتز و تنفس، به‌نحو کاوره‌ای مکان خود را عوض می‌کنند و به بدن جانداران منتقل می‌شوند. به‌طوری‌که اتم‌های کربن هر موجود زنده شامل کسر کوچک و ثابتی از ایزوتوپ پرتوزای کربن ۱۴ است.
وقتی موجود زنده‌ای می‌میرد، مقدار کربن پرتوزای به تله افتاده در موجود غیرزنده، با نیمه‌عمر ۵۷۳۰ سال رو به کاهش می‌گذارد. کربن ۱۴ موجود در یک نمونهٔ زغال قدیمی، ۱/۵۶ درصد (معادل $\frac{1}{64}$) مقدار عادی کربن ۱۴ موجود در زغالی است که تازه تولید

۱۰

$$\frac{۱}{۶۴}=\left(\frac{۱}{۲}\right)^{۶}=\left(\frac{۱}{۲}\right)^{n}\Rightarrow n=۶$$

بنابراین پس از ۶ نیمه‌عمر، کربن ۱۴ موجود در نمونهٔ زغال قدیمی به ۱/۵۶ درصد مقدار کربن ۱۴ موجود در زغالی که تازه تولید شده، رسیده است. چون هر نیمه عمر ۵۷۳۰ سال طول می‌کشد، در این صورت سن تقریبی این زغال برابر است با

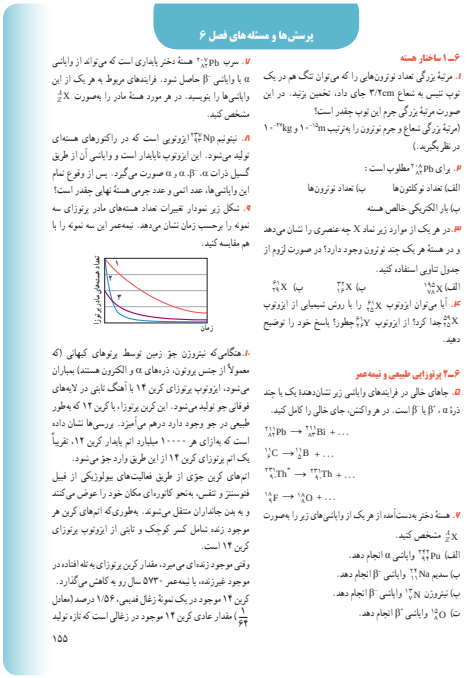
$$۶\times ۵۷۳۰\ \text{years}=۳۴۳۸۰\ \text{years}$$

۱۱ چهار ساعت معادل ۴ نیمه عمر است. بنابراین $\frac{۱}{۱۶}=\left(\frac{۱}{۲}\right)^{۴}$ مادهٔ اولیه، در نمونهٔ بیسموت باقی می‌ماند.

۶ـ۲ـ شکافت هسته‌ای

۱۲ الف) اورانیم ۲۳۵، که حاوی ۹۲ پروتون و ۱۴۳ نوترون است، عنصری پرتوزا و با نیمه‌عمر بسیار زیاد حدود ۷۰۰ میلیون سال است. به عبارت دیگر، این تعداد پروتون و نوترون که در هستهٔ اتم اورانیم ۲۳۵ کنار یکدیگر جمع شده‌اند، سبب توازُن بسیار خوبی در نیروی کولنی بین پروتون‌ها و نیروی هسته‌ای بین نوکلئون‌ها شده است و سبب ایجاد هسته‌ای با پایداری نسبتاً خوب شده است که در طبیعت نیز یافت می‌شود (توجه شود که تمامی هسته‌هایی که عدد اتمی آنها بیشتر از ۸۲ است، $Z>۸۲$، ناپایدارند.)

ب) وقتی هستهٔ اتم اورانیم ۲۳۵، یک نوترون کم انرژی (یا اصطلاحاً نوترون کُند) را به دام می‌اندازد به هستهٔ مرکب و به شدت ناپایداری تبدیل می‌شود که پس از $۱۰^{-۱۲}$ ثانیه منجر به فرایند شکافت می‌شود. انرژی آزاد شده در هر فرایند شکافت، کمی بیش از ۲۰۰ MeV است. این انرژی عمدتاً مربوط به انرژی جنبشی پاره‌های شکافت و نوترون‌های ایجاد شده است. از آنجا که جرم محصولات شکافت، اندکی کمتر از جرم هستهٔ مرکب اورانیم ۲۳۶ است، این اختلاف جرم بنا به رابطهٔ معروف اینشتین $E=mc^{۲}$، سبب آزاد



پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۶

۶ـ۱ ساختار هسته

I. مرتبهٔ بزرگی تعداد نوترون‌هایی را که می‌توان تنگ هم در یک توپ تنیس به شعاع ۳/۷cm جای داد، تخمین بزنید. در این صورت مرتبهٔ بزرگی جرم این توپ چقدر است؟ (مرتبهٔ بزرگی شعاع و جرم نوترون را به‌ترتیب $۱۰^{-۱۵}$m و $۱۰^{-۲۷}$kg در نظر بگیرید.)

II. برای $^{۲۰۸}_{۸۲}Pb$ مطلوب است:
الف) تعداد نوکلئون‌ها ب) تعداد نوترون‌ها
پ) بار الکتریکی خالص هسته

III. در هر یک از موارد زیر نماد X چه عنصری را نشان می‌دهد و در هستهٔ هر یک چند نوترون وجود دارد؟ در صورت لزوم از جدول تناوبی استفاده کنید.
الف) $^{۱۹۷}_{۷۹}X$ ب) $^{۲۳}_{۱۱}X$ پ) $^{۴}_{۲}X$

IV. آیا می‌توان ایزوتوپ $^{۱۴}_{۶}X$ را با برون شیمیایی از ایزوتوپ $^{۱۴}_{۷}X$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ $^{۱۴}_{۷}Y$ چطور؟ پاسخ خود را توضیح دهید.

۶ـ۲ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر

V. جاهای خالی در فرایندهای واپاشی زیر نشان‌دهندهٔ یک یا چند ذرهٔ α، β^- یا β^+ است. در هر واکنش، جای خالی را کامل کنید.
$^{۲۱۰}_{۸۳}Pb\rightarrow {}^{۲۱۰}_{۸۳}Bi+\dots$
$^{۱۱}_{۶}C\rightarrow {}^{۱۱}_{۵}B+\dots$
$^{۲۲۶}_{۹۰}Th^{*}\rightarrow {}^{۲۲۶}_{۹۰}Th+\dots$
$^{۱۸}_{۹}F\rightarrow {}^{۱۸}_{۸}O+\dots$

VI. هستهٔ دختر به‌دست‌آمده از هر یک از واپاشی‌های زیر را به‌صورت $^{A}_{Z}X$ مشخص کنید.
الف) $^{۲۳۹}_{۹۴}Pu$ واپاشی α انجام دهد.
ب) سدیم $^{۲۴}_{۱۱}Na$ واپاشی β^- انجام دهد.
پ) نیتروژن $^{۱۳}_{۷}N$ واپاشی β^+ انجام دهد.
ت) $^{۱۵}_{۸}O$ واپاشی β^+ انجام دهد.

VII. سرب $^{۲۰۸}_{۸۲}Pb$ هستهٔ دختر پایداری است که می‌تواند از واپاشی α یا واپاشی β^- حاصل شود. فرایندهای مربوط به هر یک از این واپاشی‌ها را بنویسید. در هر مورد هستهٔ مادر را به‌صورت $^{A}_{Z}X$ مشخص کنید.

VIII. نپتونیم $^{۲۳۹}_{۹۳}Np$ ایزوتوپی است که در راکتورهای هسته‌ای تولید می‌شود. این ایزوتوپ ناپایدار است و واپاشی آن از طریق گسیل ذرات α، β^- و α و β^- صورت می‌گیرد. پس از وقوع تمام این واپاشی‌ها، عدد اتمی و عدد جرمی هستهٔ نهایی چقدر است؟

IX. شکل زیر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های مادر پرتوزای سه نمونه را برحسب زمان نشان می‌دهد. نیمه‌عمر این سه نمونه را با هم مقایسه کنید.

X. هنگامی‌که نیتروژن جو زمین توسط پرتوهای کیهانی (که معمولاً از جنس پروتون، ذره‌های α و الکترون هستند) بمباران می‌شود، ایزوتوپ پرتوزای کربن ۱۴ با آهنگ ثابتی در لایه‌های فوقانی جو تولید می‌شود. این کربن پرتوزا، با کربن ۱۲ که به‌طور طبیعی در جو وجود دارد درهم می‌آمیزد. بررسی‌ها نشان داده است که به‌ازای هر ۱۰۰۰۰۰ میلیارد اتم پایدار کربن ۱۲، تقریباً یک اتم پرتوزای کربن ۱۴ از این طریق وارد جو می‌شود.
اتم‌های کربن جوّی از طریق فعالیت‌های بیولوژیکی از قبیل فتوسنتز و تنفس، به‌نحو کانوره‌ای مکان خود را عوض می‌کنند و به بدن جانداران منتقل می‌شوند. به‌طوری‌که اتم‌های کربن هر موجود زنده شامل کسر کوچک و ثابتی از ایزوتوپ پرتوزای کربن ۱۴ است.
وقتی موجود زنده‌ای می‌میرد، مقدار کربن پرتوزای به تله افتاده در موجود غیرزنده، با نیمه‌عمر ۵۷۳۰ سال رو به کاهش می‌گذارد. کربن ۱۴ موجود در یک نمونهٔ زغال قدیمی، ۱/۵۶ درصد (معادل $\frac{۱}{۶۴}$) مقدار عادی کربن ۱۴ موجود در زغالی است که تازه تولید

شده است. سن تقریبی این زغال قدیمی چقدر است؟

II. نیمه‌عمر پیسموت ۲۱۲ حدود ۶۰ دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری از مادهٔ اولیه، در نمونه‌ای از این پیسموت، باقی می‌ماند؟

۶ـ۳ شکافت هسته‌ای

III. معادلهٔ زیر بخشی از واکنشی را نشان می‌دهد که در یک راکتور هسته‌ای روی می‌دهد.
$^{۲۳۵}_{۹۲}U+{}^{۱}_{۰}n\rightarrow {}^{۲۳۶}_{۹۲}U$
الف) اهمیت عددهای ۲۳۵ و ۹۲ را توضیح دهید.
ب) اتم‌های $^{۲۳۶}_{۹۲}U$ ناپایدارند و خود به‌خود به قطعه‌هایی کوچک‌تر همراه با تعدادی نوترون سریع (بین ۲ تا ۵ عدد) و مقدار زیادی انرژی واپاشیده می‌شود. این فرایند چه نام دارد و انرژی آزاد شده در این فرایند چگونه تعیین می‌شود؟
پ) اورانیم ۲۳۵ عمدتاً نوترون‌های با تندی کم را جذب می‌کند تا نوترون‌های سریع را. توضیح دهید چگونه تندی نوترون‌ها را در قلب راکتور کم می‌کنند.
ت) چگونه تولید انرژی را در قلب راکتور کنترل می‌کنند؟
ث) واکنش زنجیری را توضیح دهید.
ج) انرژی به‌صورت گرما در قلب راکتور تولید می‌شود. چگونه گرما از قلب راکتور گرفته و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود؟
چ) هنگامی‌که میله‌های سوخت از مرکز راکتور بیرون کشیده می‌شوند، آنها «نوترون» و «ایزوتوپ‌هایی با «نیمه‌عمر» طولانی هستند. واژه‌های داخل گیومه را توضیح دهید.

IV. الف) حدود ۰/۷ درصد اورانیوم موجود در سنگ معدن طبیعی اورانیم از ایزوتوپ ۲۳۵ تشکیل شده است. در هر واکنش شکافت حدود ۲۰۰ MeV انرژی آزاد می‌شود. فرض کنید تمامی ایزوتوپ ۲۳۵ موجود در یک کیلوگرم از این اورانیم بتواند بر اثر شکافت، انرژی خود را آزاد کند. مقدار این انرژی برحسب مگاالکترون ولت (MeV) و ژول (J) چقدر است؟
ب) با سوختن هر کیلوگرم زغال سنگ، حدود ۳۰ MJ انرژی گرمایی آزاد می‌شود. چند کیلوگرم زغال سنگ باید بسوزد تا معادل انرژی به دست آمده در قسمت الف، انرژی تولید شود؟

V. یکی از واکنش‌های ممکن در شکافت $^{۲۳۵}_{۹۲}U$، داده شده است. در این واکنش عدد اتمی Z، عدد جرمی A، و عنصر X را در $^{A}_{Z}X$ تعیین کنید.
$^{۱}_{۰}n+{}^{۲۳۵}_{۹۲}U\rightarrow {}^{۱۳۹}_{۵۱}Sb+{}^{A}_{Z}X+۴{}^{۱}_{۰}n$
در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.

VI. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟
$^{۱}_{۰}n+{}^{۲۳۵}_{۹۲}U\rightarrow {}^{۱۰۰}_{۴۲}Mo+{}^{۱۳۲}_{۵۰}Sn+{}^{۱}_{۰}n$

VII. بازده نیروگاه هسته‌ای بوشهر حدود ۳۵درصد است. یعنی ۶۵درصد انرژی حاصل از شکافت ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵، به‌صورت گرما تلف و حدود ۳۵درصد آن، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه در هر شکافت حدود ۲۰۰ MeV انرژی آزاد می‌شود، چند کیلوگرم اورانیم ۲۳۵ در سال شکافت پیدا می‌کند؟ (فرض کنید نیروگاه در طول سال با توان پایدار ۱۰۰۰ مگاوات کار می‌کند.)

۶ـ۴ گداخت هسته‌ای

VIII. انرژی آزادشده در هر واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ با یک نوترون کُند حدود ۲۰۲/۵ MeV و در هر واکنش گداخت دوتریم با تریتیم حدود ۱۷/۶ MeV است.
الف) تعداد نوکلئون‌های شرکت‌کننده در هر واکنش شکافت چقدر است؟ انرژی آزادشده به‌ازای هر نوکلئون را حساب کنید.
ب) تعداد نوکلئون‌های شرکت‌کننده در هر واکنش گداخت چقدر است؟ انرژی آزاد شده به ازای هر نوکلئون را حساب کنید.
پ) نتیجه‌های قسمت (الف) و (ب) را با یکدیگر مقایسه کنید. با توجه به نیاز روزافزون بشر به انرژی، و با توجه به اینکه مواد قابل شکافت مانند ^{۲۳۵}U به مقدار بسیار کمی در طبیعت وجود دارد ولی دوتریم به‌طور فراوان در آب اقیانوس‌ها و دریاها موجود است و جدا کردن آن از هیدروژن معمولی آسان و کم‌هزینه است، اهمیت این مقایسه را توضیح دهید.

شدن انرژی گرمایی زیادی عمدتاً به‌صورت انرژی جنبشی پاره‌های شکافت) می‌شود.

پ) آب معمولی (H_2O)، آب سنگین (D_2O) و گرافیت (اتم‌های کربن) از جمله موادی هستند که سبب کاهش انرژی جنبشی نوترون‌ها در واکنش‌های شکافت هسته‌ای می‌شوند و اصطلاحاً نوترون‌های کُند به نوترون‌های تند تبدیل می‌شوند.

ت) با وارد کردن میله‌های کنترل به داخل قلب راکتور، آهنگ واکنش‌های شکافت و در نتیجه تعداد نوترون‌های ایجاد شده از این واکنش‌ها را کنترل می‌کنند. میله‌های کنترل معمولاً از جنس کادمیم یا بور (Boron) هستند که مواد مناسبی برای جذب نوترون به حساب می‌آیند.

ث) واکنش زنجیری در راکتورهای شکافت، با جذب نوترون‌های کند توسط هسته‌های اورانیم ۲۳۵ شروع می‌شود. در این فرایند با ایجاد هستهٔ اورانیم ۲۳۶، که به شدت ناپایدار است، پس از 10^{-12} ثانیه به دو پارهٔ شکافت و تعدادی نوترون سریع به‌وجود می‌آید. پس از کُند شدن نوترون سریع و جذب آنها توسط هسته‌های دیگر اورانیم ۲۳۵، این فرایند به‌طور زنجیری و در کسر کوچکی از زمان، ادامه پیدا می‌کند.

ج) گرمای حاصل از فرایند شکافت، توسط شاره‌ای که معمولاً آب است گرفته می‌شود و به خارج از راکتور انتقال داده می‌شود. جزئیات بیشتر در شکل ۶ــ۱۳ــ ب کتاب درسی نشان داده شده است.

چ) **پرتوزا** : یعنی هسته‌هایی که با گسیل ذرات α، β یا γ، واپاشیده می‌شوند.

ایزوتوپ : مجموعه‌ای از هسته‌های یک اتم که Z یکسان و تعداد نوترون متفاوت دارند.

نیمه‌عمر : مدت زمانی که طول می‌کشد تا نیمی از هسته‌های یک نمونهٔ پرتوزا، واپاشی کنند.

۱۳ الف) ابتدا جرم یک مول سنگ معدن طبیعی اورانیم را به‌دست می‌آوریم.

$$M(\mathrm{U}) = \frac{1}{100}(0/7\times 235 + 99/3\times 238) \approx 0/238\ \mathrm{kg/mol}$$

به این ترتیب تعداد اتم‌های 1kg سنگ معدن طبیعی اورانیم برابر است با

$$N = \left(\frac{1\,\mathrm{kg}}{0/238\,\mathrm{kg}}\right)\times 6/022\times 10^{23} = 2/53\times 10^{24}$$

تعداد اتم‌های اورانیم ۲۳۵ در mg، سنگ معدن طبیعی برابر است با

$$n = \frac{7}{1000}\times 2/53\times 10^{24} = 1/77\times 10^{22}$$

اگر تمامی این اتم‌های اورانیم ۲۳۵ بر اثر فرایند شکافت انرژی خود را آزاد کنند، انرژی آزاد شده برابر است با

$$E = 1/77\times 10^{22}\times 200\ \mathrm{meV} = 3/54\times 10^{24}\ \mathrm{meV}$$

$$= (3/54\times 10^{30}\ \mathrm{eV})\left(\frac{1/6\times 10^{-19}\ \mathrm{J}}{1\ \mathrm{eV}}\right) \simeq 5/66\times 10^{11}\ \mathrm{J}$$

شده است. سن تقریبی این زغال قدیمی چقدر است؟

II. نیمه‌عمر بیسموت ۲۱۲ حدود ۶۰ دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری از مادهٔ اولیه، در نمونه‌ای از این بیسموت، باقی می‌ماند؟

۶ـ۳ شکافت هسته‌ای

II. معادلهٔ زیر بخشی از واکنشی را نشان می‌دهد که در یک راکتور هسته‌ای روی می‌دهد.

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{236}_{92}\mathrm{U}$$

الف) اهمیت عددهای ۲۳۵ و ۹۲ را توضیح دهید.

ب) اتم‌های $^{236}_{92}\mathrm{U}$ ناپایدارند و خود به قطعه‌هایی کوچک‌تر همراه با تعدادی نوترون سریع (بین ۲ تا 5 عدد) و مقدار زیادی انرژی واپاشیده می‌شود. این فرایند چه نام دارد و انرژی آزاد شده در این فرایند چگونه تعیین می‌شود؟

پ) اورانیم ۲۳۵ عمدتاً نوترون‌های با تندی کم را جذب می‌کند تا نوترون‌های سریع را. توضیح دهید چگونه تندی نوترون‌ها را در قلب راکتور کم می‌کنند.

ت) چگونه تولید انرژی را در قلب راکتور کنترل می‌کنند؟

ث) واکنش زنجیری را توضیح دهید.

ج) انرژی به‌صورت گرما در قلب راکتور تولید می‌شود. چگونه گرما از قلب راکتور گرفته و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود؟

چ) هنگامی که میله‌های سوخت از مرکز راکتور بیرون کشیده می‌شوند، آنها «پرتوزا» و «ایزوتوپ‌هایی با «نیمه‌عمر» طولانی هستند. واژه‌های داخل گیومه را توضیح دهید.

III. الف) حدود ۰/۷ درصد اورانیوم موجود در سنگ معدن طبیعی اورانیم از ایزوتوپ ۲۳۵ تشکیل شده است. در هر واکنش شکافت حدود ۲۰۰MeV انرژی آزاد می‌شود. فرض کنید تمامی ایزوتوپ ۲۳۵ موجود در یک کیلوگرم از این اورانیم بتواند بر اثر شکافت، انرژی خود را آزاد کند. مقدار این انرژی برحسب مگاالکترون ولت (MeV) و ژول (J) چقدر است؟

ب) با سوختن هر کیلوگرم زغال سنگ، حدود ۳۰MJ انرژی گرمایی آزاد می‌شود. چند کیلوگرم زغال سنگ باید بسوزد تا معادل انرژی به دست آمده در قسمت الف، انرژی تولید شود؟

IV. یکی از واکنش‌های ممکن در شکافت $^{235}_{92}\mathrm{U}$، داده شده است. در این واکنش عدد اتمی Z، عدد جرمی A و عنصر X را در ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ تعیین کنید.

${}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{133}_{51}\mathrm{Sb} + {}^{A}_{Z}\mathrm{X} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$

در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.

II. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟

نوترون‌ها + ${}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{103}_{42}\mathrm{Mo} + {}^{131}_{50}\mathrm{Sn} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$ + نوترون‌ها

IV. یازده نیروگاه هسته‌ای یونسفر حدود ۳۵درصد است. یعنی ۶۵درصد انرژی حاصل از شکافت ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵، به‌صورت گرما تلف و حدود ۳۵درصد آن، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه در هر شکافت حدود ۲۰۰MeV انرژی آزاد می‌شود، چند کیلوگرم اورانیم ۲۳۵ در سال شکافت پیدا می‌کند؟ (فرض کنید نیروگاه در طول سال با توان پایدار ۱۰۰۰ مگاوات کار می‌کند.)

۶ـ۴ گداخت هسته‌ای

IV. انرژی آزادشده در هر واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ با یک نوترون کُند حدود ۲۰۲/۵MeV و در هر واکنش گداخت دوتریم با تریتیم حدود ۱۷/۶MeV است.

الف) تعداد نوکلئون‌های شرکت‌کننده در هر واکنش شکافت جفدر است؟ انرژی آزادشده به‌ازای هر نوکلئون را حساب کنید.

ب) تعداد نوکلئون‌های شرکت‌کننده در هر واکنش گداخت جفدر است؟ انرژی آزاد شده به ازای هر نوکلئون را حساب کنید.

پ) نتیجه‌های قسمت (الف) و (ب) را با یکدیگر مقایسه کنید. با توجه به نیاز روزافزون بشر به انرژی، و با توجه به اینکه مواد قابل شکافت مانند $^{235}\mathrm{U}$ به مقدار بسیار کمی در طبیعت وجود دارد ولی دوتریم به‌طور فراوان در آب اقیانوس‌ها و دریاها موجود است و جدا کردن آن از هیدروژن معمولی آسان و کم‌هزینه است، اهمیت این مقایسه را توضیح دهید.

ب) مقدار زغال‌سنگ که باید بسوزد تا انرژی معادل $۵/۶۶\times ۱۰^{۱۱}\ \mathrm{J}$ ایجاد کند برابر است با

$$m=(۵/۶۶\times ۱۰^{۱۱}\ \mathrm{J})\left(\frac{۱\ \mathrm{kg}}{۳۰\times ۱۰^{۶}\ \mathrm{J}}\right)=۱/۸۸\times ۱۰^{۴}\ \mathrm{kg}$$

حدود ۱۹ تن زغال‌سنگ باید بسوزد تا انرژی معادل انرژی حاصل از شکافت اورانیم‌های ۲۳۵ داخل سنگ معدن طبیعی آزاد شود. این نتیجه اهمیت غنی‌سازی اورانیم را نشان می‌دهد که برای نیروگاه‌های هسته‌ای درصد اورانیم ۲۳۵ را در میله‌های سوخت به حدود ۳ تا ۵ درصد می‌رسانند.

۱۴ $${}^{۱}_{۰}\mathrm{n}+{}^{۲۳۵}_{۹۲}\mathrm{U}\rightarrow {}^{۱۳۳}_{۵۱}\mathrm{Sb}+{}^{A}_{Z}\mathrm{X}+۴\,{}^{۱}_{۰}\mathrm{n}$$

با توجه به موازنه بودن عدد جرمی و عدد اتمی در دو طرف معادلهٔ واکنش، داریم

$$A=(۱+۲۳۵)-(۱۳۳+۴)=۹۹$$

$$Z=(۹۲+۰)-(۵۱+۰)=۴۱$$

با مراجعه به جدول تناوبی، که در پیوست پایان کتاب آمده است، نام عنصر پارهٔ شکافت نیوبیم ${}^{۹۹}_{۴۱}\mathrm{Nb}$ است.

۱۵ با توجه به فرض مسئله، اگر توان نیروگاه را $۱۰۰۰\ \mathrm{mW}$ در نظر بگیریم در این صورت انرژی معادل این توان در یک سال برابر است با

$$E=(۱۰^{۳}\times ۱۰^{۶}\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}})(۲۴\times ۳۶۰۰\times ۳۶۵\ \mathrm{s})$$

$$\simeq ۳/۱۵\times ۱۰^{۱۶}\ \mathrm{J}=(۳/۱۵\times ۱۰^{۱۶}\ \mathrm{J})\left(\frac{۱\ \mathrm{eV}}{۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}\ \mathrm{J}}\right)$$

$$=۱/۹۷\times ۱۰^{۳۵}\ \mathrm{eV}=۱/۹۷\times ۱۰^{۲۶}\ \mathrm{meV}$$

از آنجا که بازدهٔ نیروگاه حدود ۳۵ درصد است، لذا تنها انرژی معادل $\frac{۳۵}{۱۰۰}\times ۲۰۰\ \mathrm{meV}$ از هر فرایند شکافت اورانیم ۲۳۵ به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. به این ترتیب تعداد اتم‌های اورانیم ۲۳۵ که باید شکافت یابند تا انرژی معادل E را تولید کنند برابر است با

$$n=\frac{۱/۹۷\times ۱۰^{۲۹}\ \mathrm{meV}}{۰/۳۵\times ۲۰۰\ \mathrm{meV}}=۲/۸۱\times ۱۰^{۲۷}$$

از آنجا که جرم هر مول $(۶/۰۲۲\times ۱۰^{۲۳})$ اورانیم ۲۳۵ معادل ۲۳۵g است، جرم اورانیم ۲۳۵ مورد نیاز برابر است با

$$m=(۰/۲۳۵\ \mathrm{kg})\left(\frac{۲/۸۱\times ۱۰^{۲۷}}{۶/۰۲۲\times ۱۰^{۲۳}}\right)\simeq ۱۱۰۰\ \mathrm{kg}$$

این مقدار اورانیم ۲۳۵ در میله‌های سوخت، که معمولاً بین ۳ تا ۵ درصد آنها حاوی اورانیم ۲۳۵ است، توزیع شده‌اند.

فیزیک ۳

شده است. سن تقریبی این زغال قدیمی چقدر است؟

II. نیمه‌عمر پیسموت ۲۱۲ حدود ۶۰ دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری از مادهٔ اولیه، در نمونه‌ای از این پیسموت، باقی می‌ماند؟

۶ـ۳ شکافت هسته‌ای

I. معادلهٔ زیر بخشی از واکنشی را نشان می‌دهد که در یک راکتور هسته‌ای روی می‌دهد.

$${}^{۲۳۵}_{۹۲}\mathrm{U}+{}^{۱}_{۰}\mathrm{n}\rightarrow {}^{۱۳۶}_{۵۴}\mathrm{U}$$

الف) اهمیت عددهای ۲۳۵ و ۹۲ را توضیح دهید.

ب) اتم‌های ${}^{۲۳۵}_{۹۲}\mathrm{U}$ ناپایدارند و خود به خود به قطعه‌هایی کوچک‌تر همراه با تعدادی نوترون سریع (بین ۲ تا ۵ عدد) و مقدار زیادی انرژی واپاشیده می‌شود. این فرایند چه نام دارد و انرژی آزاد شده در این فرایند چگونه تعیین می‌شود؟

پ) اورانیم ۲۳۵ عمدتاً نوترون‌های با تندی کم را جذب می‌کند تا نوترون‌های سریع را. توضیح دهید چگونه تندی نوترون‌ها را در قلب راکتور کم می‌کنند.

ت) چگونه تولید انرژی را در قلب راکتور کنترل می‌کنند؟

ث) واکنش زنجیری را توضیح دهید.

ج) انرژی به‌صورت گرما در قلب راکتور تولید می‌شود. چگونه گرما از قلب راکتور گرفته و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود؟

چ) هنگامی که میله‌های سوخت از مرکز راکتور بیرون کشیده می‌شوند، آنها «پرتوزا» و «اورانیوم‌های با «نیمه‌عمر» طولانی هستند. واژه‌های داخل گیومه را توضیح دهید.

III. الف) حدود ۰/۷ درصد اورانیوم موجود در سنگ معدن طبیعی اورانیم از ایزوتوپ ۲۳۵ تشکیل شده است. در هر واکنش شکافت حدود ۲۰۰MeV انرژی آزاد می‌شود. فرض کنید تمامی ایزوتوپ ۲۳۵ موجود در یک کیلوگرم از این اورانیم بتواند بر اثر شکافت، انرژی خود را آزاد کند. مقدار این انرژی برحسب مگاالکترون ولت (MeV) و ژول (J) چقدر است؟

ب) با سوختن هر کیلوگرم زغال سنگ، حدود ۳۰MJ انرژی گرمایی آزاد می‌شود. چند کیلوگرم زغال سنگ باید بسوزد تا معادل انرژی به دست آمده در قسمت الف، انرژی تولید شود؟

IV. یکی از واکنش‌های ممکن در شکافت ${}^{۲۳۵}_{۹۲}\mathrm{U}$، داده شده است. در این واکنش عدد اتمی Z، عدد جرمی A، و عنصر X را در ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ تعیین کنید.

${}^{۱}_{۰}\mathrm{n}+{}^{۲۳۵}_{۹۲}\mathrm{U}\rightarrow {}^{۱۳۳}_{۵۱}\mathrm{Sb}+{}^{A}_{Z}\mathrm{X}+۴\,{}^{۱}_{۰}\mathrm{n}$

در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.

V. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟

نوترون‌ها $+{}^{۱}_{۰}\mathrm{n}+{}^{۲۳۵}_{۹۲}\mathrm{U}\rightarrow {}^{۱۳۳}_{۵۱}\mathrm{Sn}+{}^{۹۹}_{۴۲}\mathrm{Mo}+{}^{۱}_{۰}\mathrm{n}$

VI. یازده نیروگاه هسته‌ای یونسفر حدود ۳۵درصد است. یعنی ۶۵درصد انرژی حاصل از شکافت ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵، به‌صورت گرما تلف و حدود ۳۵درصد آن، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه در هر شکافت حدود ۲۰۰MeV انرژی آزاد می‌شود، چند کیلوگرم اورانیم ۲۳۵ در سال شکافت پیدا می‌کند؟ (فرض کنید نیروگاه در طول سال با توان پایدار ۱۰۰۰ مگاوات کار می‌کند.)

۶ـ۴ گداخت هسته‌ای

VII. انرژی آزادشده در هر واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ با یک نوترون کُند حدود ۲۰۲/۵ MeV و در هر واکنش گداخت دوتریم با تریتیم حدود ۱۷/۶ MeV است.

الف) تعداد نوکلئون‌های شرکت‌کننده در هر واکنش شکافت چقدر است؟ انرژی آزادشده به‌ازای هر نوکلئون را حساب کنید.

ب) تعداد نوکلئون‌های شرکت‌کننده در هر واکنش گداخت چقدر است؟ انرژی آزاد شده به ازای هر نوکلئون را حساب کنید.

پ) نتیجه‌های قسمت (الف) و (ب) را با یکدیگر مقایسه کنید. با توجه به نیاز روزافزون بشر به انرژی، و با توجه به اینکه مواد قابل شکافت مانند ${}^{۲۳۵}\mathrm{U}$ به مقدار بسیار کمی در طبیعت وجود دارد ولی دوتریم به‌طور فراوان در آب اقیانوس‌ها و دریاها موجود است و جدا کردن آن از هیدروژن معمولی آسان و کم‌هزینه است، اهمیت این مقایسه را توضیح دهید.

۱۵۶

۱۷ الف) فرایند شکافت، با جذب یک نوترون کُند توسط هستهٔ اورانیم ۲۳۵ آغاز می‌شود. بنابراین تعداد نوکلئون‌هایی که در این فرایند مشارکت دارند برابر ۲۳۶ عدد است. به این ترتیب انرژی آزاد شده در فرایند شکافت به ازای هر نوکلئون برابر است با

$$E = \frac{۲۰۲/۵\ \text{MeV}}{۲۳۶} \approx ۰/۸۵\ \text{MeV}$$

ب) واکنش گداخت یا در هم گداخته شدن دوتریم (شامل ۲ نوکلئون) و تریتیم (شامل ۳ نوکلئون) آغاز می‌شود. به این ترتیب در هر واکنش گداخت ۵ نوکلئون مشارکت دارند. انرژی آزاد شده در فرایند گداخت به ازای هر نوکلئون برابر است با

$$E = \frac{۱۷/۶\ \text{MeV}}{۵} = ۳/۵۲\ \text{MeV}$$

پ) همان‌طور که نتایج قسمت‌های الف و ب نشان می‌دهد انرژی آزاد شده به ازای هر نوکلئون در فرایند گداخت، بیش از ۴ برابر انرژی آزاده شده به ازای هر نوکلئون در فرایند شکافت است. این موضوع و فراوانی دوتریم در آب اقیانوس‌ها و دریاها، نشان‌دهنده اهمیت سرمایه‌گذاری روی راکتورهای گداخت است.

فیزیک ۳

شده است. سن تقریبی این زغال قدیمی چقدر است؟

۱۱. نیمه‌عمر پیسموت ۲۱۲ حدود ۶۰ دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری از مادهٔ اولیه، در نمونه‌ای از این پیسموت، باقی می‌ماند؟

۶ـ۳ شکافت هسته‌ای

۱۲. معادلهٔ زیر بخشی از واکنشی را نشان می‌دهد که در یک راکتور هسته‌ای روی می‌دهد.

$^{۲۳۵}_{۹۲}U + {}^{۱}_{۰}n \rightarrow {}^{۲۳۶}_{۹۲}U$

الف) اهمیت عددهای ۲۳۵ و ۹۲ را توضیح دهید.

ب) اتم‌های $^{۲۳۶}_{۹۲}U$ ناپایدارند و خودبه‌خود به قطعه‌هایی کوچک‌تر همراه با تعدادی نوترون سریع (بین ۲ تا ۵ عدد) و مقدار زیادی انرژی واپاشیده می‌شود. این فرایند چه نام دارد و انرژی آزاد شده در این فرایند چگونه تعیین می‌شود؟

پ) اورانیم ۲۳۵ عمدتاً نوترون‌های با تندی کم را جذب می‌کند تا نوترون‌های سریع را. توضیح دهید چگونه تندی نوترون‌ها را در قلب راکتور کم می‌کنند.

ت) چگونه تولید انرژی را در قلب راکتور کنترل می‌کنند؟

ث) انرژی به‌صورت گرما در قلب راکتور تولید می‌شود. چگونه گرما از قلب راکتور گرفته و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود؟

ج) هنگامی که میله‌های سوخت از مرکز راکتور بیرون کشیده می‌شوند، آنها «پرتوزا» و «اورتوب‌هایی با «نیمه‌عمر» طولانی هستند. واژه‌های داخل گیومه را توضیح دهید.

۱۳. الف) حدود ۰/۷ درصد اورانیوم موجود در سنگ معدن طبیعی اورانیم از ایزوتوپ ۲۳۵ تشکیل شده است. در هر واکنش شکافت حدود ۲۰۰MeV انرژی آزاد می‌شود. فرض کنید تمامی ایزوتوپ ۲۳۵ موجود در یک کیلوگرم از این اورانیم بتواند بر اثر شکافت، انرژی خود را آزاد کند. مقدار این انرژی برحسب مگاالکترون ولت (MeV) و ژول (J) چقدر است؟

ب) با سوختن هر کیلوگرم زغال سنگ، حدود ۳۰MJ انرژی گرمایی آزاد می‌شود. چند کیلوگرم زغال سنگ باید بسوزد تا معادل انرژی به دست آمده در قسمت الف، انرژی تولید شود؟

۱۴. یکی از واکنش‌های ممکن در شکافت $^{۲۳۵}_{۹۲}U$، داده شده است. در این واکنش عدد اتمی Z، عدد جرمی A و عنصر X را در $^{A}_{Z}X$ تعیین کنید.

$^{۱}_{۰}n + {}^{۲۳۵}_{۹۲}U \rightarrow {}^{۱۳۳}_{۵۱}Sb + {}^{A}_{Z}X + ۲\,{}^{۱}_{۰}n$

در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.

۱۵. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟

نوترون‌ها + $^{۱۰۰}_{۴۲}Mo + {}^{۱۳۲}_{۵۰}Sn + {}^{۱}_{۰}n + {}^{۲۳۵}_{۹۲}U \rightarrow {}^{۱}_{۰}n + {}^{۲۳۵}_{۹۲}U$

۱۶. بازده نیروگاه هسته‌ای یونهر حدود ۳۵درصد است. یعنی ۶۵درصد انرژی حاصل از شکافت ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵، به‌صورت گرما تلف و حدود ۳۵درصد آن، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه در هر شکافت حدود ۲۰۰MeV انرژی آزاد می‌شود، چند کیلوگرم اورانیم ۲۳۵ در سال شکافت پیدا می‌کند؟ (فرض کنید نیروگاه در طول سال با توان پایدار ۱۰۰۰ مگاوات کار می‌کند.)

۶ـ۴ گداخت هسته‌ای

۱۷. انرژی آزادشده در هر واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ با یک نوترون کُند حدود ۲۰۲/۵ MeV و در هر واکنش گداخت دوتریم با تریتیم حدود ۱۷/۶ MeV است.

الف) تعداد نوکلئون‌های شرکت‌کننده در هر واکنش شکافت چقدر است؟ انرژی آزادشده به‌ازای هر نوکلئون را حساب کنید.

ب) تعداد نوکلئون‌های شرکت‌کننده در هر واکنش گداخت چقدر است؟ انرژی آزاد شده به ازای هر نوکلئون را حساب کنید.

پ) نتیجه‌های قسمت (الف) و (ب) را با یکدیگر مقایسه کنید. با توجه به نیاز روزافزون بشر به انرژی، و با توجه به اینکه مواد قابل شکافت مانند ^{۲۳۵}U به مقدار بسیار کمی در طبیعت وجود دارد ولی دوتریم به‌طور فراوان در آب اقیانوس‌ها و دریاها موجود است و جدا کردن آن از هیدروژن معمولی آسان و کم‌هزینه است، اهمیت این مقایسه را توضیح دهید.

۱۵۶